

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NIKEL-63 VE PROMETYUM-147 RADYOİZOTOPLARI İLE
GÜÇLENDİRİLMİŞ BETAVOLTAİK VE DOĞRUDAN ŞARJLI
NÜKLEER PİLLERİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Selim AYDIN

DOKTORA TEZİ
Fizik Anabilim Dalı
Fizik Programı

Danışman
Prof. Dr. Erol KAM

Ekim, 2019

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NİKEL-63 VE PROMETYUM-147 RADYOİZOTOPLARI İLE
GÜÇLENDİRİLMİŞ BETAVOLTAİK VE DOĞRUDAN ŞARJLI NÜKLEER
PİLLERİN DENEYSEL İNCELENMESİ**

Selim AYDIN tarafından hazırlanan tez çalışması 25.10.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Fizik Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Erol KAM

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Erol KAM, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet ALTINDAL, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İskender Atilla REYHANCAN, Üye

İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Kutsal BOZKURT, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa Nizamettin ERDURAN, Üye

İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Erol KAM sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Nikel-63 ve Prometyum-147 Radyoizotopları ile Güçlendirilmiş Betavoltaik ve Doğrudan Şarjlı Nükleer Pillerin Deneysel İncelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Selim AYDIN

İmza

Bu çalışma, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu' nun A4.H5.P12 numaralı projesi ve Yıldız Teknik Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü'nün FDK-2019-3591 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Bana yaşama enerjisi veren canım evlatlarım Ömer Eymen

ve Ali Emir'e..

TEŞEKKÜR

Herşeyden önce üç yıllık emek ve özveri ile Türkiye’de ilk kez ortaya konulan bu kapsamlı Ar-Ge çalışmasını yapmamı bana ikram eden yüce Rabbime sonsuz hamd-ü senâlar olsun.

Tez çalışmamda danışmanlığımı yapan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Erol KAM'a teşekkürlerimi sunarım.

TAEK’te yürütücülüğünü yapmış olduğum Nükleer Pil Projesi kapsamında bana ilham veren ve bilgilerinden daima faydalandığım sevgili dostum Sefa Kemal UZUN’a ve Emin YELTEPE’ye, radyoaktif ince filmlerin hazırlanması konusunda beraber çalıştığım Abdullah DİRİCAN’a ve Monte-Carlo modellemelerini yapan Hasan DİKMEN’e teşekkür ederim.

Yarı iletken malzemelerin tasarımı, üretilmesi ve alınan ölçümler konusunda projede beraber çalıştığımız Bilkent NANOTAM’dan değerli hocam Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY ile değerli araştırmacılar Bayram BÜTÜN’e, Deniz ÇALIŞKAN’a ve emeği geçen diğer tüm araştırma ekibine teşekkürü bir borç bilirim.

Her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, hakkını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim biricik anneme, ablama ve eşime minnettar ve müteşekkirim.

Selim AYDIN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	x
KISALTMA LİSTESİ	xii
ŞEKİL LİSTESİ	xiv
TABLO LİSTESİ	xxi
ÖZET	xxii
ABSTRACT	xxv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı	7
1.3 Bulgular	10
2 RADYASYONUN MADDEYLE ETKİLEŞMESİ	12
2.1 Radyoaktif Bozunma Yasası	13
2.2 Radyoaktif Bozunma Türleri	15
2.2.1 Alfa Bozunması (α).....	15
2.2.2 Beta ve Pozitron Bozunması (β^- , β^+)	15
2.2.3 Gama Yayınlanması (γ)	16
2.2.4 K-Elektron Yakalama (K^-)	16
2.3 Alfa Parçacıklarının Madde ile Etkileşimi	17
2.4 Beta Parçacıklarının Madde ile Etkileşimi.....	18
2.5 Gama ve X-Işınlарının Madde ile Etkileşimi.....	19
2.6 Doz ve Doz Hızı	21

3 RADYOAKTİF ENERJİDEN ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİMİNİN TEMEL İLKELERİ	22
3.1 Radyoizotop Üreteçlerin Sınıflandırılması	22
3.2 Doğrudan Dönüştüren Nükleer Piller	23
3.2.1 Betavoltaik Tabanlı Doğrudan Dönüşümlü Nükleer Piller.....	23
3.2.2 Kontak Potansiyel Farkı Nükleer Piller.....	27
3.2.3 İkincil (Sekonder) Elektron Emisyon Pilleri	27
3.2.4 Gama-Elektrik Üretim Hücresi	28
3.3 Dolaylı Dönüştüren Nükleer Piller.....	28
3.4 Doğrudan Şarjlı Nükleer Piller (DŞNP)	30
3.4.1 Periyodik Hareketli Kantilever	33
3.5 Farklı Tür Nükleer Pillerin Karşılaştırılması.....	36
3.6 Nükleer Pillerde Kullanılan Beta Radyoaktif İzotoplar ve Özellikleri	38
4 NÜKLEER PİLLERİN TEKNOLOJİDEKİ UYGULAMALARI	46
4.1 Kalp Pilleri	46
4.2 Araştırma Robotları.....	48
4.3 Derin Uzay Ölçüm Problemleri	48
4.4 Uzaktan Kontrollü Güç Uygulamaları.....	51
4.5 Mobil Cihazlar.....	51
4.6 MEMS Uygulamaları	52
4.6.1 Nano Güç Sistemleri	53
4.6.2 İnsansız Hava Araçları	56
4.7 Diğer Uygulama Alanları	57
5 YARI İLETKEN YAPILAR	59
5.2 Yarı İletkenlerin Genel Özellikleri ve Enerji Bant Yapıları	59
5.3 Katlı İşlemi (Doping).....	63

5.4 N-Tipi ve P-Tipi Yarı İletkenler.....	63
5.5 Tüketim Bölgesi	65
5.6 Schottky Bariyeri ve Yapısı.....	67
6 BETAVOLTAİK VE DOĞRUDAN ŞARJLI NÜKLEER PİL VERİMİNİN TEORİK İNCELENMESİ	68
6.1 Betavoltaik Nükleer Pilin Çalışma Prensipleri ve Verim Hesaplamaları.....	68
6.1.1 Performansı Etkileyen Faktörler.....	74
6.1.2 Elektriksel Parametreler ve Verim Hesaplamaları	78
6.1.3 Sıcaklık Değişimlerinin Betavoltaik Nükleer Pilin Elektrik Performansına Etkisi.....	89
6.1.4 Geniş Bant Aralıklı Yarı İletkenler ve Radyasyon Dayanıklılığı...	93
6.2 Doğrudan Şarjlı Nükleer Pilin Verim Hesaplamaları.....	100
6.2.1 Doğrudan Şarjlı Nükleer PİL Verimlilik Denklemi	103
6.2.2 Doğrudan Şarjlı Nükleer Pilin Verimini Etkileyen Faktörler	105
6.2.3 Doğrudan Şarjlı Nükleer PİL Veriminin Teorik Değeri	121
7 NİKEL-63 TABANLI BETAVOLTAİK NÜKLEER PİL GELİŞTİRİLMESİ	122
7.1 GaN P-I-N Yarı İletken Aygıt Üretim Çalışmaları	122
7.1.1 GaN Yarı İletken Malzeme Parametrelerinin Simülasyonu.....	124
7.1.2 GaN Aygıt Üretimi	136
7.2 Radyoaktif İnce Film Üretim Aşamaları.....	160
7.2.1 Kaynak Parametrelerinin Simülasyonu	160
7.2.2 Prometyum-147 İnce Film Kaplanması	165
7.2.3 Nikel-63 İnce Film Kaplanması	169
7.3 Nükleer PİL Akım Voltaj Ölçüm Sisteminin Kurulması	173

8 PROMETYUM-147 TABANLI DOĞRUDAN ŞARJLI NÜKLEER PİL GELİŞTİRİLMESİ	175
8.1 Prometyum Tabanlı Doğrudan Şarjlı Nükleer Pil Tasarımı	175
8.2 Doğrudan Şarjlı Nükleer Pil Çoklu Plaka Sistemi.....	181
8.3 Manyetik Alan Etkisi Simülasyonu	184
8.4 Dielektrik Film Kaplanması	185
9 SONUÇ VE ÖNERİLER	189
9.1 Betavoltaik Nükleer Pil Ölçüm Sonuçları.....	189
9.1.1 Karanlık Akım Ölçüm Sonuçları.....	189
9.1.2 Foto Akım Ölçüm Sonuçları.....	197
9.1.3 Betavoltaik Akım Ölçüm Sonuçları	201
9.1.4 Üretilen Maksimum Güç ve Verimin Hesaplanması	206
9.2 Doğrudan Şarjlı Nükleer Pil Ölçüm Sonuçları.....	207
9.3 Tartışma ve Öneriler	210
KAYNAKÇA	214
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	228

SİMGE LİSTESİ

A	Toplam Aktivite
Al ₂ O ₃	Safir
A _s	Yüzey Aktivitesi
A _{sp}	Spesifik Aktivite
AlN	Alüminyum Nitrat
akb	Atomik Kütle Birimi
α	Alfa
b	Geri Saçılma Katsayısı
Bq	Becquerel
B	Beta
C	Sığa
Co	Kobalt
Cs	Sezyum
E _{ort}	Ortalama Beta Enerjisi
E _g	Bant Aralığı Enerjisi
E _{max}	Maksimum Beta Enerjisi
e	Elektron
eV	Elektron Volt
E _g	Yasak Bant Aralığı
E _f	Fermi Seviyesi
FF	Dolum Faktörü
GaN	Galyum Nitrit
γ	Gama
H-3	Trityum
I _{max}	Maksimum Akım
I _o	Doyum Akımı
I _{sc}	Kısa Devre Akımı
I-V	Akım-Voltaj Karakteristiği
k	Boltzman Sabiti
μ	Mikro
n	Nötron
η	Nükleer Pil Verimi
N _A	Akseptör Konsantrasyonu
N _D	Donor Konsantrasyonu
Ni	Nikel
P	Proton
P _{max}	Maksimum Güç
Pd _{max}	Maksimum Güç Yoğunluğu
P _{pil}	Direnç Üzerindeki Elektriksel Güç
Q _c	Kapasitördeki Yük
R _c	Contact Resistance, Kontak Direnci
R _{pil}	Pilin İç Direnci
R _{kaçak}	Kaçak Direnç
R _{sh}	Kesit Alanı (tabaka) Direnci

$R_{yük}$	Yük Direnci
Si	Silisyum
SiC	Silisyum-Karbür
Sr	Stronsiyum
Sv	Sivert
$t_{1/2}$	Yarılanma Süresi
T	Sıcaklık (K)
TLM	Transfer Length Method, Transfer Uzunluğu Metodu
U-tipi	İstemsiz (Kendiliğinden Oluşan) Tabaka
V_{max}	Maksimum Gerilim
V_{doyum}	Doyum Voltajı

KISALTMA LİSTESİ

AlGaAs	Alüminyum Galyum Arsenit
AlN	Alüminyum Nitrat
BAW _{min}	Watt Başına Teorik Minimum Nükleer Pil Yüzey Alanı
Beta	Çekirdekten Yayımlanan Elektron
Built-in	Yapısal
CST	Bilgisayar Simülasyon Teknolojisi
DCNP	Doğrudan Şarjlı Nükleer Pil
Defects	Kristal Kusuru
Doping	Katkılama
EHP	Electron-Hole Pair, Elektron-Deşik Çifti
FF	Fill Factor, Dolum Faktörü
FMCT	Farahmand Modified Caughey Thomas Modeli
İntrinsic	İntrinsik, Yapısal tabaka
ICP-OES	Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer, İndüktif Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi
MAV	Micro Air Vehicle, Mikro Hava Aracı
MCNP	Monte Carlo N-Parçacık Transport
MDA	Minimum Detectable Activity, Saptanabilen Minimum Aktivite
MEMS	Mikroelektromekanik Sistem
MMRTG	Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator, Çoklu Görev Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörü
Mono	Tekli
MOCVD	Metal Organik Kimyasal Buhar Yoğuşturma
NAV	Nano Air Vehicle, Nano Hava Aracı
NEMS	Nanoelektromekanik Sistem
NIST	National Institute of Standards and Technology, Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü
Osilasyon	Titreşim Hareketi
PDLs	Perimeter Depletion Layer, Çevresel Tüketim Katmanları
PECVD	Kimyasal Buhar Kaplama
PMT	Photomultiplier Tube, Foto-Çoğaltıcı Tüp
Poli	Çoklu
Primer	Birincil Parçacık
PVD	Physical Vapour Deposition
PZT	Piezo Zirconate Titanate, Piezo Zirkonat Titanat
Residual	Artık Safsızlıklar
RF	Radyo Frekansı
RIE	Reactive Ion Etching, Reaktif İyon Aşındırması (Kuru Aşındırma)
RTA	Rapid Thermal Anneal, Hızlı Termal Tavlama
RTP	Rapid Thermal Processing
RTG	Radyoaktif Termal Jeneratörler
SAW	Surface Aquistic Wave, Yüzey Akustik Dalga
SE	Sekonder Elektron
SEM	Scanning Electron Microscope, Taramalı Elektron Mikroskobu

Sekonder	İkincil Parçacık
SRH	Shockley-Read-Hall
TCAD	Fizik-Tabanlı Bilgisayar-Destekli Tasarım
UV	Ultraviyole
XRF	X-Ray Fluorescence Spectrometry, X-Işını Floresan Spektrometresi
XRD	X-Ray Powder Diffraction, X-Işını Kırınımı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Nükleer pil ile ilgili makalelerin yıllara göre değişimi	2
Şekil 2.1 Radyoaktif çekirdeklerin bozunma eğrisi	14
Şekil 2.2 Foton-madde etkileşmesi (a) Fotoelektrik etki, (b) Compton saçılması (koherent olmayan saçılma), (c) Elektron-pozitron çifti oluşumu	20
Şekil 2.3 Foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak farklı etkileşim türlerinin baskın olduğu bölgeler.....	21
Şekil 4.1 Nükleer pil ile çalışan kalp pili (pacemaker)	47
Şekil 4.2 Pm-147 ile güçlendirilmiş Betacell-400 ve Medtronic's kalp pilleri...	47
Şekil 4.3 MMRTG'nin Mars uzay aracı Curiosity'e yüklenmesi	48
Şekil 4.4 Radyoizotop termoelektrik üreticinin NASA uzay aracı New Horizons'a yüklenmesi.....	51
Şekil 4.5 Radyoizotop tabanlı prototip bilgisayar bataryası (Xcell-N)	51
Şekil 4.6 PZT kantilever içeren otonom RF basınç sensörü	52
Şekil 4.7 Widetronix tarafından geliştirilen Frefly N-betavoltaik nükleer pil...	54
Şekil 4.8 City Labs - NanoTritium™ – betavoltaik nükleer pil	54
Şekil 4.9 Radyoizotop aktüatörlü kantileverin şematik gösterimi.....	55
Şekil 4.10 1 inç'lik vakum hücresi içine entegre edilmiş RFID aktarıcısı	55
Şekil 4.11 Wasp mikro-istihbarat amaçlı insansız hava aracı	56
Şekil 4.12 Uzun pil ömrü gerektiren ortamlar.....	58
Şekil 5.1 Enerji bant yapıları (a) İletken (b) Yarı iletken (c) Yalıtkan	60
Şekil 5.2 Silikon monokristal kübik kafes görüntüsü.....	61
Şekil 5.3 Silisyum ve germanyum atomlarının elektron dizilimi	61
Şekil 5.4 Saf Silisyum kristalinin kovalent bağ yapısı.....	62
Şekil 5.5 Yarı iletken maddelerin periyodik tablodaki yerleri.....	62
Şekil 5.6 Enerji diyagramı.....	63
Şekil 5.7 Yarı iletken bağ yapıları (a) P Tipi (b) N Tipi.....	64
Şekil 5.8 P tipi ve n tipi yarı iletkenlerde azınlık ve çoğunluk yük taşıyıcıları.....	65
Şekil 5.9 Taşıyıcı difüzyonu ile p-n eklemine tüketim bölgesi oluşumu.....	66
Şekil 5.10 Schottky betavoltaik pil yapısı.....	67
Şekil 6.1 Betavoltaik nükleer pilin genel yapısı.....	69
Şekil 6.2 Elektron-deşik çiftlerinin üretimi (a) Uyarılma (b) Taban durumuna dönme (de-eksitasyon)	70

Şekil 6.3 Betavoltaik nükleer pilin genel yapısı.....	71
Şekil 6.4 (a) p-n eklemünde elektron-deşik hareketi (b) Schottky eklemi.....	72
Şekil 6.5 İleri ve ters ön besleme durumunda, p-n eklemindeki değişim.....	74
Şekil 6.6 Radyasyon-yarı iletken etkileşimi ve betavoltaik EHP üretimi	75
Şekil 6.7 Tuzak destekli tünelleme mekanizması	78
Şekil 6.8 Silikon eklemi boyunca depolanan enerji (a) ^{63}Ni (b) ^{90}Sr	80
Şekil 6.9 Betavoltaik pilin bir boyutlu şematik diyagramı	81
Şekil 6.10 P-N eklemli betavoltaik pilin örnek eşdeğer bir devre modeli.....	86
Şekil 6.11 P-N eklem karanlık ve beta radyasyonu altındaki J-V eğrisi	88
Şekil 6.12 Kısa devre akımının (I_{sc}) sıcaklığa bağlı değişimi.....	90
Şekil 6.13 Açık devre voltajının (V_{oc}) sıcaklığa bağlı değişimi.....	91
Şekil 6.14 Dolum faktörünün sıcaklığa bağlı değişimi.....	92
Şekil 6.15 Maksimum gücün (P_{max}) sıcaklığa bağlı değişimi	92
Şekil 6.16 Pil veriminin (η) sıcaklığa bağlı değişimi.....	93
Şekil 6.17 Doğrudan şarjlı nükleer pil devre hücresinin şeması	100
Şekil 6.18 Radyoaktif kaynak ve toplayıcı plaka sistemi	101
Şekil 6.19 Beta parçacık akım yoğunluğunun, radyoaktif tabakanın (a) kütle kalınlığına (b) yüzey aktivitesine bağlılığı.....	108
Şekil 6.20 2π geometride, kaynak veriminin kütle kalınlığına bağlılığı.....	109
Şekil 6.21 Paralel plakalı kolektörlerde beta akısının hesaplanması.....	109
Şekil 6.22 Kolektörler arasındaki mesafeye bağlı beta akı değişimi.....	111
Şekil 6.23 Pm-147 ve H-3 için biriken voltaja göre kolektöre ulaşan β akısı....	112
Şekil 6.24 Kolektör voltajı a) düşük b) parçacığı durdurabilecek kadar büyük olduğunda beta yörüngesine etkisi.....	113
Şekil 6.25 $\eta_R(V)$ ve $V \cdot \eta RV \varepsilon(eV)$ biriken voltajlar (a) Pm-147 (b) H-3 pil	116
Şekil 6.26 Enerjisi 340 keV'e kadar olan betaların oluşturduğu SE oranı	117
Şekil 6.27 Metal ve yalıtkan yüzeydeki ikincil elektron enerji dağılımı	118
Şekil 6.28 İkincil elektron sayısının beta enerjisine bağlılığı	118
Şekil 6.29 Polimid kaplı Pm-147 tabanlı nükleer pilin yapısı	119
Şekil 6.30 Geri saçılma katsayısının birincil elektron enerjisine bağlılığı.....	120
Şekil 7.1 GaN malzemedeki elektron mobilitesinin safsızlık katkılama konsantrasyonuna bağlı değişimi	124
Şekil 7.2 $10^{13} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ arası tuzak yoğunluğunun I-V eğrisine etkisi	126

Şekil 7.3	1 fs-1s arasında azınlık taşıyıcı yaşam süresinin I-V eğrisine etkisi ...	126
Şekil 7.4	5 keV elektron ışıını altında radyatif rekombinasyon etkisi	127
Şekil 7.5	5 keV'lik elektron ışıını altında yüzey rekombinasyon etkisi varken ve yokken elde edilen I-V eğrisi	128
Şekil 7.6	Tünel parametresinin betavoltaik akım üzerindeki etkisi	128
Şekil 7.7	p-i-n bant yapısının, intrinsik bölge katkılama miktarının fonksiyonu olarak değişimi	130
Şekil 7.8	p-i-n aygıt içerisinde, intrinsic bölge katkılama miktarının fonksiyonu olarak elektrik alanın dağılımı	130
Şekil 7.9	Monte-Carlo simülasyonunda elektron sütununun özellikleri ve soğrulma/yüzeyden saçılma yüzdeleri	131
Şekil 7.10	5, 17 ve 40 keV için yüzey altındaki saçınma görünümü	132
Şekil 7.11	Farklı enerjili betaların GaN ekleme bıraktığı enerji dağılımı	132
Şekil 7.12	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 keV enerjili saçınım istatistikleri kullanılarak hesaplanan doz dağılımı.....	133
Şekil 7.13	5, 17 ve 40 keV enerjili beta parçacıkları için çarpışma indisinin fonksiyonu olan toplam parçacık enerjisi	133
Şekil 7.14	Çarpışmalarda kaybedilen beta parçacık enerji histogramı.....	134
Şekil 7.15	GaN içerisinde 17 keV enerjili beta yörüngesinin simülasyonu.....	134
Şekil 7.16	5, 10,15, 20, 25, 30, 35 ve 40 keV enerjili parçacıkların, x-y, y-z, x-z düzlemlerindeki çarpışma pozisyonları ve enerji dağılımı	135
Şekil 7.17	Laytec reflektans grafiği (566.1 nm Fabry-Perot osilasyonları).....	137
Şekil 7.18	GaN Tampon katmanının AFM görüntüsü.....	137
Şekil 7.19	GaN tampon kalınlık haritası (Photo Luminescence Mapper).....	138
Şekil 7.20	Laytec reflektans grafiği (566.1 nm Fabry-Perot osilasyonları).....	139
Şekil 7.21	N-Tipi GaN katmanının AFM görüntüsü	139
Şekil 7.22	Laytec reflektans grafiği (632 nm Fabry-Perot osilasyonları)	140
Şekil 7.23	İ-Tipi GaN katmanının Hall Etkisi ölçümü	141
Şekil 7.24	600 nm i-GaN GaN-PIN epitaksiyel yapısının kalınlık ölçümü	141
Şekil 7.25	Laytec reflektans grafiği (566.1 nm Fabry-Perot osilasyonları)	142
Şekil 7.26	Kontak direncini ölçmek için kullanılan model ve fotomaske	144
Şekil 7.27	Betavoltaik pil aygıt proses aşamaları	144
Şekil 7.28	2 inch çapındaki p-GaN epitaksiyel yapısı ve Dicer cihazı ile kesildikten sonraki görüntüsü	145
Şekil 7.29	N-mesa aşındırma sonrası optik mikroskop görüntüleri.....	146

Şekil 7.30 N-metal kaplama ve liftoff sonrası optik mikroskop görüntüsü.....	147
Şekil 7.31 N-metal RTA sonrası görüntü.....	147
Şekil 7.32 N-kontak metalizasyon sonrası F1 (wafer 1) ve F3 (wafer 2) TLM desenleri arasındaki mesafeye bağlı direnç değişim grafiği.....	149
Şekil 7.33 P-kontak metalizasyon sonrası optik mikroskop görüntüsü	149
Şekil 7.34 P-kontak RTP tavlama sonrası optik mikroskop görüntüsü.....	150
Şekil 7.35 P-Kontak metal tavlama sonrası F1 (wafer 1) ve F3 (wafer 3) TLM desenleri arasındaki mesafeye bağlı direnç değişim grafiği	150
Şekil 7.36 Touch metalizasyon sonrası mikroskop görüntüsü	151
Şekil 7.37 P kontak dirençleri	151
Şekil 7.38 N-kontak dirençleri	151
Şekil 7.39 Aşındırma sonrası mikroskop görüntüsü	152
Şekil 7.40 Mesa aşındırma sonrası optik mikroskop görüntüsü.....	152
Şekil 7.41 SiO ₂ dielektrik aşındırma sonrası aygıt görüntüleri	153
Şekil 7.42 Bağlantı metal sonrası aygıtların optik mikroskop görüntüleri	154
Şekil 7.43 Çeşitli aygıtların fotomaske görüntüsü	154
Şekil 7.44 Büyük alanlı ve paralel bağlanmış aygıt tasarımı.....	155
Şekil 7.45 Üretilcek yapının, PCB üzerine bağlantı yapılmış son hali	155
Şekil 7.46 Fotomaskenin görünümü	156
Şekil 7.47 Fotomaskenin yakından görünümü	156
Şekil 7.48 P-Katman'ın farklı proses çeşitleri.....	157
Şekil 7.49 Betavoltaik aygıtın şematik olarak yandan ve üstten görünümü.....	157
Şekil 7.50 Örnek tutucu PCB tasarımı.....	158
Şekil 7.51 Örnek ve PCB.....	158
Şekil 7.52 Örnek ve tel bağlantıları.....	158
Şekil 7.53 Betavoltaik nükleer pil akım-voltaj ölçüm düzeneği	159
Şekil 7.54 Geliştirilen betavoltaik nükleer pil prototipi.....	159
Şekil 7.55 Vakum hücresi ve PCB'nin yerleşimi.....	160
Şekil 7.56 Radyoaktif ince film simülasyonu için kullanılan geometri.....	160
Şekil 7.57 Pm-147 için optimum ince film kalınlığının belirlenmesi	161
Şekil 7.58 Ni-63 için optimum ince film kalınlığının belirlenmesi.....	161
Şekil 7.59 Farklı Pm-147 ince film kalınlıklarında beta enerji spektrumunun değişimi	162

Şekil 7.60 Farklı Ni-63 ince film kalınlıklarında beta enerji spektrumunun değişimi	162
Şekil 7.61 Enerjinin fonksiyonu olarak Pm-147 yüzey akısının-kalınlığa bağlı değişimi	163
Şekil 7.62 Enerjinin fonksiyonu olarak, Ni-63 yüzey akısının-kalınlığa bağlı değişimi	163
Şekil 7.63 Ni-63 beta akısının metalden yarı iletkene saçılan kesrinin modellenmesi	164
Şekil 7.64 Plakadan saçılan betaların, toplam beta spektrumuna etkisi	164
Şekil 7.65 Hassas elektronik terazi yardımıyla sıvı Pm-147 kaynağının alınması ve aktivitesinin belirlenmesi.....	165
Şekil 7.66 Radyoaktif ince film kaplama – maskeleme.....	166
Şekil 7.67 Mikro kürecikler içeren elektro spray çözeltisi	166
Şekil 7.68 Mikro küreciklerin metal yüzeye homojen olarak dağıtılması.....	167
Şekil 7.69 Radyoaktif Pm-147 beta kaynağının metal yüzeye kaplanması	167
Şekil 7.70 Vynil kaplama işlemi (a)Vynil malzeme (b) Kaplanacak metal yüzey (c) Vynil-metal birleşimi (d) Kapalı cam kap ve aseton işlemi.....	168
Şekil 7.71 Pm-147 beta kaynağı kaplanmış metal yüzeyin görünümü.....	168
Şekil 7.72 Ayrılan Ni-63 radyoaktif sıvının tartıldığı hassas elektronik tartı sistemi	170
Şekil 7.73 (a) NiSO_4 çözeltisine amonyum sülfat $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ eklenmesi (b) pH ölçümü.....	170
Şekil 7.74 Ni-63 Radyoaktif ince film elektroliz kaplama çalışmaları.....	171
Şekil 7.75 1 cm ² bakır plaka üzerine kaplanmış Ni-63 radyoaktif ince film.....	172
Şekil 7.76 Betavoltaik nükleer pil karakterizasyon sistemi.....	173
Şekil 7.77 Betavoltaik nükleer pil karakterizasyon sistemi.....	173
Şekil 7.78 Betavoltaik nükleer pil ölçümleri için geliştirilen yazılım	174
Şekil 8.1 Betavoltaik nükleer pil ölçümleri için geliştirilen yazılım arayüzü	175
Şekil 8.2 Uygulanan plaka voltajına göre kolektör voltajının ölçülmesi	176
Şekil 8.3 Ayarlanan ve akümüle edilen voltajın ölçüldüğü deney sistemi.....	176
Şekil 8.4 Elektrostatik alan ölçer kalibrasyon eğrisi	177
Şekil 8.5 Elektrotlar arası optimum mesafenin belirlenmesi	178
Şekil 8.6 Farklı elektrot aralığında zamana göre kolektörde biriken voltaj.....	178
Şekil 8.7 Farklı elektrot mesafelerinde oluşan kolektör akım-voltaj grafiği	179
Şekil 8.8 2” çaplı elektrotlar arasında üretilen gücün mesafeye bağlılığı.....	180

Şekil 8.9 3" çaplı elektrotlar arasında üretilen gücün mesafeye bağılılığı.....	181
Şekil 8.10 DŞNP çok katmanlı metal plaka sistemi	182
Şekil 8.11 DŞNP deney ve ölçüm sistemi	182
Şekil 8.12 Vakum hücresi ve elektriksel bağlantıları	183
Şekil 8.13 Doğrudan şarjlı nükleer düzeneği ve elektriksel bağlantılar	184
Şekil 8.14 Üst ve altta toplayıcı plaka, ortada elektron kaynağının olduğu doğrudan şarjlı nükleer pil sistemi modeli	185
Şekil 8.15 Plakaya sarılmış solenoidin oluşturduğu manyetik alanın plakalar arasındaki elektron yörüngesi üzerindeki etkisi	185
Şekil 8.16 Metal kolektör üzerine kaplanmış polimid film	186
Şekil 8.17 Beta parçacıklarının polimid film içindeki	187
Şekil 8.18 Polimid filmlerin metal kolektörler ile birleştirilmesi	188
Şekil 9.1 F1 soldaki aygıtların karanlık akım ölçümleri.....	189
Şekil 9.2 F1 soldaki aygıtların karanlık akım ölçümleri (log)	190
Şekil 9.3 F1 sağdaki aygıtların karanlık akım ölçümleri.....	190
Şekil 9.4 F1 sağdaki aygıtların karanlık akım ölçümleri (log)	191
Şekil 9.5 F2 soldaki aygıtların karanlık akım ölçümleri.....	191
Şekil 9.6 F2 soldaki aygıtların karanlık akım ölçümleri (log)	192
Şekil 9.7 F2 sağdaki aygıtların karanlık akım ölçümleri.....	192
Şekil 9.8 F2 sağdaki aygıtların karanlık akım ölçümleri (log)	193
Şekil 9.9 F3 soldaki aygıtların karanlık akım ölçümleri.....	193
Şekil 9.10 F3 soldaki aygıtların karanlık akım ölçümleri (log)	194
Şekil 9.11 F3 sağdaki aygıtların karanlık akım ölçümleri.....	194
Şekil 9.12 F3 sağdaki aygıtların karanlık akım ölçümleri (log)	195
Şekil 9.13 F4 soldaki aygıtların karanlık akım ölçümleri.....	195
Şekil 9.14 F4 soldaki aygıtların karanlık akım ölçümleri (log)	196
Şekil 9.15 F4 sağdaki aygıtların karanlık akım ölçümleri.....	196
Şekil 9.16 F4 sağdaki aygıtların karanlık akım ölçümleri (log)	197
Şekil 9.17 F1-G aygıtı karanlık akım ve fotoakım.....	197
Şekil 9.18 F2-B aygıtı karanlık akım ve fotoakım.....	198
Şekil 9.19 F3-O aygıtı karanlık akım ve fotoakım	198
Şekil 9.20 F4-A aygıtı karanlık akım ve fotoakım.....	199
Şekil 9.21 F4-F aygıtı karanlık akım ve fotoakım	199

Şekil 9.22 F4-H aygıtı karanlık akım ve fotoakım	200
Şekil 9.23 F4-L aygıtı karanlık akım ve fotoakım	200
Şekil 9.24 F1-A aygıtı karanlık akım ve betavoltaik akım.....	201
Şekil 9.25 F1-F aygıtı karanlık akım ve betavoltaik akım	201
Şekil 9.26 F1-P aygıtı karanlık akım ve betavoltaik akım	202
Şekil 9.27 F1-R aygıtı karanlık akım ve betavoltaik akım.....	202
Şekil 9.28 F4-A aygıtı karanlık akım ve betavoltaik akım.....	203
Şekil 9.29 F4-B aygıtı karanlık akım ve betavoltaik akım.....	203
Şekil 9.30 F4-H aygıtı karanlık akım ve betavoltaik akım	204
Şekil 9.31 F4-Q aygıtı karanlık akım ve betavoltaik akım	204
Şekil 9.32 F4-P aygıtı karanlık akım ve betavoltaik akım	205
Şekil 9.33 F4-N aygıtı karanlık akım ve fotoakım	205
Şekil 9.34 F4-K aygıtı karanlık akım ve fotoakım.....	206
Şekil 9.35 F4-R aygıtı karanlık akım ve betavoltaik akım-voltaj-güç eğrisi	206
Şekil 9.36 F1-F aygıtı karanlık akım ve betavoltaik akım-voltaj-güç eğrisi	207
Şekil 9.37 Kolektör voltajının zamana göre değişimi	208

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Farklı betavoltaik pil tasarımları ve özellikleri	26
Tablo 3.2 Doğrudan şarjlı nükleer pil parametreleri	32
Tablo 3.1 Farklı tip nükleer pil parametreleri	37
Tablo 3.2 Çeşitli radyoizotoplar için watt başına teorik minimum nükleer pil yüzey alanı (BAWmin) ve hacmi (BVWmin)	41
Tablo 3.3 Beta radyoaktif kaynakları ve spesifik özellikleri.....	43
Tablo 3.4 Betavoltaik pil için en uygun beta radyoaktif kaynaklar ve özellikleri	44
Tablo 4.1 Kalp pilleri için geliştirilen çeşitli termoelektrik nükleer piller	47
Tablo 4.2 RTG kullanılan çeşitli NASA görevleri.....	50
Tablo 6.1 Literatürde GaN için elde edilen bazı deneysel sonuçlar	96
Tablo 6.2 Literatürde SiC için elde edilen bazı deneysel sonuçlar	97
Tablo 6.3 Betavoltaik pillerde en sık kullanılan yarı iletkenlerin elektriksel ve fiziksel parametre değerleri	99
Tablo 6.4 H-3, Ni-63, Pm-147 ve Sr-90 için kütle soğurma katsayıları ve durdurma güçleri.....	106
Tablo 6.5 H-3, Ni-63, Pm-147, Sr-90 kimyasal bileşiği ve spesifik aktiviteleri.	107
Tablo 6.6 5 keV'lik birincil elektron enerjisi için, ikincil elektron oluşumunu azaltan en uygun polimer malzemeler	119
Tablo 6.7 H-3 ve Pm-147 tabanlı DŞNP'nin verimini etkileyen faktörler	121
Tablo 7.1 GaN tuzak enerji seviyeleri ve konsantrasyonları	125
Tablo 7.2 Tasarlanan GaN tampon epitaksiyel yapısı.....	143
Tablo 7.3 Örneklere ait TLM ölçümleri	148
Tablo 7.4 Pm-147 radyoaktif ince film aktivite-kalınlık dönüşümü	169
Tablo 7.5 Ni-63 radyoaktif ince film aktivite-kalınlık dönüşümü	172
Tablo 9.1 Ni-63 tabanlı betavoltaik nükleer pilin performans parametreleri...	207
Tablo 9.2 Pm-147 doğrudan şarjlı nükleer pilin performans parametreleri.....	210

Nikel-63 ve Prometyum-147 Radyoizotopları ile Güçlendirilmiş Betavoltaik ve Doğrudan Şarjlı Nükleer Pillerin Deneysel İncelenmesi

Selim AYDIN

Fizik Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Erol KAM

Yapılan tez çalışmasında, Ni-63 radyoizotopu ile güçlendirilmiş doğrudan dönüşümlü (betavoltaik) ve Pm-147 kaynağı ile güçlendirilmiş doğrudan şarjlı nükleer prototipleri geliştirilmiştir. Geliştirilen betavoltaik nükleer pilin açık devre voltajı ve kısa devre akımı ölçülmüş, akım-voltaj eğrileri çizilmiş, dolum faktörü ve verim değerleri hesaplanmıştır. Geliştirilen doğrudan şarjlı nükleer pil prototipi üzerinde biriken toplam yük, doyum voltajı, şarj akımı ve kapasitans ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçlarından pilde depolanan enerji, maksimum güç ve verim değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca nükleer pil prototiplerinin akım-voltaj-güç ölçümlerinin bilgisayar kontrollü olarak yapılması için Labview tabanlı nükleer pil karakterizasyon yazılımı geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılım kullanılan radyoaktif kaynağın türüne ve aktivitesine bağlı olarak verileri analiz etmekte ve pilin maksimum akım-voltaj, dolum faktörü, kısa devre akımı, açık devre voltajı ve verim değerlerini otomatik olarak hesaplamaktadır.

Tez araştırmasının birinci kısmında, Ni-63 tabanlı betavoltaik nükleer pil ve ölçüm sistemi geliştirilmesi üzerine çalışılmıştır. Çalışmanın birinci aşamasında, GaN yarı iletken malzemesinin karakteristik parametreleri ve aktif bölge kalınlığı simülasyonları yapılmıştır. Yapılan Monte Carlo modellemeleri, Ni-63 beta enerji spektrumu için, GaN tüketim bölgesi genişliğinin 450 nm ile 2.1 μm arasında olması gerektiğini göstermiştir. GaN p bölgesinin katkılama yoğunluğu dikkate alınarak yapılan simülasyon ve teorik hesaplamalara göre, Ni-63 kaynağından yayımlanan ortalama 17.4 keV enerjili beta parçacık enerjisinin tamamına yakınının, 1 μm içerisinde soğurulduğu görülmüştür. Bu sebeple yarı iletkenin aktif bölge kalınlığının 1 μm civarında olmasının uygun olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca, Silvaco yarı iletken aygıt simülasyon programı ve Tracer Monte-Carlo simülatörü ile elde edilen sonuçlar kullanılarak, aygıt tasarımı, epitaksi büyütme ve aygıtların performansını etkileyen faktörlerden, kontak direncinin düşürülmesi için çalışmalar yapılmıştır. Epitaksi büyütme Metal-Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve metal kontaktları yapılarak ölçüme hazır hale getirilmiştir. Farklı özelliklerde birçok yarı iletken aygıt geliştirilmiştir. Üretilen aygıtların karanlık akımları ölçülmüş ve morötesi dalgaboylarında, fotonlara tepkiselliği gözlenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında, Ni-63 ve Pm-147 radyoaktif ince film üretim çalışmaları yapılmıştır. Bunun için MCNP simülasyonu ile, optimum ince film kalınlığının ne olması gerektiği belirlenmiştir. Elde edilen kalınlık değeri için, kaynağın kendini hangi oranda zırladığı ve beta enerji spektrumunun hangi oranda değiştiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar kullanılarak, Ni-63 kaynağı elektroliz yöntemi ile, Pm-147 kaynağı ise damlatma yöntemi ile metal üzerine kaplanmıştır. Son aşamada hazırlanan radyoaktif ince filmler, GaN yarı iletken aygıtlar ile birebir örtüştürülerek betavoltaik nükleer pilin üretimi tamamlanmıştır. Üretilen prototipler, uygun bir vakum hücresi içerisine yerleştirilerek vakum altında akım-voltaj-güç ölçümleri yapılmıştır. Geliştirilen ilk betavoltaik nükleer pil prototipi üzerinde yapılan ölçümlerde, açık devre voltajı 0.65 V, kısa devre akımı 0.1 nA ve maksimum güç 0.016 nW olarak bulunmuştur. Pilin verimi % 0.05, dolum faktörü (FF) 0.25 civarındadır. Geliştirilen ikinci prototip üzerinde yapılan ölçümlerde açık devre voltajı 0.98 V, kısa devre akımı 0.4 nA ve maksimum güç 0.11 nW

olarak elde edilmiştir. Pilin verimi %0.35 ve dolum faktörü (FF) 0.28 olarak hesaplanmıştır. Ölçülen değerler, kaynağın toplam aktivitesinin 1 mm² lik yarı iletken eklem alanına denk gelen 0.75 mCi aktivite ile elde edilmiştir.

Tez araştırmasının ikinci kısmında, Pm-147 tabanlı doğrudan şarjlı nükleer pil düzeneği hazırlanmış ve kurulan düzenek yüksek vakum hücresi içerisine yerleştirilmiştir. Ölçümlerin yapılabilmesi için, nükleer pilin kontakları, vakum bağlantı ekipmanları ile hücre dışına taşınmıştır. Deney kurulumu tamamlandıktan sonra, ölçüm cihazları sırayla bağlanarak, pilin akım, voltaj ve kapasitans değerleri ölçülmüştür. Ayrıca vakum hücresinin üzerine yerleştirilen elektrostatik alan/voltaj ölçer ile, nükleer pilin plakalarında biriken toplam yük ve voltaj değerleri temassız olarak ölçülmüştür. Toplam 100 mCi aktiviteli Pm-147 radyoizotopla güçlendirilmiş nükleer pil prototipi üzerinde yapılan ölçümlerde, pilin doyum voltajı 421 V, şarj akımı 54 pA ve üretilen maksimum güç 22.7 nW olarak bulunmuştur. Pilin kapasitans değeri 66.8 pF, verim değeri %0.07 civarındadır. Pilde depolanan güç değeri 6 µJ civarındadır. Bu aktivitede teorik verim değeri % 0.21 bulunmasına rağmen deneysel verim değerinin üç kat daha düşük bulunmuştur. Bunun nedeni, ortalama 62 keV enerjili Pm-147 beta parçacıklarının geri saçılma etkisini azaltmak için, metal kolektörler üzerine 25 µm polimid film kaplanmasıdır. Bu kalınlıkta, Katz-Penfold yarı deneysel formül'e göre 49 keV ve altındaki beta spektrumu kaybolmaktadır ve kaplanması gereken polimid film kalınlığı 0.3-0.4 µm'yi geçmemelidir.

Anahtar Kelimeler: Betavoltaik nükleer pil, radyoizotop, MOCVD, yarıiletken p-n eklemi, mikro-elektromekanik sistem.

Experimental Investigation of Nickel-63 and Promethium-147 Radioisotope-Powered Betavoltaic and Direct Charge Nuclear Batteries

Selim AYDIN

Department of Physics

PhD. Thesis

Advisor: Prof. Dr. Erol KAM

In this study, Pm-147 direct charged and Nickel-63 direct conversion (betavoltaic) nuclear battery prototypes were developed. The open-circuit voltage and short circuit current were measured, current-voltage curves were drawn, filling factor and yield values were calculated. Total charge, saturation voltage, charge current and capacitance measurements were taken on the direct-charged nuclear battery prototype. Maximum power, efficiency and deposited energy values of the battery were calculated from the measurement results. In addition, a LabVIEW-based nuclear battery characterization software has been developed to take computer-controlled current-voltage-power measurements on nuclear battery prototypes. This software analyzes data based on type and activity of the radioactive source and automatically calculates the maximum current-voltage, filling factor, short-circuit current, open-circuit voltage and efficiency values of the battery.

In the first phase of research, we worked to develop a Ni-63 based-betavoltaic nuclear battery and I-V measurement system. In the first step of this study, Monte-

Carlo simulations were used to determine the characteristic parameters and active region of GaN semiconductor. The simulations results showed that the width of GaN depletion region should be between 450 nm and 2.1 μm for the Ni-63 full beta energy spectrum. Besides, according to the simulations results and theoretical calculations considering to doping concentration of the GaN p-type region, a large amount of the Ni-63 beta-particles which have an average 17.4 keV energy is absorbed within 1 μm . Thus, it was determined that 1 μm semiconductor active region thickness is suitable. In addition, using the Silvaco semiconductor device simulation program and Tracer Monte-Carlo simulator results, it was studied to epitaxial-growth, design of the device and reduce contact resistance which affects the performance of the battery. Epitaxial growth was carried out by using metal-organic chemical vapour deposition (MOCVD) system and metal contacts were prepared for electrical measurements. Many semiconductor devices of different properties were developed. The dark currents of the devices were measured and their response to short-wavelength ultraviolet photons were observed. In the second step of the study, it was worked to prepare Ni-63 and Pm-147 radioactive thin film. For this purpose, the optimum thin film thickness was determined from MCNP Monte-Carlo simulations results. Additionally, the self-shielding effect and changing of the beta energy spectrum were investigated. According to these results, the Ni-63 and Pm-147 sources were coated on the metals by using electro-deposition and dropping method, respectively. In the third step of the study, the radioactive thin films were mounted onto the surface of GaN semiconductor device. Thus the production of betavoltaic nuclear battery was completed. The fabricated prototypes were placed in a vacuum chamber and current-voltage-power measurements were made. Measurement results showed that, under the irradiation of a Ni-63 source, betavoltaic has short-circuited current (I_{sc}) of 0.1 nA, an open-circuit voltage (V_{oc}) of 0.65 V, and maximum power (P_{max}) of 0.016 nW. The fill factor (FF) of the betavoltaic cell was around 25% and the conversion efficiency (η) was 0.05%. The measurements on the second betavoltaic prototype, the open-circuit voltage and short circuit current were measured as 0.98 V and 0.4 nA, respectively. The maximum power of the battery was calculated as 0.11 nW. The fill factor (FF) of the betavoltaic cell was around 28% and the conversion

efficiency (η) was 0.35%. The values were obtained with an activity of 0.75 mCi that falls onto the 1 mm² semiconductor p-n junction area of the total activity.

In the second phase of research, Pm-147 based direct charged nuclear battery setup was prepared and placed in a high vacuum system. To take electrical measurements, connections of the battery have been moved out from the vacuum chamber using electrical feed-throughs. After the battery setup was completed, the measurement devices were connected to the system and the current, voltage and capacitance values of the battery were measured. In addition, the total charge and accumulated voltage on the battery plates were measured with non-contact electrostatic field/voltage meter placed on the vacuum chamber. In measurements of the nuclear battery prototype powered by Pm-147 radioisotope with a total activity of 100 mCi, the saturation voltage and charge current was 54 pA and 421 V, respectively. The battery has a maximum power of 22.7 nW and capacitance of 66.8 pF. Total conversion efficiency of the battery was 0.07%. The deposited energy in the battery was calculated around 6 μ J. Although the theoretical battery efficiency was calculated as 0.21%, experimental efficiency was found three times lower than that of this value. This is because a 25 μ m polyimide film is coated on metal collectors to reduce the backscattering effect of Pm-147 beta particles with an average energy of 62 keV. In this thickness, the beta energy spectrum of 49 keV and below is lost according to the Katz-Penfold semi-experimental formula and the polyimide film thickness should not exceed 0.3 - 0.4 μ m.

Keywords: Betavoltaic nuclear battery, radioisotope, semiconductor, MOCVD, semiconductor p-n junction, micro-electromechanical systems.

1.1 Literatür Özeti

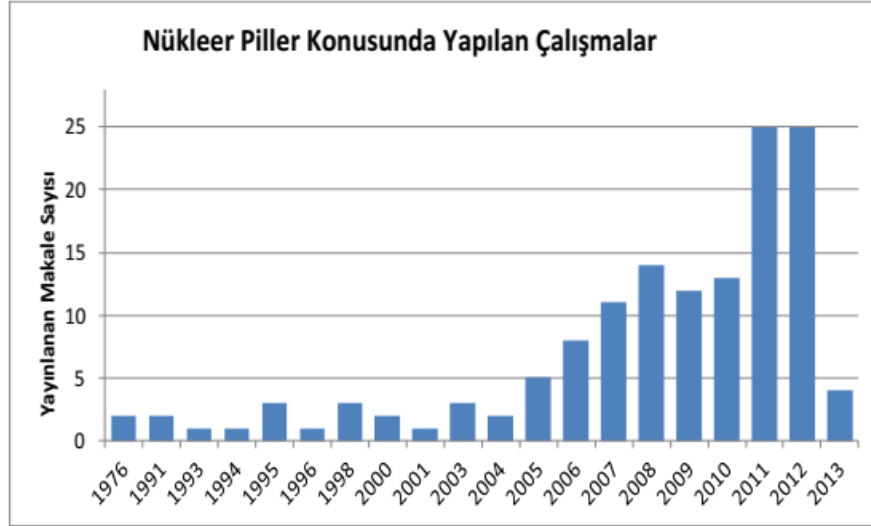
Radyoaktif bozunma enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi fikri, 1896'da Fransız fizikçi Henri Becquerel'in radyoaktiviteyi keşfetmesi kadar eskiye dayanmaktadır. Nükleer pil geliştirilmesiyle ilgili çalışmalar 1900'lerin ilk yıllarında başlamıştır. Radyoaktif bozunmaya dayalı ilk güç üretici, 1913 yılında ünlü fizikçi Henry Moseley tarafından üretilmiştir [1]. Bu teknolojik alanla ilgili, 1950'li yıllardan bu yana, özellikle ABD ve Rusya birçok Ar-Ge çalışması yürütmüştür. Günümüzde NASA, MIT, Sandia, Bellona, Nanjing Uzay ve Havacılık Üniversitesi gibi birçok AR-GE laboratuvarı bu alana yoğunlaşmış durumdadır.

İlk yarı iletken tabanlı (Silikon) betavoltaik nükleer pil prototipi, 1953 yılında Dr. Paul Rappaport tarafından ABD'de geliştirilmiştir. Prototipte radyoaktif kaynak olarak Sr-90 kullanılmıştır. 1954 yılında ABD'de resmi bir kurum olarak kurulan ve daha sonra büyük bir Amerikan elektronik şirketi olan RCA tarafından, küçük radyo alıcıları ve işitme cihazları için ilk küçük boyutlu atomik pil geliştirilmiştir [2]. 1956 yılında ABD'de, TRACER Laboratuvarı tarafından yarı iletken tabanlı nükleer pil patenti alınmıştır [3], [4]. 1970 yılının başlarında Donald Douglas Laboratuvarında, silikon p-n eklemi tabanlı betavoltaik kalp pili geliştirilmiş ve uygulanmıştır [5], [6]. 1968-1974 yılları arasında ABD'de Dr. Larry Olsen ve çalışma ekibi tarafından Betacel-400 adında bir nükleer pil modeli geliştirilmiştir. Pm-147 radyoaktif tabanlı olarak geliştirilen nükleer pil, 400 μ W güce ve %4 verime sahiptir [7].

Daha sonraki yıllarda bu teknoloji üzerine yapılan araştırmaların sayısı artmış ve son 15 yılda yoğunluk kazanmıştır. ABD, Rusya ve Çin'de bu teknolojinin üretimi ile ilgili büyük ticari firmalar ve araştırma merkezleri kurularak, 25 yıl boyunca tükenmeyen nükleer piller geliştirilmiştir. Bu nükleer piller, sağlık uygulamaları,

savunma sanayi, denizaltı ve uzay araştırmaları gibi birçok alanda kullanır hale gelmiştir.

Betavoltaik nükleer pillerle ilgili yayınlanan makale sayısının yıllara göre değişimi şekil 1.1’de gösterilmiştir [8].



şekil 1.1 Nükleer pil ile ilgili makalelerin yıllara göre değişimi

Konuyla ilgili geçmişten günümüze yapılan araştırma çalışmalarına ait bazı yayın ve teknik raporlar aşağıda verilmiştir,

“Electron-Voltaic Cell Study” adlı, ABD-Nebraska Üniversitesinde 1964 yılında yapılan bilimsel araştırma raporunda, Galyum Arsenid (GaAs) Germanium, Silikon gibi yarı iletkenlerin karakteristik parametreleri ile Ni-63, Sm-151, Pm-147, Kr-85, TI-204 beta radyoaktif kaynakların spesifik özellikleri incelenmiştir [9]. Ayrıca elde edilen deneysel sonuçlara ve teorik hesaplamalara göre, hangi radyoaktif kaynak ve yarı iletken kullanılırsa daha yüksek verimli nükleer pil geliştirebileceği araştırılmıştır.

2002 yılında yayınlanan, “Polymers, Phosphors, and Voltaics for Radioisotope Microbatteries” adlı kitapta, kimyasal pillerin, fosil yakıtların ve radyoizotop pillerin enerji yoğunluğu karşılaştırılmıştır. Çalışmada radyoizotop tabanlı nükleer pillerin, ultra düşük güçlü mikroelektronik devrelerde ve MEMS sistemlerindeki uygulamalarından bahsedilmiştir [10].

“Nuclear Batteries with Tritium and Promethium-147 Radioactive Sources” adlı doktora tezi çalışmasında, doğrudan şarjlı, dolaylı dönüşümlü ve doğrudan dönüşümlü nükleer pillerin genel sınıflandırması ve çalışma mekanizmaları anlatılmıştır. Tez çalışmasında, çeşitli metal toplayıcı plakalar farklı dielektrik malzemeler ile kaplanmış ve her bir toplayıcı karşısına, radyoaktif kaynak kaplanmış başka bir metal plaka yerleştirilmiştir. Bu şekilde oluşturulan çok katlı pil düzeneği vakum hücresi içerisine yerleştirilmiştir. Son olarak, radyoaktif kaynaktan yayımlanan betaların metal plakalara çarparak oluşturduğu ikincil elektronlar toplanmış ve oluşan akım/voltaj değerleri ölçülmüştür. Ayrıca dielektrik malzemede oluşan uzay-yük dağılımı puls-elektro-akustik sistem ile ölçülerek, elde edilen deneysel veriler, Monte Carlo simülasyonu ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır [11].

“Alpha Indirect Conversion Radioisotope Power Source” adlı makale çalışmasında, 300 mCi Pu-238 alfa kaynağı ve AlGaAs yarı iletken fotovoltaiik hücreler kullanılarak, dolaylı dönüşümlü nükleer pil prototipi geliştirilmiştir. Geliştirilen pilin kısa devre akımı $I_{sc} = 14 \mu A$; açık devre voltajı $V_{oc} = 2.3 V$, çıkış gücü $P = 21 \mu W$ olarak elde edilmiştir [12].

“Radionuclide Production for Radioisotope Micro-Power Source Technologies” adlı makale çalışmasında, radyoizotop mikro-güç kaynaklı sistemlerin (RIMS), düşük giriş gücü gerektiren elektronik devrelerde daha çok önem kazandığından bahsedilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada katı ve sıvı yarı iletken tabanlı betavoltaiik pillerin radyoaktif beta kaynağı karşısındaki radyasyon dayanıklılıkları karşılaştırılmış ve örgü yapılarında meydana gene kusurlar incelenmiştir. Katı p-i-n yarı iletken eklem için P-33 ve Pm-147 kaynakları kullanılırken, sıvı yarı iletken ekleminin yüzeyine Sülfür-35 beta kaynağı yerleştirilmiştir [13].

“Ragone plot comparison of radioisotope cells and the direct sodium borohydride/hydrogen peroxide fuel cell with chemical batteries” adlı makale çalışmasında, radyoizotop hücrelerinin ve Sodyum Borhidrid/hidrojen peroksit yakıt hücreleri (FC) ile klasik kimyasal pillerin teorik ve deneysel veriler kullanılarak karşılaştırması yapılmıştır. Sonuçta, RC'lerin yüksek spesifik enerjiye

sahip olmasına rağmen, daha düşük bir spesifik güce sahip oldukları bulunmuştur. FC'lerin ise her iki parametre için de daha yüksek bir aralığa sahip olduğu gözlenmiştir. Bu sebeple RC'lerin, elektronik iletişimde, diğer bataryaların sürekli olarak şarj edilmesinde ve uzun ömürlü- periyodik darbeleri düşük güç kaynağına ihtiyaç duyan uygulamalarda daha uygun oldukları gözlenmiştir [14].

“Determination of The Electron-Hole Pair Creation Energy In $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ ” adlı makale çalışmasında, ^{55}Fe and ^{109}Cd kaynaklarından yayınlanan karakteristik X-ışınından faydalanarak deneysel olarak, $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ birleşik yarı iletkeni üzerinde elektron-boşluk çifti oluşması için gereken enerji ölçülmüştür. Gereken enerji, $5.1 \text{ eV} \pm 0.08 \text{ eV}$ olarak bulunmuştur [15].

“Investigation of a Energy Conversion Silicon Chip Based On ^{63}Ni Radio-Voltaic Effect” adlı makale çalışmasında, radyoizotop pillerin enerji dönüşüm verimi üzerine teorik ve deneysel bir çalışma yapılmıştır. Ayrıca radyasyondan kaynaklı olarak silikon wafer'ların yapısında oluşan kusurlar incelenmiştir. Elde edilen sonuç ile, i tabakasının katkılama yoğunluğu $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ olan p-i-n aygıtının elektriksel özellikleri ölçülerek de bu radyasyon hasarı doğrulanmıştır. Kaynak olarak Ni-63 kullanan araştırmacılar, üç boyutlu p-i-n yapısının benimsenmesi, tüketim bölgesinde depolanan enerji oranının artırılması ve kaçak akımın pA düzeyinde tutulması halinde, enerji dönüşüm verimliliğinin önemli ölçüde artırılabilirdiği sonucuna varmışlardır [16].

“Design And Simulation of GaN Based Schottky Betavoltaic Nuclear Micro-Battery” adlı makale çalışmasında, Ni-63 kaynağı kullanan ve Ni/Au filmle kaplanmış Schottky bariyerinden oluşan GaN tabanlı nükleer mikro pilin teorik analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, $8 \mu\text{m}$ kalınlığındaki Schottky bariyerinin, %95 oranında beta parçacıklarının enerjisini toplayabildiğini göstermektedir [17].

2009 yılında ABD SonicMEMS laboratuvarında yapılan “Ultra-High Efficiency High Power Density Thinned-down Silicon Carbide Betavoltaics” adlı çalışmada, ilk olarak bir kenarı Ni-63 radyoaktif madde kaplanmış ve $50 \mu\text{m}$ 'ye kadar inceltirilmiş olan 11.2% verimli SiC betavoltaik pili incelenmiştir. Ayrıca elektron yayılımı radyasyonu kullanılarak, cihaz kalınlığı $30 \mu\text{m}$ 'nin altında olduğu

durumda bile verimliliğin, % 23.6 'ya kadar çıkabildiği gösterilmiştir. Geliştirilen düzlemsel silikon betavoltaik pil, şimdiye kadar geliştirilen benzer geometriye sahip betavoltaik pillerden 100 kat daha yüksek bir güç yoğunluğuna sahiptir [18].

“A Radioisotope-Powered Surface Acoustic Wave Transponder” adlı makale çalışmasında, bir çeşit frekans iletim aygıtı olan puls transponderi geliştirilmiş ve çalışması için gerekli gücü, Ni-63 tabanlı kantileverden oluşan sistemin osilasyon hareketinden ürettiği enerjiden karşılayan bir mekanizma geliştirilmiştir. Dar bant aralığı ile çalışan puls transponderi, uzun mesafeli RF bağlantısı için imkân sağlar. Puls transponderi, tekrar değiştirilmesi zor veya imkânsız olan çelik ve beton gibi yapıların içine gömülebilir. Çalışmada 1.5 mCi Ni-63 kaynağı ile 800 μ W puls elde edilmiştir [19].

“Optimization Design Of GaN Betavoltaic Microbattery” adlı makale çalışmasında, radyoizotop mikro-güç bataryalarının, uzun ömürlü ve küçük hacimli olmalarına rağmen sahip oldukları yüksek enerji yoğunluğu sebebiyle, ileri teknolojik alanlarda oldukça önem kazandıklarından bahsedilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada geniş bant aralığına sahip olan GaN yarı iletkeni ve Pm-147 beta kaynağı kullanılarak betavoltaik pil geliştirilmiştir. Pil veriminin maksimum olması için optimum Pm-147 ve GaN kalınlığı tespit edilmiştir. Ayrıca GaN'ın optimum tüketim bölgesi ile eklem kalınlıkları bulunmuştur. Geliştirilen pilin kısa devre akım yoğunluğu; 1.636 μ A/cm², açık devre voltajı; 3.16 V, verimi; 13.4% bulunmuştur [20].

“Principles of Betavoltaic Battery Design” adlı makale çalışmasında, günümüz nanoteknolojisinde oldukça önem kazanan betavoltaik pillerden maksimum verim elde edilmesi için, kaplanan radyoaktif kaynak kalınlığı ile beraber yarı iletken katkılama yoğunluğunun, difüzyon uzunluğunun, yüzey geometrisinin ve yarı iletken eklem kalınlığının oldukça önemli olduğu teorik ve deneysel olarak gösterilmiştir. Yarı iletken olarak SiC kullanılmıştır [21].

“Advances In Betavoltaic Power Sources” adlı makale çalışmasında, düşük güçlü-uzun ömürlü betavoltaik nükleer pillerin uzaktan kontrollü sistemler, biyomedikal

cihazlar, ulaşılması zor olan gözetimsiz sensörler, MEMS ve askeri uygulamalar gibi birçok potansiyel kullanım alanlarından bahsedilmiştir. Yapılan araştırmada, yüksek verimli betavoltaik pil geliştirilmesinde, Ni-63 ve H-3 beta kaynakları ile GaN ve SiC yarı iletken p-i-n eklemlerinin seçilmesinin daha uygun olacağından bahsedilmiştir. Ayrıca ticari olarak geliştirilen nano-trityum pillerin incelemesi yapılmıştır [22].

“Analytical Study of ^{90}Sr Betavoltaic Nuclear Battery Performance Based on p-n Junction Silicon” adlı makale çalışmasında, Sr-90 tabanlı betavoltaik pillerin maksimum güç ve radyasyon-elektrik enerjisi dönüştürme verimleri analitik olarak incelenmiştir. Ayrıca Sr-90 nükleer pillerin Ni-63 tabanlı pillere göre performans karşılaştırması yapılmıştır. Yapılan teorik hesaplamalara göre Sr-90 tabanlı nükleer pillerin, Ni-63 tabanlı nükleer pillere göre daha yüksek güç yoğunluğuna sahip olmasına karşın, daha düşük verime sahip olduğu bulunmuştur. Ayrıca Sr-90 kaynağından çıkan beta parçacıklarının enerjileri, Ni-63 kaynağına göre çok daha yüksek olduğundan dolayı, Sr-90 tabanlı pillerde yüksek verim elde edebilmek için çok daha kalın yarı iletken tabaka üretilmesi gerektiği belirlenmiştir [23].

“Demonstration of Pm-147 GaN betavoltaic cells” adlı makale çalışmasında, iki farklı GaN p-i-n yarı iletken tabanlı diyot üretilmiş ve bu aygıtlar Pm-147 ve Ni-63 radyoaktif kaynakları ile test edilmiştir. Sonuçta, Pm-147 kaynağı kullanılarak geliştirilen nükleer pilin, GaN yarı iletken tabaka kalınlığına bağlı olarak çok daha iyi elektriksel performans değerlerine sahip olduğu görülmüştür [24].

“Design and optimization of beta-cell temperature sensor based on $^{63}\text{Ni-Si}$ ” adlı makale çalışmasında, Ni-63 tabanlı ve silikon yarı iletkeni kullanılarak geliştirilen betavoltaik nükleer pil sıcaklık sensörü olarak kullanılmıştır [25]. Ayrıca MCNP Monte-Carlo kodu kullanılarak silikon malzemede elektron-deşik çifti (EHP) üretim hızı hesaplanmıştır. Yarı iletken katkılama yoğunluğu gibi yapısal özelliklerin, pilin verimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Farklı sıcaklıklarda, radyoaktif ince film kalınlığı ve aktivitesinin, nükleer pilin açık devre voltajını (V_{oc}) nasıl etkilediği araştırılmıştır.

“Development of nuclear micro-battery with solid tritium source” adlı makale çalışmasında, üç boyutlu silikon p-n eklemi üretilmiş, radyoaktif kaynak olarak ise titanium tritide kullanılmıştır. Titanium tritide radyoaktif kaynağı, nano-parçacıklar halinde silikon yarı iletkeni içerisine absorbe edilmiştir. Bu şekilde, radyoaktif kaynaktan ve 4π geometride yayınlanan beta parçacıklarının tamamından faydalanılmış ve yüksek verimli betavoltaik pil tasarımı yapılmıştır [26].

“Fabrication of SiC p-i-n betavoltaic cell with ^{63}Ni irradiation source” adlı çalışmada, yüksek verime sahip Ni-63 radyoaktif kaynak ve SiC yarı iletkeni tabanlı nükleer pil geliştirilmiştir. Geliştirilen pil, 0.98 V açık devre voltajına, 8.0 nW/cm² güç yoğunluğuna ve %74 dolum faktörüne sahiptir [27].

“GaN betavoltaic energy converters” adlı makale çalışmasında, Ni-63 beta kaynağı ve GaN yarı iletken tabanlı betavoltaik pillerin tasarımı ve verim hesaplamaları üzerine çalışılmıştır. Ayrıca GaN yarı iletkeninin radyasyon dayanıklılığı incelenmiştir [28].

“Radioisotope Micropower for Semi-Active RFID” adlı makale çalışmasında, 1.5 mCi aktiviteli Ni-63 tabanlı RFID sinyal alıcı-verici devresi (transponder) geliştirilmiş ve bu devre, iletim frekans seçici olarak kullanılmıştır. Nükleer pilin elektriğe dönüştürme verimi %0.06 olmasına rağmen, cihazdan 5mW güç ve 100MHz frekans elde edilmiştir. 3 dakikada bir sinyal veren cihaz, yıllarca kendiliğinden (otonom) olarak çalışma özelliğine sahiptir [29].

1.2 Tezin Amacı

Bilindiği gibi teknolojik gelişmelerin önündeki en büyük engel enerjinin depolanması problemidir. Nükleer piller göreceli olarak düşük güç üretmesine rağmen, nükleer pil ile kilogram başına binlerce watt-saat’lik enerji yoğunluğu elde edilebilir ki bu da en iyi kimyasal pilden çok daha fazladır. Nükleer piller, aynı boyutlardaki hidrojen yakıtlı pillerden yaklaşık 10 kat, kimyasal pillerden ise 1000 kat yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir [30]. Kimyasal pillerin boyutları küçüldükçe, depoladığı enerji miktarı üstel olarak azalmakta ve elektronik

cihazlar için uzun süre gerekli gücü sağlayamamaktadır. Radyoizotop kaynaklı nükleer piller ise, ultra ince film şeklinde kaplandıktan sonra mikro elektromekanik sistemler için (MEMS) gerekli uzun dönemli gücü sağlayabilirler [31]. Yıllarca süren araştırmalarda kullanılan uzay istasyonlarında, denizaltı araştırmalarında, periyodik olarak ulaşılması zor olan uzak mesafelerde ve zorlu ortam koşullarında uzun ömürlü güç kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyacı karşılayabilecek tek çözüm nükleer pillerdir çünkü farklı tipteki nükleer piller, kimyasal pillerle karşılaştırıldığında, yüksek basınç, toz, nem, radyasyon alanları gibi uygun olmayan çevre koşullarında da çalışabilmektedirler.

Günümüzde düşük güç gerektiren nano-teknolojik cihazlar yaygın hale geldiğinden dolayı, nükleer pil teknolojisi çok daha önem kazanmıştır [32]. Artık nükleer pillerde yakıt olarak kullanılacak beta-radyoaktif izotoplar makul fiyatlar ile piyasadan temin edilebilmektedir. Diğer yandan kimyasal pillere göre oldukça uzun bir ömre sahip olduklarından dolayı, ticari olarak kullanılmaları da avantajlı hale gelmektedir.

Alfa, beta veya gama radyoaktif kaynakları kullanılarak geliştirilen farklı tip nükleer pil teknolojileri günümüzde, uzay araçları ve denizaltı çalışmalarında, termoelektrik üreticilerde, kalp pilleri ve biyomedikal protez cihazları gibi sağlık uygulamalarında, düşük akım gerektiren mikro-elektromekanik sistemlerde (MEMS), askeri amaçlı olarak üretilen cihazlardaki ultra-düşük güç sensörlerinin çalışmasında, elektronik cihazlarda depolanan hassas verilerin korunmasında ve tüm bu cihazların 25 yıl süre ile zorlu ortam koşullarından etkilenmeyecek şekilde çalışmasında AR-GE'si yapılan oldukça stratejik bir çalışma alanıdır [33], [34]. NASA göndermiş olduğu uzun süreli uzay araçlarında ^{238}Pu tabanlı nükleer pil teknolojisi kullanılmaktadır. Benzer şekilde tıp alanında fizyolojik izleme ve tedavi amaçlı uygulamalarda veya petrol arama ve kimyasal üretim gibi birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır. Bu alanda Trace Photonics Inc. (ABD), MIT (Massachusetts Institute of Technology), Widetronics (ABD), City Labs (ABD), QEnergy (Avustralya), Bellona (Rusya) gibi daha birçok özel ve devlete ait ulusal laboratuvar çalışmaktadır. Bazı ileri nükleer teknoloji firmaları, alfa veya beta kaynaklı olarak çalışabilen prototip akıllı telefonlar geliştirmişlerdir. Ancak ticari

firmaların ve halkın radyoizotop kaynaklı bir teknolojiye hazır olmaması ve betavoltaik pilin fiziksel olarak zarar görmesi durumunda kaynağın açığa çıkması gibi risklerden dolayı, bu tip amaçlı üretimler şimdilik durdurulmuştur. Bu sebeple teknoloji, uzay ve denizaltı araştırmalarında ve çeşitli askeri uzaktan kontrollü algılama sistemlerinde kullanılır hale gelmiştir. Özellikle son 10 yıldır Çin ve ABD başta olmak üzere birçok ülkedeki nükleer araştırma enstitüsü tarafından, beta kaynakları ve bu kaynaklara uygun olarak kullanılabilecek yarı iletken ve dielektrik malzemeler kullanılarak yüksek verimli betavoltaik pillerin geliştirilmesi üzerine çalışılmaktadır.

Ülkemizde, yukarıda bahsedilen ileri teknolojik alanlarda AR-GE çalışması yapılan nükleer pillerin geliştirilmesi ve teknolojiye uygulanması ile ilgili teorik ve deneysel çalışma henüz bulunmamaktadır. Mikro ve nano teknolojilerdeki kullanım potansiyeli göz önüne alındığında, ülkemizdeki üniversitelerin malzeme araştırma laboratuvarları ve AR-GE merkezleri tarafından bu teknolojinin geliştirilip, ülke teknolojisine kazandırılması oldukça faydalı olacaktır. Yapılan tez çalışmasının amacı, yukarıda bahsedilen birçok alanda AR-GE çalışması yapılan nükleer pillerin, teorik ve deneysel olarak incelenmesi ve örnek nükleer pil prototipleri geliştirilmesidir. Bu amaçla Türkiye Atom Enerjisi Kurumu bünyesinde Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarı kurulmuş ve nükleer pil karakterizasyon ölçümleri için gerekli cihaz, ekipman ve vakum sistemi temin edilmiştir. Ayrıca gerekli ölçüm otomasyon yazılımı geliştirilmiş ve bilgisayar simülasyonları yapılmıştır. Yapılan birçok deneme ve ölçümlerin sonucunda, Ni-63 radyoaktif kaynak ve GaN yarıiletken tabanlı betavoltaik nükleer pil prototipi geliştirilmiştir. Ayrıca, Sr-90, H-3, Pm-147 ve Ni-63 gibi farklı β enerjisine sahip radyasyon kaynaklarının SiC, GaN, $Al_{0.7}Ga_{0.3}N$ gibi farklı bant genişliğine sahip yarı iletken filmler ile kaplanarak çıkış enerji ve güç yoğunluğunun ölçülmesi ve iyileştirilmesi konusunda oldukça ayrıntılı literatür incelemesi yapılmıştır. Literatür araştırması doğrultusunda, farklı kalınlık ve aktivitelerde radyoaktif kaynaklar kullanılarak ve yarı iletken malzemelerin kalınlıkları optimize edilerek, prototip nükleer pilden maksimum çıkış gücü elde edilmeye çalışılmıştır.

Yapılan araştırmanın diğer bir amacı, kullanılan radyoaktif kaynaktan dolayı betavoltaik nükleer pilin ana yapısını oluşturan yarı iletken malzemede meydana gelen radyasyon hasarının incelenmesidir. Çünkü nükleer pil teknolojisinin geliştirilmesi konusunda aşılması gereken engellerden biri, radyasyonun, pilin verimi ve ömrü üzerinde meydana getirdiği olumsuz etkilerin azaltılmasıdır. Bu amaçla uygun enerji bant aralığına sahip yarı iletken malzeme seçilmesi ve bu malzemelerin karakteristik özelliklerinin çıkartılması gibi aşamalar için literatür araştırması yapılmıştır.

Tezin ikinci kısmında ise diğer bir nükleer pil türü olan “Doğrudan Şarjlı Nükleer Pil” sisteminin teorik ve deneysel olarak çalışılması hedeflenmiştir. Bu amaçla yarı iletken malzeme kullanılmadan, vakum hücresinin içerisine yerleştirilen metal kollektörlerin karşısına beta radyoaktif kaynaklar konularak prototip-primitif bir doğrudan şarjlı nükleer pil devresi geliştirilmiş ve verim hesaplamaları yapılmıştır.

1.3 Bulgular

Günümüzde askeri teknolojiler, biyoteknoloji, bilişim teknolojileri, sağlık uygulamaları gibi birçok teknolojik alanda kullanılır hale gelen mikro ve nano elektromekanik sistemler (MEMS-NEMS) için, küçük boyutlu ve uzun yıllar boyunca bitmeyecek güç kaynaklarına gereksinim artmıştır. Kimyasal pillerin boyutları küçüldükçe ürettiği güç ve verim üstel olarak düşmektedir [35]. Alternatif bir enerji kaynağı olarak, ince film şeklinde veya nano boyutlarda tasarımlanabilen nükleer pillerin, dünyadaki ileri araştırma merkezleri ve enstitülerinde daha da verimli hale getirilmesi amacıyla yapılan araştırmalar son 15 yılda oldukça yoğunlaşmıştır. Bu tez çalışması, ülkemizde betavoltaik ve doğrudan şarjlı nükleer pil tasarımlarının özgün ve çalışan bir prototipinin geliştirilmesi konusunda ilk olma özelliği taşımaktadır. Ayrıca çalışma neticesinde elde edilen teorik bilgiler ve deneysel veriler, gelecekte bu alanda yapılacak araştırmalara iyi bir referans olacaktır. Nükleer pilin verimi, tasarımlanan geometriye, kullanılan yarı iletken/dielektrik malzemelerin özelliklerine, katkılama yoğunluğuna ve radyoaktif kaynağın spesifik beta enerjisine göre oldukça farklılık gösterdiğinden dolayı bu alanda yapılan her deneysel araştırma

özgün değere sahiptir. Diğer yandan yapılan deneysel araştırmanın çıktıları, ülkemizin bu ileri teknolojik alana girmesine ciddi bir başlangıç ve referans olacaktır.

RADYASYONUN MADDEYLE ETKİLEŞMESİ

Radyoaktivite, kararsız izotop atomların bir özelliğidir. Bu kararsız atomlar kararlı hale geçebilmek için bir dış etki olmaksızın, kendiliğinden yüklü parçacık veya elektromanyetik radyasyon yayınlar ve bu yayının sonucunda diğer izotopların atomlarına dönüşürler. Radyoaktivite olarak adlandırılan bu dönüşüm sırasında enerji yayınlanır. Elektromanyetik dalga ya da parçacık formunda yayınlanan bu enerji, radyasyon enerjisidir [36]. Doğal radyoaktivite, 1896'da ünlü İngiliz fizikçi Becquerel tarafından uranyum tuzlarının çalışılması sırasında keşfedildi. Bu keşif, radyasyon enerjisi olarak salınan enerjiden teknolojik olarak faydalanma fikirlerini kısa zamanda beraberinde getirdi. İlk olarak 1913 yılında ünlü fizikçi Henry Moseley tarafından, radyoaktif bozunumda salınan enerjinin elektrik enerjisi üretiminde kullanılabileceği şeklinde ilginç bir fikir ortaya atıldı.

Radyoaktif bozunma, kararsız bir atom çekirdeğinin yükü (Z), kütlesi (M) ve enerji durumunda değişikliğe sebep olur. Birden fazla radyoaktif bozunma çeşidi vardır ve bu radyoaktif bozunma türleri, yayılan parçacıkların türüne göre farklılık gösterir. En yaygın bozunma türleri alfa bozunması, beta bozunması, K-elektron yakalama gibi reaksiyonlardır. Başka bozunma türleri de vardır ancak bunlar, radyoaktivitenin pratik uygulamalarında önemli bir rol oynamazlar.

Bir maddenin radyoaktifliği, ilgili radyoizotopa özgüdür ve bu kararsız radyoizotoplar her dönüşümde daha kararlı hale gelirler. Radyoaktif bozunumda açığa çıkan enerji, kız çekirdeğin ve yayınlanan parçacıkların kinetik enerjisine dönüşür. Serbest kalan bu enerji, kız çekirdeğin durgun kütle enerjisi ve yayılan parçacıkların enerjilerinin toplamı ile ana çekirdeğin durgun kütle enerjisi arasındaki farka eşittir. Mevcut enerji, nötron/proton oranı ile ana çekirdek, kız çekirdek ve yayılan parçacık arasındaki kütle-enerji ilişkisine bağlıdır. Radyoaktif bozunma ürünlerinin kinetik enerjisi (radyoaktif bozunma enerjisi) elektrik

enerjisine dönüştürülebilir. Her türlü radyoaktif bozunma, evrensel radyoaktif bozunma yasasına uymaktadır.

Radyasyon, oluşum şekline göre, doğal ve yapay radyasyon olarak iki sınıfa ayrılır. Doğal radyasyon, yer kabuğunda doğal olarak bulunan radyoaktif izotoplardan ve kozmik ışınlardan gelen enerjidir. Yapay radyasyon ise, nükleer reaktörlerde veya hızlandırıcılarda fisyon ve füzyon sonucu radyoaktif hale getirilen radyoizotopların yaydığı enerjidir.

2.1 Radyoaktif Bozunma Yasası

Bir radyoaktif maddenin bozunma hızı, içerdiği radyoaktif çekirdek sayısı (parçalanmamış çekirdek sayısı) ile doğru orantılıdır [37]. Herhangi bir andaki çekirdek sayısını ifade eden N in değişme hızı,

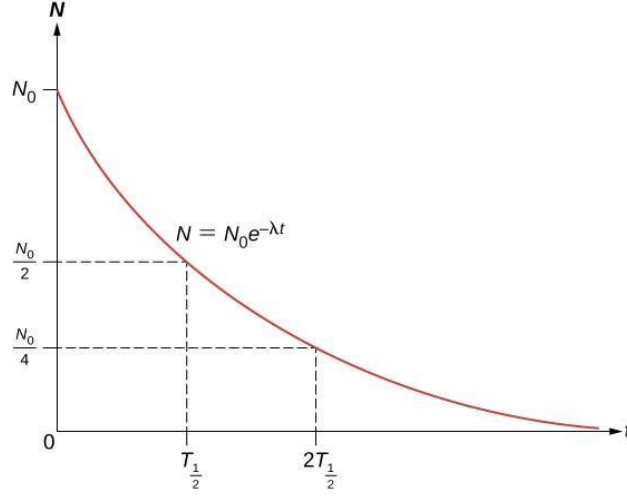
$$\left. \frac{dN}{dt} \right|_{\text{bozunma}} = -\lambda N \quad (2.1)$$

dir. Burada λ , bozunma (veya parçalanma) sabiti olarak bilinen bir sabittir. Birim zamandaki bozunma olasılığını ifade eder. Bozunma sabitinin başındaki eksi işareti, çekirdek sayısı N 'nin zamanla azaldığını göstermektedir. (2.1) denkleminin 0'dan t bozunma zamanına kadar integrasyonu yapıldığında,

$$N = N_0 \exp(-\lambda t) \quad (2.2)$$

elde edilir. Burada N_0 , $t = 0$ anında bozunmamış çekirdek sayısıdır. Denklem (2.1), izole edilmiş radyoaktif bir çekirdeğin kendiliğinden yaptığı radyoaktif bozunmanın istatistiksel bir ifadesidir. Bir radyoaktif izotopun ömrü, radyoaktif atom çekirdeklerinin başlangıçtaki toplam sayısının yarısının bozunmaya uğradığı süre olarak ifade edilmektedir. Bu süre yarı ömür olarak adlandırılır, $T_{1/2}$ ile gösterilir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir [38],

$$T_{1/2} = \ln(2) / \lambda \quad (2.3)$$



Şekil 2.1 Radyoaktif çekirdeklerin bozunma eğrisi

Radyoaktif bir maddenin en önemli özelliği aktivitesi olup, A ile gösterilir. Tanım olarak aktivite, radyoizotopun birim zamanda bozunmaya uğrayan çekirdeklerinin sayısıdır. Diğer bir ifade ile radyoaktif maddenin bozunma hızı olarak da adlandırılır.

$$A = -\left.\frac{dN}{dt}\right|_{\text{bozunma}} = \lambda N \quad (2.4)$$

Uluslararası eski birim sisteminde (SI) aktivite birimi, saniyedeki bozunma sayısı olarak tanımlanan Becquerel (Bq) birimi ile ifade edilir. Yeni birim sisteminde ise Curie (Ci) birimi ile ifade edilir. İki birim arasında,

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq (parçalanma/s)} \quad (2.5)$$

bir faktör ile karakterize edilir. Kararlı olmayan ve kararlı hale gelmek için kendiliğinden bozularak radyasyon yayan izotop, radyoizotop olarak adlandırılır. Her bozunmada radyoizotopun radyoaktifliği azalır ve kararlı yapıya ulaştığında artık radyasyon yaymaz. Bu sebeple radyoaktif kaynakların yaydığı radyasyon miktarı azalır. Yani kararsız atomların çekirdeği daha kararlı olmaya başlar, daha az radyasyon üretir ve maddenin aktivitesi sıfır olana kadar bozunma devam eder.

2.2 Radyoaktif Bozunma Türleri

Birbirinden farklı radyoaktif bozunma biçimleri vardır ve her bir radyasyon türünün madde ile etkileşimi diğerinden farklıdır [39].

2.2.1 Alfa Bozunması (α)

Nötron/proton oranı çok düşük olan kararsız bir atom çekirdeğinden, iki proton ve iki nötrondan oluşan yüksek enerjili bir helyum (^4He) çekirdeğinin yayımlanması olayı alfa (α) radyasyonu olarak bilinir. Atom numarası ve kütle numarası korunduğu için alfa yayımlanması sonrasında, ana çekirdek kendisinden 2 atom numarası ve 4 kütle numarası daha düşük bir kız çekirdek doğurur.



Alfa bozunması, büyük atomik sayılara sahip doğal ve yapay radyoaktif izotopların karakteristik bir özelliğidir [40]. Genellikle kütle numarası ağır olan kararsız çekirdekler kararlı hale gelmek için alfa parçacığı yayarlar. Radyoaktif çekirdeğin bozunması sonucu ortaya çıkan alfa parçacıkları (α) aynı enerjili olabileceği gibi farklı enerjilere de sahip olabilirler. Eğer bir radyoizotop farklı enerjilere sahip α parçacığı yayarsa, enerji korunum yasası gereği beraberinde gama (γ) fotonu yayımlar, çünkü α bozunması sonucu oluşan çekirdekler farklı enerji durumlarında bulunabilirler. Yani çekirdeğin taban duruma dönmesi için alfa (α) bozunmasını bir gama (γ) bozunumu takip eder [41]. Çekirdeğin alfa bozunmasında, α parçacığının enerjisi 4 ile 9 MeV arasında değişir. Eş zamanlı yayımlanan gama fotonunun enerjisi genellikle 0.5 MeV'i aşamaz. Yani alfa bozunmalarındaki enerjinin ağırlıklı olarak büyük çoğunluğunu α parçacıkları taşır. Ortaya çıkan enerjinin sadece %2'si, kız çekirdeğin kinetik geri tepme enerjisine dönüşür.

2.2.2 Beta ve Pozitron Bozunması (β^- , β^+)

Beta radyasyonu, bir atomun çekirdeğindeki enerji fazlalığının atılmasıyla ortaya çıkan, genellikle negatif yüklü, çok hızlı elektronların oluşturduğu radyasyon çeşididir [42]. Çekirdekteki fazla enerji, bir kütle oluşturur ve bu kütle, fazla yükü alarak dışarıya beta (β^-) ışını olarak yayınlanır. Beta bozunması esas olarak,

çekirdekdeki bir nötronun protona bozunması olayıdır. Bir radyoaktif çekirdeğin beta (β^-) bozunmasında salınan enerji, 0.018 MeV (^3H) ile 16.4 MeV (^{12}N) arasında değişir.

Beta bozunması, büyük atomik sayılara sahip doğal ve yapay radyoaktif izotopların karakteristik bir özelliğidir. Enerji korunum yasası gereği, beta (β^-) bozunmasında, elektron salınımına bir antinötrino ($\bar{\nu}$) salınımı eşlik eder. Yayınlanan iki parçacığın bozunma enerjisinin rastgele dağılımı nedeniyle, beta parçacıklarının enerji spektrumu sürekli ve sıfırdan beta parçacığının enerjisinin maksimum olduğu noktaya kadar uzanır. Bu bozunumun en tipik örneklerinden biri, 12.34 yıl yarı ömre sahip olan trityumun (^3H) beta bozunmasıdır,



Pozitron bozunumu (β^+) ise sadece yapay radyonüklidlerin karakteristiğidir ve çekirdekdeki protonlardan biri pozitron ve nötrino yayınlarak nötrona dönüşür. Beta enerji spektrumuna benzer şekilde, pozitronların enerji spektrumu da sürekli. Pozitron (β^+) çekirdekten yayımlandıktan sonra bir elektron (β^-) ile birleşir, bunun sonucunda enerji ve momentum korunumu gereği 2 adet gama fotonu yayınlanır. Pozitron bozunumuna örnek olarak sodyum (^{22}Na) verilebilir.



2.2.3 Gama Yayınlanması (γ)

Radyoaktif bozunma yapmış bir çekirdek genellikle uyarılmış enerji durumunda kalır. Bu durumda olan çekirdek fazla enerjiyi gama fotonu yayınlarak dışarı atar ve taban enerji durumuna geri döner. Yukarıda bahsedilen alfa ve beta bozunumlarını genelde bir gama yayınlaması takip eder.

2.2.4 K-Elektron Yakalama (K^-)

K-elektron yakalama, radyoizotopun elektronik kabukları tarafından dış bir elektronun yakalanmasıdır. En olası yakalama, en dış kabuk olan K kabuğundan

elektron yakalanmasıdır ancak L ve M kabuklarından da elektron yakalanması olasılığı vardır. Elektron yakalama olayı sonrasında en dış kabukta elektron boşluğu oluştuğundan dolayı, diğer bir dış kabuktan bu kabuğu doldurmak için elektron geçişi olur ve bu sırada X ışını yayınlanır. Ancak bazı durumlarda X ışını yayınlanmaz. Bunun yerine çekirdekten daha uzak bir kabuktan elektron yayınlanması olur, bu elektronlara Auger elektronları denir. Auger elektronunun kinetik enerjisi, yakalanan elektronun bağlanma enerjisi ile yayılan elektron arasındaki farka eşittir. K-elektron yakalama ile bozunan radyoizotoplara ^7Be örnek verilebilir,



2.3 Alfa Parçacıklarının Madde ile Etkileşimi

Alfa parçacıkları bir maddeden geçerken, o maddenin elektronları ile elastik ve inelastik, çekirdeğiyle ise genelde elastik saçılma yaparak enerjilerini kaybederler. Alfa parçacıklarının madde içine girdiğinde uğradıkları enerji kaybının sebebi, maddenin elektronlarıyla yaptıkları elastik olmayan Coulomb etkileşimidir. Bu etkileşme sonucunda maddenin atomları uyarılmış duruma geçerler veya iyonize olurlar. Atomun iyonlaşmasına neden olan her alfa parçacığının elastik olmayan saçılması durumunda, en az bir veya birkaç elektron uyarılır ve yer değiştirir. Uyarılan bu birincil elektronlar eğer atomun iyonizasyon potansiyelini aşan bir enerji düzeyine sahipse, bunlardan bir kısmı ikincil iyonizasyona (sekonder elektronlara) neden olurlar [43]. Alfa parçacıkları, çarpıştıkları ortamdaki parçacıkların ortalama termal hareket enerjisi ile karşılaştırılabilir hale gelene kadar enerjilerini kademeli olarak kaybederler. Ancak alfa parçacıklarının atomun çekirdeğinden saçılması ve bundan dolayı enerji kaybına uğrama olasılığı oldukça düşüktür, çünkü atom çapına göre çekirdeğin çapı oldukça düşüktür. Bu sebeple alfa parçacıkları madde ile çarpıştığında ilk olarak çekirdeği değil atomu görürler. Madde içinde yol alan alfa parçacığının kat ettiği mesafe, başlangıç enerjisi olan E_0 'a bağlıdır. Örneğin ^{226}Ra 'dan yayınlanan alfa parçacıklarının enerjisi, $E_0 = 4.78$ MeV 'dir. Salınan alfa parçacığının havadaki menzili ortalama 3 cm, sudaki menzili ise yaklaşık $33 \mu\text{m}$ 'dir [44].

2.4 Beta Parçacıklarının Madde ile Etkileşimi

Beta veya hızlandırıcıdan gönderilen tek (mono) enerjili hızlandırılmış elektronlar, ışınlanan maddenin atomlarıyla, elastik ve inelastik saçılmalar yaparak kinetik enerjilerini kaybederler [45]. Benzer şekilde, yüksek kinetik enerjiye sahip elektronlar bir çekirdeğin Coulomb alanından geçerken, bu etkileşim nedeniyle yavaşlarlar ve oluşan ivme sonucunda Bremsstrahlung X-ışını yayarak enerjilerinin bir kısmını kaybederler. Elektronlar madde ile etkileştiklerinde, momentumlarında büyük bir değişiklik olur, bu da elektronun başlangıçtaki hareket yönünden önemli sapmalara yol açar. Örneğin, 100 keV'den daha az kinetik enerjiye sahip bir elektronun madde içindeki hareketi kaotiktir ve madde içine girdiği andan itibaren, başlangıç yönüne göre doğrusal hareket değil difüzyon hareketi yapar. Elektronun toplam kinetik enerji kaybı, iyonlaşma ve radyasyon kayıplarının toplamıdır,

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right) = \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{iyon} + \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{Rad} \quad (2.10)$$

Relativistik olmayan elektronlar için ($v/c \ll 1$) iyonizasyondan kaynaklı kinetik enerji kaybı aşağıdaki formülle ifade edilebilir,

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{iyon} = \frac{4\pi q^4}{m_e v^2} ZN \left[\ln \frac{m_e v^2}{2J} + 1.2329 \right] \quad (2.11)$$

Burada q elektronun yükü, m_e durgun kütlesi, N ise 1 cm^3 malzemedeki atom sayısıdır. Z elementin atom numarası, J malzemenin ortalama iyonizasyon potansiyelidir. Formülde görüldüğü gibi, malzemedeki atom sayısı artarsa yani malzeme ne kadar yoğunsa elektronların uğradığı kinetik enerji kaybı artmaktadır. Bu formül, sonraki bölümlerde anlatılacağı gibi, betavoltaik nükleer pillerdeki radyoaktif kaynaktan salınan beta parçacıklarının enerji kaybını hesaplamakta kullanılır. Radyasyondan kaynaklı iyonizasyon kaybı aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{Rad} \sim Z^2 NE \quad (2.12)$$

Yukarıdaki formül atom çekirdeğinin Coulomb alanının, elektron yükü ile yani Z ile doğru orantılı, ivmenin ise kütle ile ters orantılı ($N=N_A d/M$) olmasından dolayı yaklaşık olarak belirlenmiştir. İki enerji kaybını oranladığımızda,

$$\frac{(-dE/dx)_{Rad}}{(-dE/dx)_{ion}} \cong \frac{EZ}{800} \quad (2.13)$$

elde edilir. Denklem (2.13)'ten anlaşıldığı gibi düşük enerjili elektronlar için radyasyondan kaynaklı enerji kaybı, iyonizasyondan kaynaklı enerji kaybına göre oldukça düşüktür ve ihmal edilebilir. Betavoltaik nükleer pillerde kullanılan radyoaktif kaynakların beta enerjilerinin tamamı keV mertebesinde olduğu için, hesaplamalarda iyonizasyondan kaynaklı enerji kaybını gözönüne almak yeterlidir. Beta parçacıklarının malzeme içinde aldığı yolun uzunluğunu bulmak için, 0'dan E_0 başlangıç enerjisine kadar toplam enerji kaybının integralini almak gerekmektedir.

$$R' = \int_0^{E_0} \frac{dE}{dE/dx} \quad (2.14)$$

dE/dx lineer enerji transferi olarak tanımlanır. Beta parçacıklarının madde içerisindeki maksimum penetrasyon derinliği (R'), enerjinin bir fonksiyonudur ve Katz-Penfold yarı deneysel formülü ile hesaplanabilir [46], [47].

$$R_{max} = \begin{cases} \frac{0.412}{\rho} E_{\beta}^{1.265-0.0954 \ln(E_{\beta})}, & 0.01 \leq E_{\beta} \leq 2.5 \text{ MeV} \\ (0.530 E_{\beta} - 0.106)/\rho, & E_{\beta} \geq 2.5 \text{ MeV} \end{cases} \quad (2.15)$$

$$n_{\beta} = n_{\beta}^0 \exp(-\mu_m \cdot r); \mu_m = 15.5 E_{max}^{-1.41} \quad (2.16)$$

2.5 Gama ve X-Işınlарının Madde ile Etkileşimi

Yüksek enerjili elektromanyetik dalgaların madde ile etkileşmesi, yüklü parçacıkların etkileşiminden oldukça farklıdır. İlk olarak, yüksek enerjili bir gama fotonun durgun kütlesi sıfırdır ve ışık hızında hareket eder. Ayrıca elektromanyetik dalgalar yüksüzdür, bu nedenle Coulomb kuvvetinden

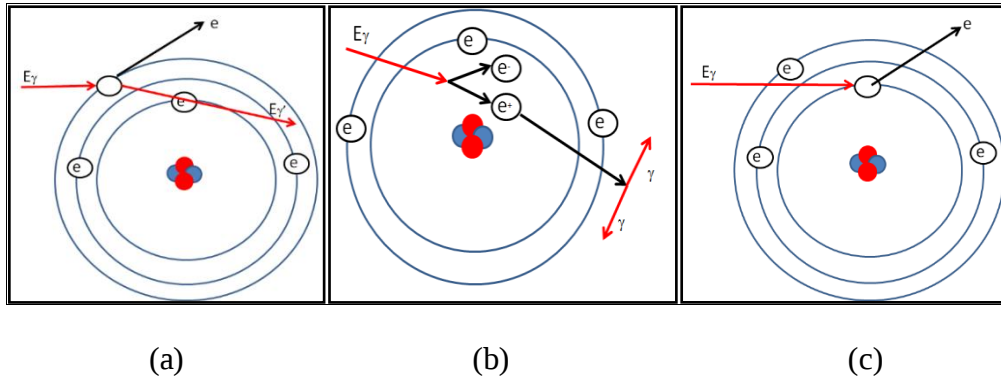
etkilenmezler. Fotonların, maddenin atomları ile etkileşme olasılığı, elektronlara ve alfa parçacıklarına göre oldukça düşüktür. Bu nedenle X-ışını ve gamma fotonları maddeye parçacıklardan daha fazla nüfuz eder.

Kalınlığı D_L olan bir malzemeden geçen gama veya x-ışını fotonunun akısı olan Φ 'nin değişimi, üstel bir fonksiyonla tanımlanır.

$$\varphi(D_L) = \varphi_0 \exp(-\mu D_L) \quad (2.17)$$

Burada μ , X-ışını ve gama fotonlarının girdikleri malzemeye göre lineer azaltma katsayısıdır ve birimi cm^{-1} 'dir.

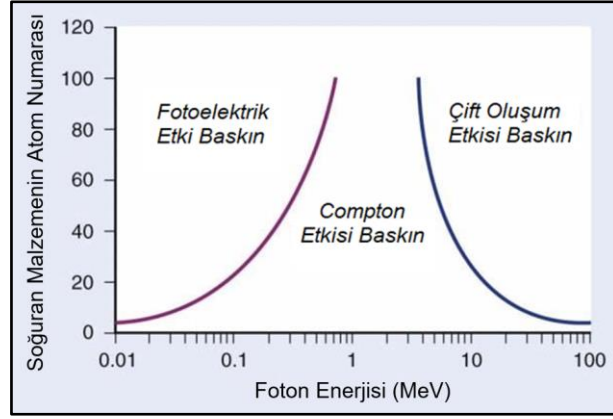
X-ışını ve gama fotonu madde ile farklı şekillerde etkileşebilir. Bu etkileşimler başlıca; fotoelektrik etki, Compton Saçılması (koherent olmayan saçılma) ve elektron-pozitron çifti (EHP) oluşması şeklindedir.



Şekil 2.2 Foton-madde etkileşmesi (a) Fotoelektrik etki, (b) Compton saçılması (koherent olmayan saçılma), (c) Elektron-pozitron çifti oluşumu

Fotoelektrik etki gama fotonunun, atomun enerji kabuklarındaki elektronlardan birine tüm enerjisini aktardığı etkileşim türüdür. Sonuç olarak, enerjiyi alan fotoelektron, gama fotonunun enerji seviyesi ile bu elektronun atomdaki bağlanma enerjisi arasındaki farka eşit bir kinetik enerji ile yayınlanır.

Compton saçılması, gelen gama fotonunun, atomun elektronlarından yaptığı esnek saçılma türüdür. Yüksek enerjili gama fotonu, atom çekirdeğinin Coulomb alanı tarafından tamamen soğurulabilir veya elektron-pozitron çifti oluşturabilir. Ayrıca yüksek enerjili fotonların madde ile etkileşimi sonucunda ikincil elektronlar ortaya çıkar.



Şekil 2.3 Foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak farklı etkileşim türlerinin baskın olduğu bölgeler

Yukarıdaki grafikte görüldüğü gibi, MeV basamağındaki enerji skalasında, yaklaşık olarak enerjinin ondalık ve yüzdelik kesrinde fotoelektrik ve Compton olayı baskındır. Grafikte hangi etkinin hangi foton enerjisinde daha baskın olduğu gösterilmiştir [48].

2.6 Doz ve Doz Hızı

Bir maddeye iyonlaştırıcı radyasyon yoluyla aktarılan enerji, madde tarafından absorbe edilen radyasyon dozu cinsinden ifade edilir. Madde tarafından absorbe edilen doz (enerji) D_{abs} , yüklü parçacık veya fotonların enerjisinin, maddenin birim kütlesine oranı olarak tanımlanır,

$$D_{abs} = \frac{E}{m} \quad (2.18)$$

Denklemin boyut analizinden anlaşılacağı gibi, absorbe edilen radyasyon doz birimi, J/kg 'dır ve SI birim sisteminde birimi Gray (Gy) olarak adlandırılır. Eski birimi Rad'dır. $1 \text{ rad} = 0.01 \text{ Gy}$ olarak tanımlanır. Doz hızı, birim zamanda absorbe edilen dozdur.

$$P_D = \frac{D_{abs}}{t} \quad (2.19)$$

olarak tanımlanır. Doz hızı birimi (Gy/s = W/kg)'dır.

RADYOAKTİF ENERJİDEN ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİMİNİN TEMEL İLKELERİ

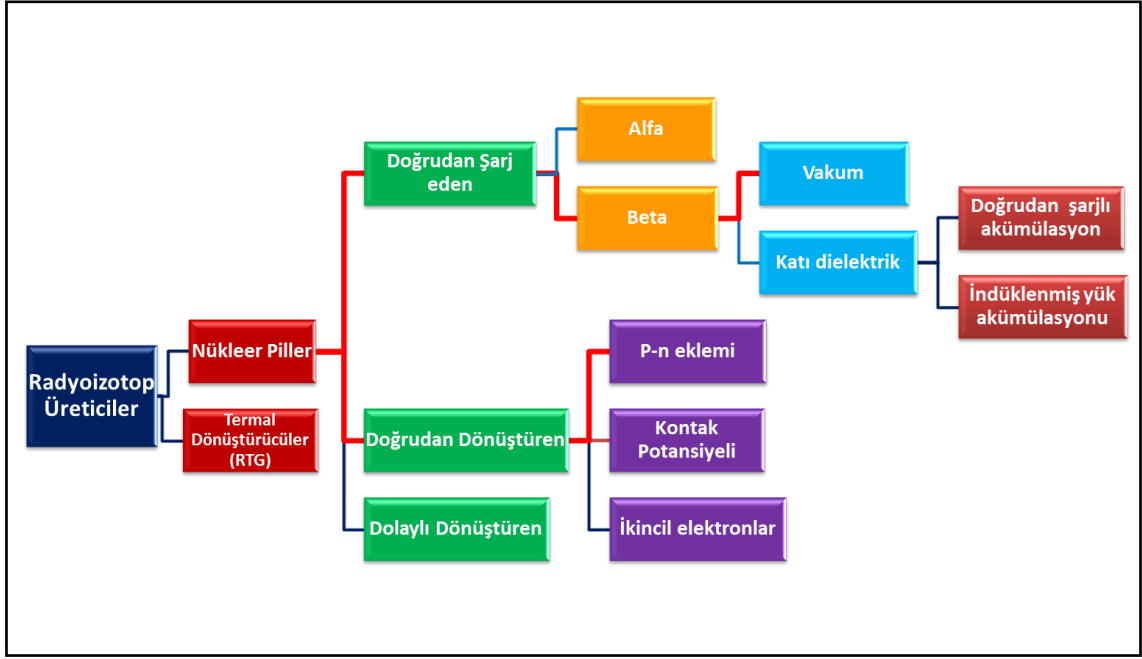
Radyoaktif bozunma enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi amacıyla, çalışma prensibi birbirinden farklı birçok metod geliştirilmiştir. Uygulanan bu metodlarda, temel fizik yasaları kullanılarak doğrudan veya dolaylı olarak radyasyon enerjisi kullanılabilir elektrik enerjisine çevrilir. Bu yöntemlerin bir kısmı temel termodinamik dönüşüm yasalarını içerirken, diğer kısmı foton-madde etkileşimini veya parçacık-madde etkileşimlerini içerir.

3.1 Radyoizotop Üreteçlerin Sınıflandırılması

Radyoizotop elektrik üreteçleri, radyoaktif bozunma enerjisini, kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürme prensibine göre iki ana sınıfa ayrılabilirler. Bunlardan birincisi, Radyoaktif Termal Jeneratörler (RTG), ikincisi ise nükleer piller gibi termal olmayan dönüştürücülerdir.

RTG'ler, radyoaktif bozunumda oluşan parçacıkların kinetik enerjisinin termal enerjiye dönüştürülmesi, daha sonra termal enerjinin de elektrik enerjisine dönüştürülmesi esasına dayanır. RTG'lerin bazı modellerinde bu süreç, elektromanyetik radyasyonun doğrudan veya dolaylı olarak termal enerjiye ve elektrik enerjisine dönüştürülmesi esasına dayanır.

Nükleer piller, çalışma prensiplerine göre kendi içerisinde farklı birçok alt sınıfa ayrılırlar. Bunlardan bazıları, doğrudan-şarjlı (dielektrik ve metal kolektör tabanlı), doğrudan dönüşümlü (yarı iletken tabanlı) veya dolaylı-dönüşümlü nükleer pillerdir (E-M dalga ve fosfor tabanlı). Bu nükleer pil modellerinde radyoaktif bozunum enerjisi, termal dönüşüm olmadan elektrik enerjisine dönüştürülür [49].



Şekil 3.1 Nükleer pillerin sınıflandırılması

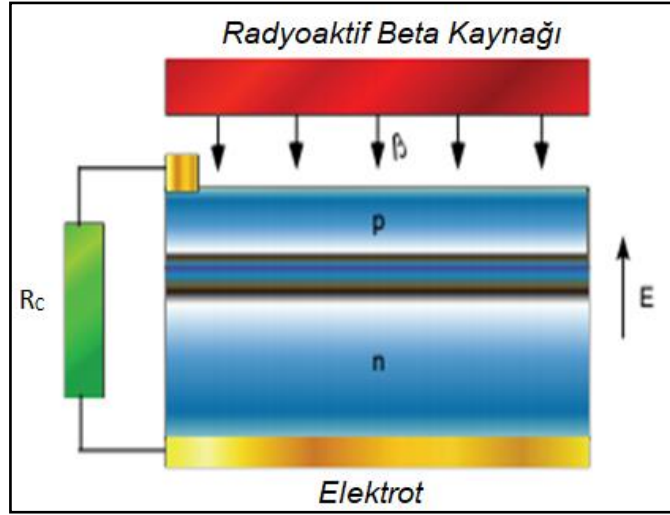
3.2 Doğrudan Dönüştüren Nükleer Piller

Doğrudan dönüştürücü nükleer piller kendi içerisinde; betavoltaik etki, kontak potansiyel farkı ve ışınlanmış bir yüzeyden ikincil elektron emisyonu prensiplerine dayalı olarak üç alt sınıfta incelenebilir.

3.2.1 Betavoltaik Tabanlı Doğrudan Dönüştürücü Nükleer Piller

Farklı iletkenlik türlerine sahip yarı iletken eklemlerin (p – n veya p – i – n eklemleri) beta parçacıkları ile ışınlanarak elektrik üretilmesi prensibine dayalı olarak çalışan betavoltaik nükleer piller, güncel teknolojik uygulamalar açısından oldukça umut vaat etmektedir. Betavoltaik piller, radyoaktif ışınlamaya maruz kalan yarı iletken p – n veya p – i – n eklemlerinin tabakaları arasında oluşan elektron – boşluk çiftlerinin (EHP), tabakalar arasındaki elektrik alan doğrultusunda sürülerek akım üretilmesi esasına dayanır [50]. Işınlama sonucunda n bölgesi negatif, p bölgesi pozitif olarak yüklenir. p – n eklemi üzerindeki potansiyel fark nedeniyle, elektronların bulundukları yerden ayrılarak yük direnci üzerinde oluşturdıkları akım betavoltaik nükleer pil şeması Şekil 3.2’de verilmiştir [51]. Yarı iletken p – n eklemi, içerisine giren yüksek enerjili – az

sayıdaki beta parçacığını, düşük enerjili–çok sayıdaki elektron akımına dönüştürür.



Şekil 3.2 Betavoltaik pilin yapısı

Yarı iletken eklem içerisine giren her bir beta parçacığı, on binlerce elektron – deşik çifti oluşturur. Ancak eklemde oluşan EHP’lerin tümü, eklemdeki bazı kayıplardan dolayı, dış devrede oluşan akıma katkıda bulunmazlar. Verimi etkileyen bu faktörler altıncı bölümde ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Bu kesimde, literatürde çalışılan betavoltaik nükleer pillerden ve elektrik dönüşüm verimlerinden genel olarak bahsedilmiştir.

İyonlaştırıcı beta radyasyon enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinin ilk aşamasını, radyoizotopu taşıyan maddeden yayınlanan beta akısı oluşturur. 6. bölümde bahsedildiği gibi, radyoizotoptan yayımlanan beta parçacıklarından düşük enerjili olanlar, dışarı çıkamadan taşıyıcı madde içerisinde soğurulurlar. Radyoaktif kaynak yüzeyindeki toplam beta enerjisinin, yarı iletkene ulaşan beta akı enerjisine dönüşüm verimliliği η_{β} ile ve bu enerjinin elektrik enerjisine dönüşüm verimliliği $\eta_{\beta-el}$ ile gösterilirse genel olarak verim ifadesi,

$$\eta_d = \eta_{\beta} \eta_{\beta-el} \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Harici bir devredeki akım üretim verimliliği $\eta_{\beta-el}$, ortalama elektrik yükü altında üretilen elektrik gücünün, yarı iletkende absorbe edilen beta

akısının toplam gücüne oranı olarak tanımlanır. Altıncı bölümde anlatılacağı gibi, $\eta_{\beta-el}$ verim faktörünün yarı iletken bant enerji aralığına bağıllığı teorik olarak hesaplanmıştır. Bu bölümde, literatürde ağırlıklı olarak çalışılan yarı iletken malzemelerle elde edilen verim değerlerinden bahsedilmiştir.

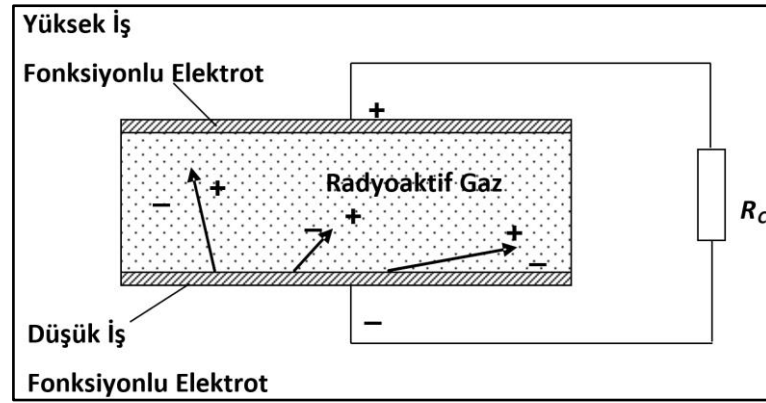
Enerji bant aralığı 1.9 eV olan AlGaAs yarı iletkeninin $\eta_{\beta-el}$ verimi teorik olarak yaklaşık % 20 – 22 ‘ye kadar çıkarılmıştır [52]. Enerji bant aralığı 1.1 eV olan Si için bu verim değeri % 13 - 14 arasındadır. Ancak denklem (3.1)’den görüldüğü gibi, aynı yarı iletkenin farklı beta radyoaktif kaynaklar ile kullanılması verim değerini değiştirmektedir. Bu durumda hangi yarı iletken için hangi radyoaktif kaynağın seçilmesi gerektiği oldukça önem arz eder. Tablo 3.1’de, önceki yıllarda imal edilmiş ve testi yapılmış olan betavoltaik nükleer pillerin karakteristik özellikleri karşılaştırılmıştır. Tablodaki, I_{sc} nükleer pilde oluşan kısa devre akımını, V_{oc} açık devre voltajını ve P pilin gücünü göstermektedir. Tablo 3.1’de verilen verim değerleri, batarya ömrünün başlangıcında hesaplanan değerlerdir. Yarı iletkenin uzun süre yüksek enerjili beta parçacıkları ile ışınlaması sonucunda radyasyon hasarı meydana gelir ve kristalde kusurlar (defects) oluşur Bu da zamanla yarı iletkenin verimliliğini düşürür. Sonuç olarak hem kaynağın radyoaktivitesinin zamanla azalması, hem de yarı iletkende oluşan radyasyon hasarı nedeniyle güç ve verim değerleri düşer. Sonuç olarak, betavoltaik radyasyon hasarı (degradation) iki ana faktörden kaynaklanır. Bunlar radyoaktif kaynağın enerjisi ve yarı iletken malzemenin bağ kuvvetidir [53]. Tablo 3.1’de görüldüğü üzere, Nitrid-III içerikli geniş bant aralığına sahip yarı iletken malzemeler, yüksek radyasyon dayanıklılığına sahiptir. Bu nedenle GaN ve AlGaN yarı iletken tabanlı nükleer piller üzerine yapılan araştırmalar günümüzde daha fazla önem kazanmıştır.

Tablo 3.1 Farklı betavoltaik pil tasarımları ve özellikleri

Betavoltaik Modeli			Karakteristik Parametreler				Ref.
Beta Kaynağı	Aktivite (Ci)	Yarıiletken	I _{sc} (nA)	V _{oc} (V)	P (μW)	Verim (%)	
Sr-90/Y-90	0.05	Si, Ge	4300	0.2	0.8	0.2	[54]
Pm-147	6.3	Si	-	-	<9	0.4	[55]
Pm-147	6.8	Si	62000	0.26	9.1	0.77	
Pm-147	66	Si	112000	4.9	400	1.7	[56]
H-3	0.048 / cm ²	a-Si:H	0.98	0.021	0.29/cm ²	-	[57]
Ni-63	0.001	Si	2.86	0.128	0.032	-	[58]
H-3	Gaz	Gözenekli Si (3D)	18000/Ci	0.016	-	0.22	[59]
Ni-63	0.2 / cm ²	GaN	1100	2.30	-	25.4*	[60]
Ni-63	0.2 / cm ²	Al _{0.7} Ga _{0.3} N	600	4.90	-	27.4*	
P-33	0.23	SiC	565	2.04	0.58	0.56	[61]
Ni-63	0.001	4H SiC	0.042	0.72	-	6	[62]
Kr-85	1.2	SiC	-	1.8	-	0.75-1.15	[63]
H-3	0.1 / cm ²	Al _{0.35} Ga _{0.65} As	40/cm ²	0.75	0.024/cm ²	0.6	[64]
H-3	Gaz	Al _{0.35} Ga _{0.65} As	760/cm ²	0.91	0.55/cm ²	1.2	
Pm-147	0.03	SiC	-	-	0.0003	0.6	[65]
Ni-63	0.01	Si	54	0.082	-	-	[66]
H-3	678 torr	a-Si:H	610/cm ²	0.43	0.129	1.2	[67]

3.2.2 Kontak Potansiyel Farkı Nükleer Piller

İlk kontak potansiyel farkı ile çalışan nükleer piller, 1942'de Kramer tarafından geliştirilmiştir [68]. Bu pil yapısında, radyoaktif gazdan (veya katıdan) gelen yüksek enerjili parçacıklar gaz molekülleriyle çarpışarak ortamda negatif ve pozitif iyonlar oluşturur. Pilde oluşan teorik voltaj, üst ve alt tarafta elektrot olarak kullanılan metallerin iş fonksiyonları arasındaki fark ile belirlenir. Pilin yapısı Şekil 3.3 'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Kontak potansiyel farkı nükleer pillerin çalışma prensibi

Örnek olarak, bir skandiyum-tritid kaynağı üzerindeki CPD hücresi, Liu tarafından 2008 'de tasarlanmıştır. Bu pilde, ScT_2 film ile platin-bakır kolektörlerin iş fonksiyonları arasındaki fark kullanılarak elektrik alan oluşturulmuştur. Kolektörler arasındaki dielektrikte oluşturulan yükün, yük direnci üzerinden hareketi ile akım üretilir. Pilin açık devre gerilimi 0.5 V ve kısa devre akım yoğunluğu $2.67 \text{ nA} / \text{cm}^2$ dir. Bu tür pilin enerji dönüşüm verimi gazda oluşan yüksek enerjili iyon çiftlerinden dolayı (30 eV), %0.5'den daha düşüktür.

3.2.3 İkincil (Sekonder) Elektron Emisyon Pilleri

İkincil (sekonder) emisyon pillerinde, iki elektrot arasına ince bir dielektrik tabaka yerleştirilmiştir. Bu piller, bir dielektrik tabaka ile radyoaktif kaynaktan çıkan yüksek enerjili birincil parçacıkların (beta parçacıkları veya fotonlar) çarpışması sonucu ortaya çıkan ikincil elektronların toplanması esasına dayalı olarak çalışırlar. Pilde oluşan ikincil (sekonder) elektronların sayısı birincil (primer) elektronlardan çok daha fazla olmasına rağmen, enerjileri daha azdır. Örnek

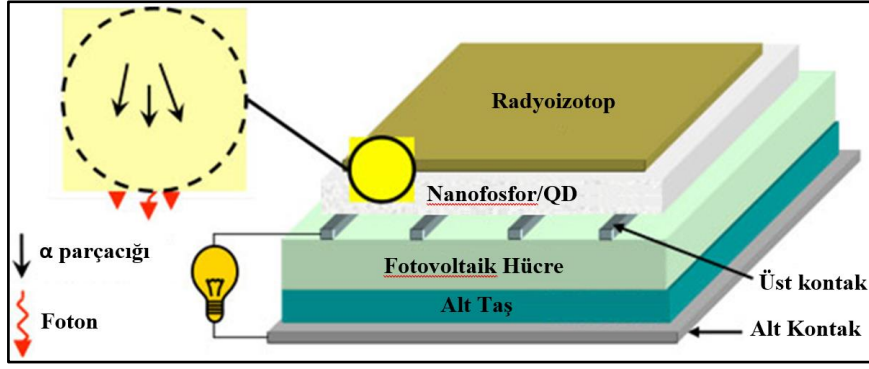
olarak birincil elektronların enerjileri keV mertebesinde iken, ikincil elektronların enerjisi eV mertebesinde oluşur, ancak sayıları binlerce kat daha fazladır. Bu nedenle pilin çıkış akımı, birincil parçacıkların akımına kıyasla çok daha büyük olur. Ancak pilin çıkış voltajı, birincil parçacıkların doğrudan toplanmasından dolayı oluşacak voltajdan daha düşük olur. Bu tip pilin ilk prototipi 1955'te Schwartz tarafından geliştirilmiştir.

3.2.4 Gama-Elektrik Üretim Hücresi

Gama-Elektrik Hücresi, Compton foton radyasyonunda saçılan elektronların toplanması esasına dayanmaktadır. Elektrik hücresi, elektrotlar arasında vakum veya katı dielektrik kullanılarak yapılır. İlkel olarak çalışma prensibi şu şekildedir; üretim hücresindeki emitörde oluşturulan elektronlar, karşı taraftaki kolektör tarafından toplanır veya farklı bir durumda, kolektör dielektrikte oluşturulan elektronları toplar. Bu tipte ilk kez, 1000 Ci aktiviteli Co-60 kaynağı kullanan dielektrik tabanlı gama elektrik hücresi geliştirilmiştir. Geliştirilen pil, 50 mW güce ve 500.000 V potansiyele ve %0.35 verime sahiptir. Ancak bu aktivite oldukça yüksektir ve bu tip bir pil, daha az radyoaktivite ve daha düşük gama enerjisi kullanıldığında çok daha düşük bir güce sahip olacaktır. Ayrıca Co-60 radyoaktif kaynağının yüksek aktivitesi ve gama enerjisinden (1.173 MeV ve 1.332 MeV) dolayı, oldukça kalın ve ağır radyasyon zırhlamasına ihtiyaç duyar. Bu nedenle mevcut araştırma ve uygulamalar için uygun değildir. Dezavantajları nedeniyle, bu tür piller gelecekte yapılacak araştırmalar için dikkate alınmamaktadır.

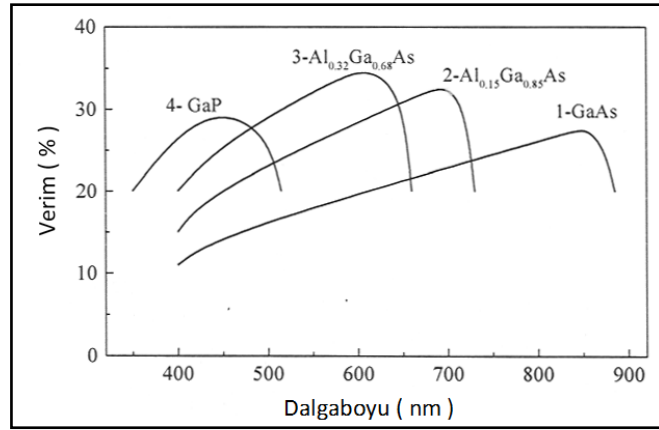
3.3 Dolaylı Dönüştüren Nükleer Piller

Bu metotta, radyoaktif bozunma enerjisi (alfa veya beta parçacıkları) radyolüminesans madde (fosfor) aracılığıyla ultraviyole veya görünür ışığa dönüştürülür. Elde edilen bu ışık fotovoltaiik bir hücre tarafından elektriğe dönüştürülür. Bu pillerde, radyoaktif bozunma enerjisinin ışığa dönüştürülmesi için genelde, CdS katkılı fosfor ile birleştirilmiş Pm-147 kaynağı veya radyolüminesans özellikli trityum tabanlı ışık kaynağı kullanılır. Dolaylı dönüştüren örnek bir pil şeması Şekil 3.4'de gösterilmiştir [10].



Şekil 3.4 Radyoizotop ve fosfor tabanlı nükleer pilin çalışma prensibi

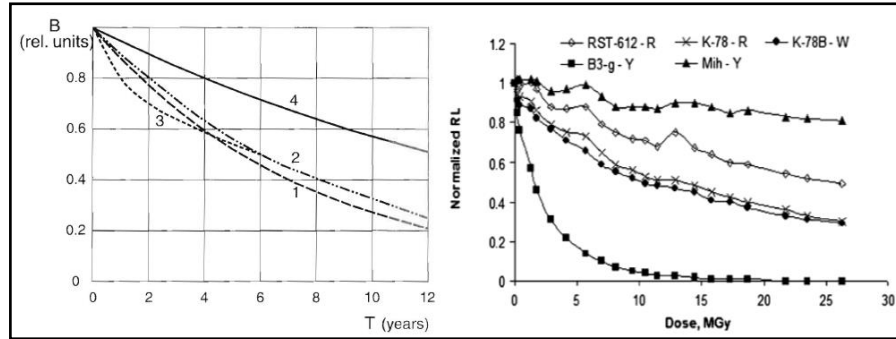
Bu tip nükleer pillerde kullanılan radyolüminesans ışık kaynağının şiddeti çok yüksek değildir ($0.3 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ civarında). Ayrıca düşük şiddetli ışık kaynağı için özel fotovoltailer kullanılmalıdır. Bu cihazlar için uygun fotovoltaiik verimliliğinin spektral dağılımı Şekil 3.5'te gösterilmiştir [69].



Şekil 3.5 $0.1-10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ aydınlatma için fotovoltaiik veriminin spektral dağılımı

Dolaylı dönüştüren nükleer pillerin verimliliği, radyolüminesans ışık spektrumunun fotovoltaiik spektrumu ile uyumlu olmasına bağlıdır. Lüminesans ışık kaynağının ve fotovoltaiik malzemenin optimum uyumu sağlanırsa, cihazın açık devre gerilimi 3.5 V'a ve genel verimliliği %2'ye kadar ulaşabilir. Xenon ve 10^6 Ci radyoaktif malzeme tozu (^{90}Sr , ^{210}Po veya ^{238}Pu) ile doldurulmuş ve hücre duvarları AlN fotovoltaiik ile kaplanmış cihazın verimi teorik olarak %25'e kadar ulaşabilir, ancak bu henüz deneysel olarak elde edilememiştir. Doğrudan dönüşümlü nükleer pil modelinin aksine, dolaylı dönüşümlü pillerde, radyoaktif kaynak, yarı iletken malzemeye doğrudan temas etmemektedir. Buna rağmen

cihazın çıkış değerleri, yapısındaki fosforun radyasyondan dolayı bozulması nedeniyle hızlı bir şekilde düşer ve bu süre radyoaktif kaynağın yarı ömrüne göre daha kısadır. Örnek olarak, trityum bozunma süresi ile karşılaştırıldığında trityum gazı ile doldurulmuş radyoluminesans kaynakların parlaklığındaki değişim Şekil 3.6 'da gösterilmiştir. Kaynağın parlaklığındaki kayıp oranı, trityum bozulma hızından en az iki kat daha fazladır. Diğer yandan, daha yüksek enerjilere sahip alfa izotoplarının kullanılması fosforun bozulmasını daha çok artırır. Örneğin, fotovoltaiik ışık sinyalini arttırmak için yansıtıcı bir folyoya ve (Zn, CdS:Ag,Cl) fosfor ekrana sahip olan AlGaAs fotovoltaiik hücre, 300 mCi aktiviteli Pu-238 radyoaktif kaynak kullanılarak üretilmiş ve test edilmiştir. Başlangıçta pil, 2.3 V'luk açık devre voltajı, 14 μ A'lık kısa devre akımı ve 21 μ W'luk bir çıkış gücü göstermiştir [70]. Bu üretilen güç ile elektronik bir hesap makinesi ve kol saati çalıştırılmıştır. Ancak pilin ürettiği güç sadece birkaç gün içinde birkaç kat düşmüştür. Şekil 3.6 (b), alfa radyasyonu altında yukarıda bahsedilen fosfor bozulmasını göstermektedir. Şimdiye kadar geliştirilen bu tip pillerin deneysel verimi %2 civarlarında olup çıkış voltajı birkaç voltu geçememiştir [71].

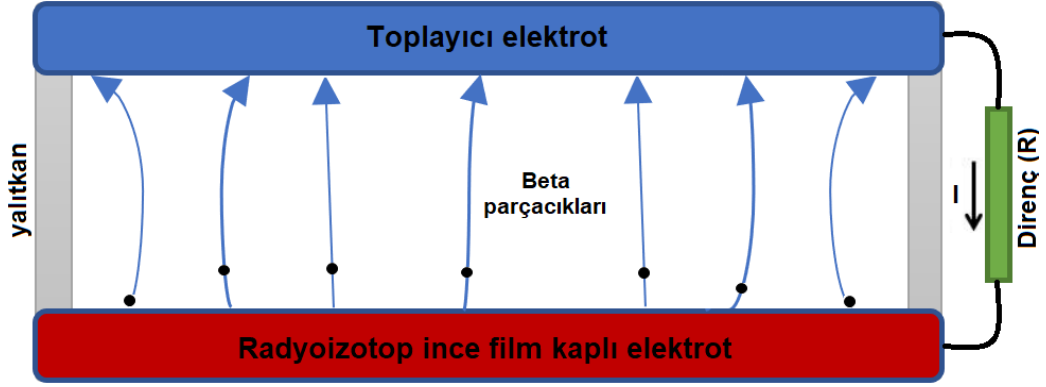


Şekil 3.6 (a) H-3 aktivitesinin ve H-3 gazı ile dolu farklı ışık kaynaklarının parlaklığındaki zamana bağlı değişim (b) Alfa radyasyonu altında fosforda meydana gelen bozulma

3.4 Doğrudan Şarjlı Nükleer Piller (DŞNP)

Doğrudan şarjlı nükleer pillerin (DŞNP) çalışma prensibi, kaynak bir elektrottan yayılan yüklü parçacıkların karşıda bulunan başka bir elektrotta toplanması esasına dayanır. Bu tür pillerde alfa veya beta kaynakları kullanılabilir. En basit durumda DCNB, üzerinde elektrostatik yükün biriktiği metal bir folyoya bakan

iletken başka bir folyo üzerinde veya içinde bulunan radyoaktif kaynaktan oluşur. Kaynak ve metal folyo bir dielektrik ile birbirinden ayrılır. Bu pil modelinde şarj işleminin daha iyi anlaşılması için, doğrudan şarj hücresinin şeması Şekil 3.7'de tanımlanmıştır.



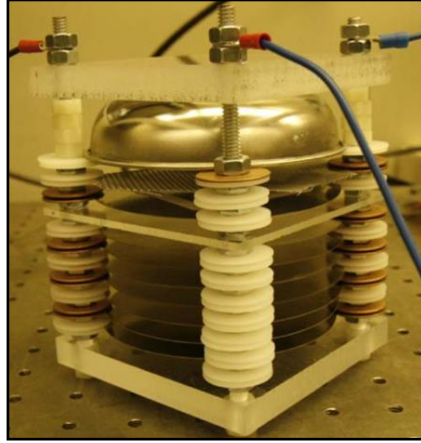
Şekil 3.7 Doğrudan şarjlı nükleer pil (DŞNP) hücresinin şeması

Doğrudan şarjlı nükleer pil birçok araştırma laboratuvarı tarafından, farklı tasarımlarla çalışılmıştır. Örneğin Battelle Ulusal Laboratuvarı'nda alfa yayıcı izotopları kullanılarak çalışan bir modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen pilin voltajı 100 kV'ye kadar çıkabilmektedir. Pilin yapısında, plakadan gelen ikincil elektronların bastırılması için (suppressing), radyoizotop kaplı plakanın üst tarafına sürekli negatif voltajda tutulan delikli bir ızgara (mesh) konulmuştur. Ancak bu durumda, cihazın çalışması için dışarıdan bir güce ihtiyaç duyulduğundan, pilin kullanımı pratik ve otonom değildir. Daha sonraki aşamalarda bu sorun, araya dielektrik film konularak aşılmış ve cihaz otonom hale getirilmiştir.

1952'de Linder tarafından, dielektrik olarak sadece vakum kullanan ilk ^{90}Sr tabanlı DŞNP geliştirilmiştir. 1953 yılında Rappoport tarafından polistren dielektrik malzeme içeren ^{90}Sr tabanlı DŞNP üretilmiştir. Daha sonraki yıllarda ise, bir rus şirketi olan Majak tarafından ilk Prometyum-147 tabanlı DŞNP geliştirilmiştir. Aşağıda verilen Tablo 3.2'de şimdiye kadar geliştirilen bazı doğrudan şarjlı nükleer pillerin karakteristik özellikleri ve verim değerleri verilmiştir.

Tablo 3.2 Doğrudan şarjlı nükleer pil parametreleri

DCNB	Radyoaktif Kaynak					Elektriksel Parametreler				
	İzotop	Parçacık Türü	ϵ_{ort} (keV)	A		V_{oc} (kV)	I_{sc} (nA)	P_{pil} (μW)	Verim (%)	Ref.
				Bq	Ci					
Moseley, 1913	²²⁶ Ra	α	4870	7.4·10 ⁸	0.02	150	0.01	0.38	0.06	[2]
Linder, 1952	Sr-Y-90	β	589	9.3·10 ⁹	0.25	365	1	91	10.5	[72]
Radiation Resear. Corp.	Tritium	β	5.7	7.4·10 ⁹	0.2	0.4	0.05	0.01	0.07	[73,74,75]
Rappaport, 1953	Sr-Y-90	β	589	7.4·10 ⁷	0.002	3.7	0.01	0.01	0.13	[53]
Rappaport, 1953	Sr-Y-90	β	589	2.0·10 ⁹	0.054	6.6	0.25	0.4	0.22	[53]
Radiation Resear. Corp	Sr-Y-90	β	589	3.7·10 ⁸	0.01	7	0.04	0.07	0.20	[76]
Sandia Corp.	Kr-85	β	251	3.0·10 ¹⁰	0.8	20	1.2	6.00	0.50	[77]
Gorlovoy, 1950	Sr-Y-90	β	589	3.7·10 ⁸	0.01	0.3	0.1	0.01	0.02	[78]
“Majak” BP-1	Pm-147	β	62	1.7·10 ¹²	46	21	52	273	1.62	[79][48]
“Majak”, BP-2	Pm-147	β	62	2.6·10 ¹²	70	23	20	115	0.45	[79]
“Majak”, BP-3	Pm-147	β	62	3.7·10 ¹²	100	25	90	563	1.53	[79]
“Majak”, BP-4	Pm-147	β	62	3.5·10 ¹²	94	30	72	540	1.56	[79]
“Majak”, BP-5	Pm-147	β	62	4.1·10 ¹²	110	23	55	316	0.78	[79]
“Majak”, BP-6	Pm-147	β	62	4.3·10 ¹²	115	30	51	383	0.91	[79]
“Majak”, BPM-1	Pm-147	β	62	3.0·10 ¹¹	8	21	10	53	1.79	[79]
“Majak”, BPM-2	Pm-147	β	62	6.3·10 ¹¹	17	25	15	94	1.50	[79]
“Majak”, BPM-3	Pm-147	β	62	9.3·10 ¹¹	25	28	18	126	1.37	[79]
“Majak”, BPM-4	Pm-147	β	62	7.4·10 ¹¹	20	19	16	76	1.03	[79]
“Majak”, BPM-5	Pm-147	β	62	1.2·10 ¹²	31	42	24	252	2.21	[79]
“Majak”, BPM-6	Pm-147	β	62	1.3·10 ¹²	35	45	27	304	2.36	[79]
“Majak”, BPM-7	Pm-147	β	62	2.6·10 ¹²	70	30	63	473	1.84	[79]
“Majak”, BPM-8	Pm-147	β	62	1.2·10 ¹²	31	35	23	201	1.77	[79]
Anno, Battelle	Po-210	α	5304	1.9·10 ¹¹	5	50	15	188	0.12	[80]
J. Braun, AB Atom Enerji	Tritium	β	5.7	1.8·10 ¹¹	4.8	0.7	2.8	0.5	0.29	[81]



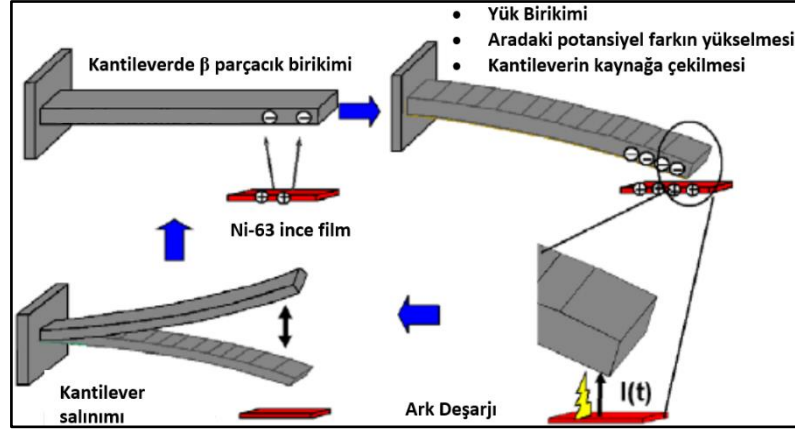
Şekil 3.8 Doğrudan şarjlı örnek bir nükleer pil düzeneği

3.4.1 Periyodik Hareketli Kantilever

Nükleer pil teknolojisinde, radyoaktif kaynaktan salınan yüklerin mekanik harekete doğrudan dönüşümünü gerçekleştirmek için yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir [82]. Radyoizotopla çalışan bu tip nükleer pillerde mekanik bir hareketin oluşturulması ile MEMS (Mikroelektromekanik Sistem) parçası doğrudan harekete geçirilebilmektedir. İleri-geri olarak tekrarlanan bu hareket süreci dört adımda özetlenebilir,

1. Kantilever radyoizotop ince filmden yayınlanan α (He^{2+}) veya β (e^- veya e^+) yüklü parçacıkları toplar.
2. Radyoaktif kaynaktan kantilevere doğru yüklü parçacık yayılımı devam ettikçe, yük korunumu nedeniyle, radyoaktif ince film yüzeyi üzerinde zıt işaretli bir yük birikmesi oluşur.
3. Kantilever, zıt işaretli yükler arasındaki elektrostatik çekim nedeniyle, radyoaktif ince filme doğru çekilir. Kantilever ve film temas ettiği anda yük transferi ile nötralize olur ve elektrostatik kuvvet ortadan kalkar.
4. Bu durumda, konsoldaki yay kuvveti ile kantilever başlangıç durumuna geri döner ve bu arada osilasyon (titreşim hareketi) yapar. Daha sonra 1. adımda anlatılan yük birikimi yeniden başlayarak döngü devam eder.

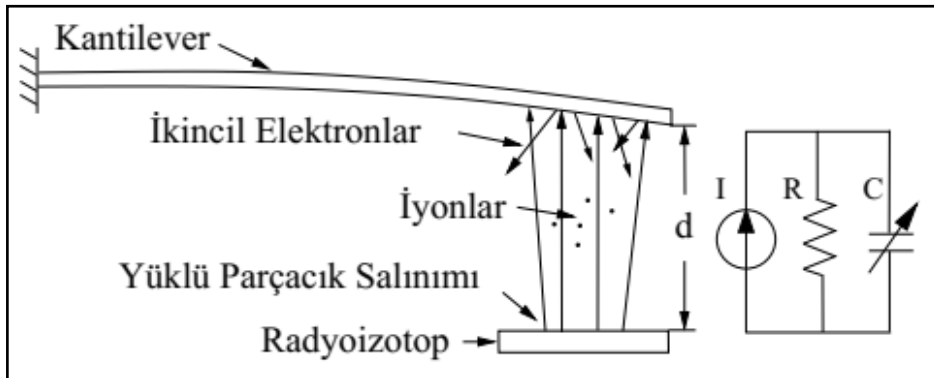
Bahsedilen döngü radyoizotop ince film aktif olduğu sürece devam eder ve kantilever bir şarj integratörü gibi çalışır. Bahsedilen sürecin şematik olarak özeti Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9 Yayınlanan elektronların mekaniksel harekete dönüşümü [83]

Şekilden görüldüğü gibi yakın mesafelerde, henüz kantilever radyoizotop kaynağına temas etmeden önce bile aradaki havanın iyonize olmasından dolayı bir miktar ark deşarjı oluşmaktadır.

Şekil 3.10’da kantileverin çalışma prensibine benzer bir elektrik devresi modellenerek matematiksel olarak ifade edilmiştir [83]. Benzer mantıkla modellenen devrede temel olarak üç bileşen vardır. Bunlar akım kaynağı, direnç ve değişken kondansatördür. Devredeki akım kaynağı, yük salınımı yapan radyoizotop ince filmi temsil eder. Kondansatör (C), kantilever ve radyoizotoptan oluşan sistemi temsil etmektedir [84].



Şekil 3.10 Periyodik kantileverin eşdeğer devresi

Devredeki R direnci kantileverdeki kaçak akım yollarını temsil etmektedir. Kaçak akım, kantilever üzerindeki yükü nötralize eden ortamdaki yükler nedeniyle veya kaynaktan yayınlanan yüksek beta enerjisinin ortamdaki gaz moleküllerini iyonize etmesinden dolayı meydana gelen ark deşarjı sebebiyle oluşur. Diğer bir olasılık, kaynaktan çıkan ve kantilevere çarpan birincil elektronların saçılmasından dolayı sistemde ikincil elektronlar oluşması ve bu elektronların da oluşan akıma zıt polariteye sahip bir kaçak akım oluşturmastır. Sonuç olarak kantilever ve kaynaktaki yüklerin oluşturduğu elektrik alanı ile bu iyonlar bir sızıntı akımı oluşturacaktır. Devrede üretilen akımın değeri,

$$I = 1.6 \times 10^{-19} \times 3.7 \times 10^7 \times N \quad (3.2)$$

ile verilir. Burada N, kaynağın aktivitesidir ve birimi mCi olarak alınmıştır. Benzetim yapılan devre için yük korunumu denklem (3.3)'te verilmiştir,

$$\alpha I - \frac{V}{R} - \epsilon_0 A \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{V}{d} \right) = 0 \quad (3.3)$$

Burada α kantileverin yük toplama verimi, A alanı, t bir döngü için geçen süre ve d kaynak-kantilever arası mesafedir. Diğer yandan kantileverin bir döngü sonunda yaptığı salınım hareketi, basit yay hareket denklemine benzetme yapılarak, denklem (3.4)' teki gibi ifade edilmiştir,

$$Q = k(d_0 - d) \quad (3.4)$$

Burada k yay sabiti, d_0 ilk mesafe, Q kantileverde biriken toplam yük, d herhangi bir andaki kaynak film-kantilever arası mesafedir.

İki düzlem arasındaki düzgün elektrik alan değeri; $\epsilon = Q/2\epsilon_0 A$ ve kapasitörün değeri; $Q = CV = \epsilon_0 AV/d$ olarak yazıldığında, denklem (3.3) ve denklem (3.4) aşağıdaki şekilde birleştirilebilir,

$$d = -\left(\frac{\alpha t}{\sqrt{2\epsilon_0 k A}} + \beta \right)^2 + d_0 \quad (3.5)$$

Denklem (3.5) sistemin mükemmel vakum altında olduğu varsayılarak yazılmıştır. Benzer şekilde yay kuvveti ve yayda depolanan enerji denklemi kullanılarak, döngü sonunda depolanan maksimum potansiyel enerji, aşağıda verilen denklem ile ifade edilebilir.

$$V_{max} = \sqrt{\frac{8}{27} \frac{kd_0^3}{\epsilon_0 A}} = \frac{E_e}{q} \quad (3.6)$$

Salınım sırasındaki maksimum kinetik (mekanik) enerji,

$$E_{K,max} = \frac{kd_0^2}{2} \quad (3.7)$$

şeklinde yazılır. Ayrıca bir döngü sonunda, radyoizotoptan salınan enerji,

$$E_r = NE_e T \quad (3.8)$$

olarak ifade edilir. Burada N aktivite, E_e yayılan elektronların ortalama enerjisi ve T periyotdur. Kantileverin teorik verimi, denklem (3.7) ve denklem (3.8)'in birbirine oranlanmasıyla,

$$\eta = \frac{E_{K,max}}{E_r} = \frac{kd_0^2}{2E_r} = \sqrt{\frac{8}{27} \frac{kd_0^3}{\epsilon_0 A}} = \frac{\sqrt{27}}{8} \alpha \quad (3.9)$$

şeklinde yazılabilir. A 'nın maksimum 1 olduğu kabul edilirse teorik olarak maksimum verim değeri; $\eta_{max} \cong \% 65$ olabilir. Denklem (3.8) ve salınımın periyot denklemi kullanılarak çıkarılabilecek diğer önemli bir sonuç, kaynak aktivitesinin azaldıkça salınım periyodunun yani bahsedilen elektrik üretim döngüsü için gerekli sürenin uzamasıdır. Bu durumda aynı yükü depolamak için daha uzun süre beklemek gerekecektir. Öyleyse, bu tip bir pil için en uygun beta kaynağı, yarı ömrü uzun olan Ni-63 olacaktır [85].

3.5 Farklı Tür Nükleer Pillerin Karşılaştırılması

Nükleer pillerin ürettikleri açık devre voltajı, radyoaktif bozunma enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme verimleri ve ürettikleri güç miktarı açısından genel

bir karşılaştırması Tablo 3.3’de verilmiştir [86]. Verilen özet tablodan ve bu bölümde nükleer pil modelleriyle ilgili anlatılan bilgilerden anlaşılacağı gibi, doğrudan ve dolaylı dönüşüm yöntemleri 5 V’den daha az bir açık devre voltajına ve maksimum %5 verimliliğe sahiptir. Ürettiği gücün düşme süresi, radyoaktif kaynağın yarı ömründen daha kısadır. Kontak potansiyel farkı nükleer piller, oldukça düşük açık devre gerilimi ve dönüşüm verimliliğine sahiptir. Doğrudan şarjlı nükleer pillerin (DŞNP) açık devre voltajı radyoaktif kaynaktan salınan parçacıklarının ortalama enerjisine yakındır (keV-kV). Ancak radyoizotop kaynaklı kantilever ile yapılan nükleer pilde, DŞNP sınıfına girmektedir. Ancak kantilever için elde edilen deneysel verim <%1 ve maksimum voltaj ~40-50 V civarındadır. Bu durumda hangi nükleer pil modelinin kullanılmasının daha uygun olacağı; çalışılan ortam koşullarına, nükleer pilin kullanılacağı teknolojik ürünün hangi boyutlara sahip olduğuna (makro, mikro, nano), gereksinim duyulan çıkış gücüne ve pil ömrüne bağlı olarak belirlenmelidir. Mevcut tez çalışmasında, teorik ve deneysel araştırmalar için betavoltaik ve doğrudan şarjlı nükleer piller seçilmiştir.

Tablo 3.1 Farklı tip nükleer pil parametreleri

Nükleer Pil Modeli	Açık Devre Voltajı	Max. Deneysel Verim, %	Ürettiği gücün düşme Hızı
Doğrudan Dönüşümlü Betavoltaik	≤ 5 V	≤ 5	Radyoizotopun yarı ömründen 2-3 kat hızlı
Doğrudan Dönüşümlü, CPD	0.5 V	0.5	Veri yok
Dolaylı Dönüşümlü	≤ 5 V	≤ 2	Radyoizotopun yarı ömründen 2-3 kat hızlı
Doğrudan Şarjlı	kV	≤ 3	Radyoizotopun yarı ömrü ile orantılı

3.6 Nükleer Pillerde Kullanılan Beta Radyoaktif İzotoplar ve Özellikleri

Bu bölümde nükleer pillerde kullanılan radyoaktif izotopların özellikleri üç aşamada incelenmiştir. İlk aşamada, bir radyoizotopun herhangi bir nükleer pil çeşidinde kullanılabilmesi için sahip olması gereken koşullar belirlenip aşağıda verilmiştir [87].

- a. İzotopun yarı ömrü, nükleer pilin uygulandığı teknolojik alana göre, en az işletme süresince gereken gücü kararlı bir şekilde sağlayacak kadar veya daha uzun olmalıdır. Normalde işletme süresi, yarı ömürden fazla olabilir. Örneğin cihazın işletme süresi, kaynağın yarı ömrünün 3 katı kadar uzun olduğu durumda, kaynak başlangıçtaki gücünün %12.5 'ine kadar düştüğünde bile cihazın çalışması devam edecektir. Günümüz teknolojisinde kullanılan nano ve mikro elektromekanik sistemlerde, 10 yıl veya daha uzun süre sistemi çalıştırabilmesi beklenmektedir.
- b. İzotopun spesifik gücünün yüksek olması gereklidir. Spesifik güç, izotopun bir gramından kaç watt enerji üreteceğini ifade eden bir niceliktir. Bir radyoizotopun spesifik gücü, yaydığı beta parçacıklarının enerjisiyle doğru orantılı ancak yarı ömrüyle ters orantılıdır.
- c. Nano ve mikro boyutlu sistemlerde kullanılacak radyoaktif kaynaklar, 1-100 mW / cm³ aralığında güç yoğunluğuna sahip olmalıdır.
- d. Güç üretim yoğunluğu (kütle başına ürettiği güç), en az 1000 W/kg olmalıdır.
- e. Hacim başına güç yoğunluğu 1-100 mW / cm³ olmalıdır.
- f. Spesifik aktivite, yeterli miktarda radyoaktif bozunma reaksiyonu oluşturmak için yeterince yüksek olmalıdır.
- g. İzotopun aktif ömrü boyunca yaydığı enerji miktarını ifade eden bozunma enerjisi ne kadar yüksek olursa, nükleer pilin verimi de o kadar yüksek olur. Bu miktar, radyoaktif bozunmadan önce ve sonra parçacığın kütle farkından hesaplanır.

h. Kullanılan yarı iletkenin radyasyon eşik enerjisine uygun radyoaktif kaynak seçilmelidir. Örneğin eşik enerji üst sınırı 300 keV olan bir yarı iletkene gönderilen beta parçacıklarının enerjisi bu değeri aşarsa, kristaldeki atomlar yer değiştirir ve yarı iletkende bozulmalar oluşur.

i. Kullanılan izotop saf bir beta yayıcı olmalıdır. Bozunma sonucu oluşan izotop farklı bir beta yayıcı olabilir ancak farklı bir radyasyon türü yaymamalıdır. Yayıdığı maksimum beta radyasyon enerjisi de, yarı iletkenin radyasyon bozulma enerjisinden daima düşük olmalıdır.

j. İzotop kararlı bir bileşikte bulunmalıdır.

k. 10 yıl veya daha uzun cihaz kullanım ömrüne sahip olmalıdır.

Literatürdeki izotop tablosundan [88] alfa ve beta aktif izotopların a, b, c koşullarını sağlayıp sağlamadığı kontrol edildiğinde, birçoğunun yeterince uzun bir yarılanma ömrüne sahip olmadığından dolayı koşul A 'yı, diğer bir kısmının ise ürettikleri gama ışınlarının zırlama gerektirmesinden ötürü koşul C'yi sağlamadıkları görülür. Buna göre listedeki alfa veya beta radyoaktif kaynaklardan nükleer pillerde kullanılabilecek olanların sayısının Tablo 3.4'deki kadar sınırlı olduğu görülmektedir [89], [90]. Tabloda listelenen maksimum güç yoğunluğu (Pd_{max}), koşulları sağlayan radyoizotopun maksimum atom yoğunluğuna sahip bileşiğinin bir gram kütlesi için tanımlanmıştır. Herhangi bir tip nükleer pil arabirimi tasarlanmasında koşul B'nin sağlanması için, radyoizotopun atomik yoğunluk seyreltme faktörü (DF_{atomik}) ile seyreltilmesi gerekecektir. Ayrıca seyreltme faktöründen, çıkış gücü yoğunluğunun nükleer pil tasarımına ait sistem verimliliği (η_{system}) tarafından azaltılacağı da anlaşılmaktadır. Bu durumda, B koşulunda istenen güç yoğunluğu ile maksimum güç yoğunluğu (Pd_{max}) arasında aşağıdaki gibi bir bağıntı verilebilir.

$$0.1 \geq \frac{PD_{max}\eta_{sistem}}{DF_{atomik}} \geq 0.001 \quad (3.10)$$

$\eta_{sistem}/DF_{atomik}$ için alt limit, Tablo 3.4' ün son sütununda gösterilmiştir. Son sütundaki değerler 100 ile çarpılarak üst limit değerleri hesaplanabilir. (3.10)

bağıntısının diğer bir önemi, yukarıda bahsedilen 2. ve 3. koşulun izotopun özellikleri ile belirlendiğini ifade etmesidir. Özetlenecek olursa;

Koşul A, izotopun yaklaşık 10 yıl yarı ömre sahip olmasını gerektirir. Koşul B, nükleer pile ait tasarım faktörü tarafından belirlenir. Koşul C, dıştaki radyasyon zırhlamasıyla beraber, nükleer pilin toplam kütlesinin minimize edilmesi gerektiğini belirtir. Gama yayınlayan izotoplar ekstra zırhlama gerektirdiğinden dolayı Tablo 3.4'e alınmamıştır. Koşul C ayrıca izotopun, 1 W_e/g değerini aşacak kadar yeterli güç yoğunluğu üretmesi gerektiğini belirtir. Örnek olarak Pb-210 radyoizotopu için denklem (3.1) uygulanırsa,

$$0.1 \geq 27.26 \times \frac{\eta_{sistem}}{DF_{atomik}} \geq 0.001 \quad (3.11)$$

veya,

$$3.67 \times 10^{-3} \geq \frac{\eta_{sistem}}{DF_{atomik}} \geq 3.67 \times 10^{-5} \quad (3.12)$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklemleri sağlayan aradaki değerlerin küçülmesi, sistemin daha yüksek bir seyreltme faktörüne ve daha düşük bir sistem verimliliğine sahip olmasına rağmen, kriterleri karşılayacağı anlamına gelir. $DF_{atomik} = 1000$ olduğu durumda,

$$3.67 \geq \eta_{sistem} \geq 3.67 \times 10^{-2} \quad (3.13)$$

olur. Hiçbir sistem verimliliği 1'i geçemediğinden, üst limitin elde edilmesi mümkün değildir. Ancak 3.67×10^{-2} olan alt limitin, nükleer pil verimliliğinin tespiti açısından, yaklaşık olarak elde edilmesi mümkündür. Bu yüzden yukarıdaki B koşulunda istenen 1 mW / cm³ güç yoğunluğunun elde edilmesi mümkündür. Bununla birlikte 1000 W_e güç üretebilmek için, nükleer pilin yaklaşık 1.000.000 cm³ hacminde ve 1 kg ağırlığında olması gerekir. Ayrıca koşul C'yi sağlamak için, cihazın ortalama yoğunluğu yaklaşık 1 µg/cm³ olmalıdır. Bu nedenle düşük bir ortalama kütle yoğunluğuna sahip nükleer pil tasarımı mümkün değildir.

Tablo 3.2 Çeşitli radyoizotoplar için watt başına teorik minimum nükleer pil yüzey alanı (BAW_{min}) ve hacmi (BVW_{min})

Nüklid	Bozun. Enerji (MeV)	Yarı Ömür (yıl)	Bozunma Türü	Güç (W/gm) > 1	BVW _{min} (cm ³ /W)	Maks. Güç Yoğunluğ (W/cm ³)	Min. Değer ($\eta_{\text{sistem}}/DF_{\text{ato mik}}$) 1 mW/cm ³)
H-3	0.0186	12.4	Beta	0.323	9.327	0.393	2.28 x 10 ⁻³
Ar-39	0.565	269	Beta	0.037	19.25	0.052	1.92 x 10 ⁻²
Ar-42	0.6	32.9	Beta	0.306	2.33	0.43	2.33 x 10 ⁻³
Sr-90	0.546	28.7	Beta	0.149	2.543	0.39	2.54 x 10 ⁻³
Pm-147	0.225	2.62	Beta	0.411	0.3344	2.99	0.334 x 10 ⁻³
Cd-113m	0.58	14.1	Beta	0.257	0.4475	2.23	4.84 x 10 ⁻⁴
Sm-151	0.076	90	Beta	0.004	33.58	0.03	3.36 x 10 ⁻²
Gd-148	3.182	74.6	Alfa	0.610	0.2073	4.82	2.07 x 10 ⁻⁴
Pb-210	0.063	22.3	β (%100) + α (5.305 MeV Po-210'dan)	0.240	0.037	27.26	3.67 x 10 ⁻⁵
Ac-227	0.044	21.8	β (%98.6+ α (%1.38)	0.031	3.2	0.312	3.21 x 10 ⁻³
U-232	5.414	68.9	Alfa	0.700	0.075	13.27	7.54 x 10 ⁻⁵
Pu-238	5.593	87.7	Alfa (%100)	0.555	0.09	11.03	9.06 x 10 ⁻⁵
Pu-241	0.021	14.4	β (%99.99)+ α (0.00245)	0.011	0.0005	0.223	4.48 x 10 ⁻³
Am-241	5.638	432	Alfa (%100)	0.109	0.672	1.49	6.73 x 10 ⁻⁴
Cm-243	6.168	29.1	α (%99.71)	1.647	0.0448	22.28	4.49 x 10 ⁻⁵
Cm-244	5.902	18.1	Alfa (%100)	2.777	0.0266	37.55	4.49 x 10 ⁻⁵
Bk-248	5.793	9	Alfa	5.493	0.0123	81.17	1.23 x 10 ⁻⁵
Cf-250	6.128	13.07	α (%99.92),fis (0.0077)	3.890	0.017	58.75	1.7 x 10 ⁻⁵

Görüldüğü gibi, herhangi bir elektrik üreticinin, nano boyuttaki sistemlerde güç kaynağı olarak kullanılabilmesi için gerekli koşullar oldukça katıdır. Tablo 3.4'deki radyoaktif kaynaklardan bu koşulları sağlayanların nano boyutlu nükleer pillerde kullanılabilmesi için, hacim tipi bir tasarım yapılması zorunludur. Ayrıca tasarımın atomik seyreltme faktörü düşük ve sistem verimliliği yüksek olmalıdır. Günümüz teknolojisinde bu koşullar, radyoizotop ve yarı iletken dönüştürücü hacminden kaynaklı sınırlamalar, radyoizotopların kullanılabilirliği ve üretim maliyetleri dikkate alınarak oldukça iddialı hedeflerdir.

İkinci aşamada, günümüz teknolojisinde kullanılan alfa ve beta aktif radyoizotopların genel özelliklerini ve teknolojik sınırlamalarını verdikten sonra, yalnızca tez çalışmasının konusu olan beta radyoaktif kaynakların spesifik özelliklerini detaylı bir şekilde incelemek uygun olacaktır. Tablo 3.5'de yalnızca beta aktif radyoizotoplar ayrıntılı olarak listelenmiştir [91]. Ancak listedeki izotopların bir kısmının yarı iletken tabanlı nükleer pillerde kullanımı pratik ve ekonomik değildir. Örneğin, Sülfür-35 (S-35) ve Fosfor-33 (P-33) tabloda görüldüğü gibi oldukça yüksek spesifik güce sahiptir ancak yarı ömürleri oldukça kısadır. Bu nedenle araştırma çalışmaları dışında, ticari ve teknolojik uygulamalarda kullanımları çok uygun değildir. Diğer bir beta kaynağı olan Argon-42 (Ar-42), 32.9 yıl kadar uzun bir yarı ömre sahiptir. Ayrıca spesifik gücü 357 mW/g'dır ve bu değer bir betavoltaik için oldukça idealdir. Ancak argon bir soygaz olması nedeniyle katı formda kullanılamaz. Ayrıca radyoaktif bozunma sonucu Potasyum-42 (K-42) kız çekirdeğe dönüşür ve K-42'nin beta enerjisi yarı iletkeni bozacak kadar yüksektir. Tabloda nükleer pil için uygun görünen diğer bir aday, spesifik aktivitesi 1548 mW/g olan Ce-144 (Seryum-144)'dür ancak bu radyoizotopun yarı ömrü 285 gün kadar kısadır ve bozunma sonucu oluşan Pr-144 kız çekirdeğinin beta enerjisi yarı iletkenlerde kullanılamayacak kadar yüksektir. Benzer şekilde yüksek beta enerjisinden dolayı Antimon-125 (Sb-125) için de durum aynıdır. Tablo incelendiğinde betavoltaik pil için en uygun adayların; ^{63}Ni , ^{147}Pm , ^3H olduğu görülür [54]. Ayrıca beta enerjisi 546 keV olmasına rağmen Stronsium-90 (^{90}Sr) radyoizotopunun da betavoltaik nükleer pillerde kullanılması için teorik ve deneysel araştırmalar yapılmaktadır.

Tablo 3.3 Beta radyoaktif kaynakları ve spesifik özellikleri

β Yayıcı	Yarı Ömür	Ort. Enerji (keV)	Max. Enerji (keV)	Ort. Spesifik Güç(mWg ⁻¹)
H-3	12.32 yıl	5.69	18.59	324.914
Ru-106	1.02 yıl	10.03	39.4	196.948
Ni-63	100.2 yıl	17.42	66.94	5.796
S-35	87.37 gün	48.76	167.33	12339.148
Pm-147	2.62 yıl	61.93	224.6	340.367
P-33	25.35 gün	76.43	248.5	70701.623
Ca-45	162.61 gün	76.86	255.8	8129.21
Cs-137	30.08 yıl	187.1	1175.63	96.241
Sr-90/Y-90	28.79 yıl / 64 saat	195.8 / 933.6	546 / 2280.1	160.24 / 3x10 ⁶
Ti-204	3.783 yıl	244.05	763.76	669.977
Kr-85	10.76 yıl	250.7	687.4	581.465
Os-194/Ir-194	6 yıl / 19.28 saat	16 / 800	96.6 / 2233.8	29.123 / 3.97x10 ⁶
Sm-151	90 yıl	19.63	76.6	3.061
Tm-171	1.92 yıl	24.77	96.4	159.876
Eu-155	4.753 yıl	47	252.7	135.209
Th-234	24.1 gün	47.9	273	6566.085
C-14	5700 yıl	49.47	156.475	1.313
Hg-203	46.594 gün	57.87	492.1	4731.189
Ru-103	39.247 gün	63.8	763.4	12213.974
Si-32/P-32	153 yıl / 14.27 gün	69.55 / 695.03	227.2 / 1710.66	30.1 / 11.78x10 ⁵
Ce-144/Pr-144	284.9 gün / 17.3 ay	82.1 / 1208	318.7 / 2997.5	1548.17 / 5.4 x10 ⁸
Sb-125	2.76 yıl	86.7	766.7	533.025
W-188/Re-188	69.78 gün / 17 saat	99 / 763	349 / 2120.4	5836.16 / 4.4x10 ⁶
Zr-95/Nb-95	64 gün / 34.9 gün	117 / 43.43	1123.6 / 925.6	14885.75 / 10111.6
Fe-59	44.495 gün	118	1565.2	34792.309
Hf-181	42.39 gün	121	1029.8	12196.924
W-185	75.1 gün	126.9	432.5	7063.894
Ce-141	32.508 gün	145.3	580.7	24525.828
Tb-160	72.3 gün	210	1835.1	14042.472
Ar-39	269 yıl	218.8	565	44.22
Ar-42/K-42	32.9 yıl / 12.36 sa	233 / 1430.5	599 / 3525.45	357.5 / 5.1x10 ⁷
Tm-170	128.6 gün	317	968	11215.49
Sn-123	129.2 gün	523.1	1403.6	25470.351
Sr-89	50.563 gün	587.1	1500.9	100977.803
Y-91	58.51 gün	603	1544.3	87654.311

Son aşamada, listede verilen radyoizotoplardan yarı iletken tabanlı nükleer pilde pratik kullanım açısından uygun olan ve tez araştırması kapsamında kullanılması planlanan bu radyoaktif kaynakların diğer bazı özellikleri aşağıda incelenmiştir.

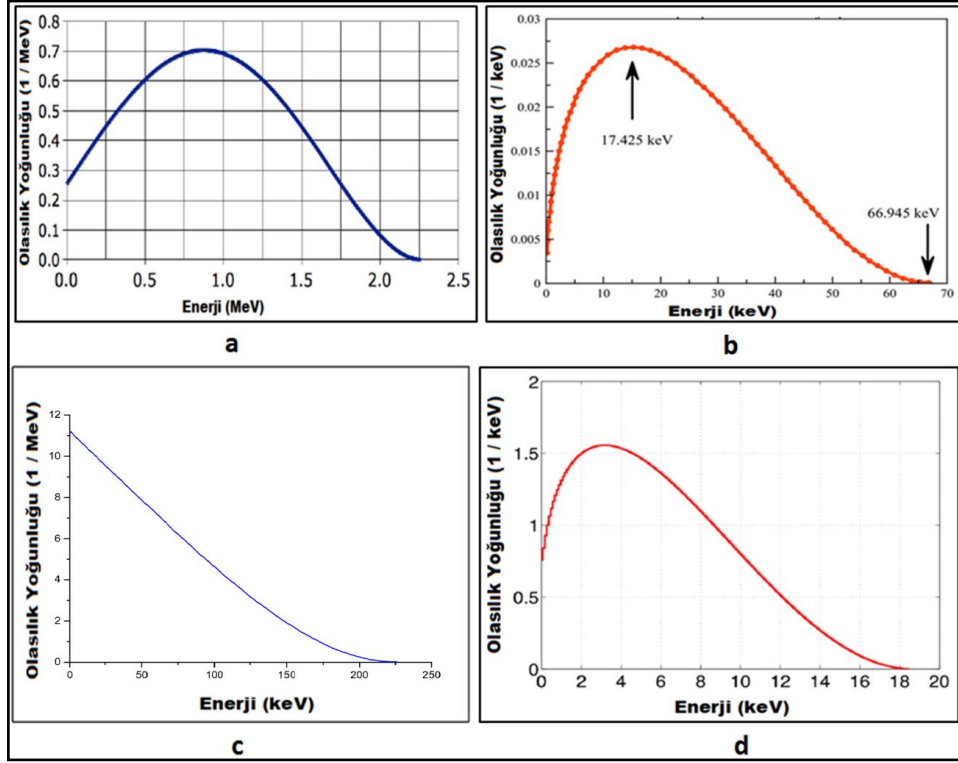
Nikel-63 (Ni-63) izotopu 5.9 mW/g gibi düşük bir spesifik güce sahip olmasına rağmen 100 yıl kadar uzun bir yarı ömre ve yarı iletkenlerde kullanım için 17.3 keV gibi oldukça uygun bir ortalama beta enerjisine sahiptir. Tritiyum (H-3) 325 mW/g spesifik güce ve 12.3 yıl yarı ömre sahiptir. Gaz formunda olmasına rağmen az da olsa sıvı formda da üretilebilir. En uygun aday Prometyum-147 (¹⁴⁷Pm)'dir. Bu izotop, 2.6 yıl yarı ömre, 347 mW/g spesifik güce ve 224.6 keV beta enerjisine sahiptir. Ayrıca saf beta yayıcı olması büyük avantaj sağlamaktadır. Bu radyoizotopların spesifik özellikleri Tablo 3.6 'da ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 3.4 Betavoltaik pil için en uygun beta radyoaktif kaynaklar ve özellikleri

İzotop	T_{1/2} (yıl)	Rad. Türü	E_{ort} (keV)	E_{Max} (keV)	P_{Sp} (μW/Ci)	P_{Sp} (W/g)	Aspesifik GBq/mg (Ci/mg)
H-3	12.3	β ⁻	5.7	18	34	0.33	358.9 (9.7)
Ni-63	100	β ⁻	17.4	66.7	103	0.0059	2.1 (0.057)
Pm-147	2.7	β ⁻	62	224	366	0.34	34.4 (0.93)
Sr-90	28.8	β ⁻	195.8	546	7000	0.98	5.5 (0.1)

Tablodaki beta radyoaktif kaynakların yarı iletken tabanlı nükleer pillerde kullanılabilmesi için ince film şeklinde, uygun bir tabaka üzerine kaplanması gerekir. Ancak 6. bölümde anlatılacağı gibi, bir tabaka üzerine kaplanan beta radyoaktif ince filmin kalınlığı belirli bir değerin üstüne çıktığında kaynak kendini zırhlamaya başlar. Bu durumda düşük enerjili beta parçacıkları ince filmin içinde hapsolürken yalnızca yüksek enerjili beta parçacıkları dışarı çıkabilir. Böyle bir durumda hem radyoaktif ince filmin dışarıdan ölçülen aktivitesi (görünür aktivite) düşer hem de enerji spektrumu yüksek enerji değerlerine doğru kayar. Bu nedenle her bir kaynağa ait ideal kalınlığın bulunması gerekir. Bu kalınlıkları hesaplayabilmek için gerekli olan şey, radyoaktif kaynakların enerji

spektrumlarıdır [22], [92], [93], [94]. Aşağıdaki şekilde verilen spektrumlarda kaynakların ortalama ve maksimum beta enerjileri de gösterilmiştir. Kendini zırlama etkisi ortaya çıktığında spektrum sağ tarafa doğru kayacağından dolayı, ortalama enerjiler de değişecektir.



Şekil 3.11 Beta enerji spektrumları (a) ^{90}Sr (b) Ni-63 (c) Pm-147 (d) H-3

NÜKLEER PİLLERİN TEKNOLOJİDEKİ UYGULAMALARI

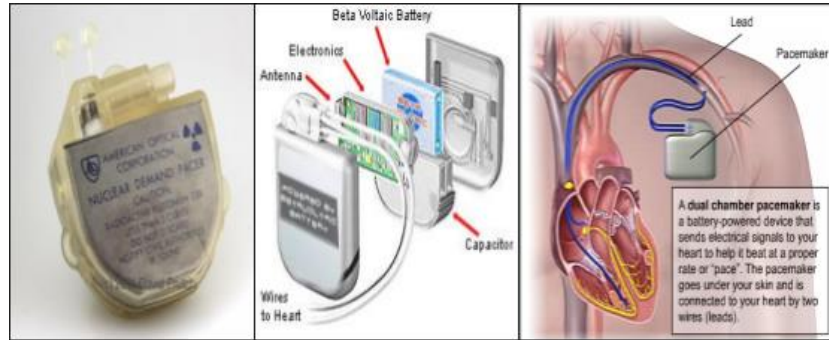
Nükleer pillerin farklı teknolojik alanlara uygulanması için yapılan denemeler bundan yaklaşık 60 yıl önce başlamıştır. İlk pratik uygulama, 1954 yılında Amerikan Radyo Kurumu tarafından belirli aralıklarla sinyalizasyon göndermek için yapılmıştır. 1960'lı yıllardan bu yana elektronik cihazların güç gereksinimleri azaltıldıkça, düşük enerjili betavoltaik piller daha popüler bir araştırma ve uygulama alanı olmuştur [95]. Geçmişten günümüze, nükleer pillerin teknolojideki uygulamaları aşağıda sıralanmıştır [96].

4.1 Kalp Pilleri

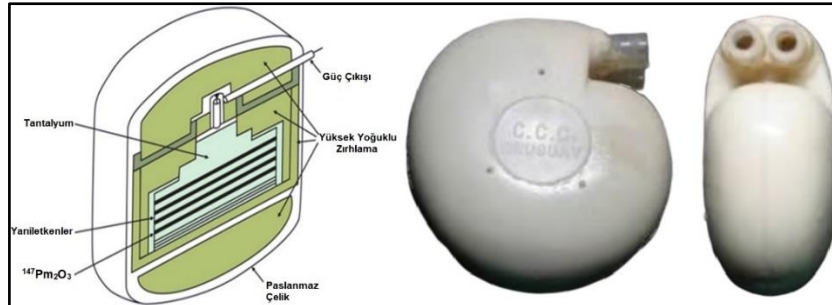
1970'lerde nükleer piller, kalp piline gerekli gücü sağlamak amacıyla üretilmiş ve uygulanmıştır. Yapılan uygulamada, termoelektrik ve betavoltaik türündeki nükleer pil modelleri güç kaynağı olarak kullanılmıştır. Minyatür termoelektrik nükleer pillerde hem ısı kaybını önlemek hem de radyasyon zırlaması amacıyla termal izolasyon yapılmıştır [97]. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de, kalp pilinde kullanılan örnek termoelektrik nükleer piller gösterilmiştir [54],[98]. Tablo 4.1'de gösterildiği gibi, kalp pilleri için geliştirilen çeşitli termoelektrik nükleer piller klinik olarak test edilmiştir. Şekil 4.2'de gösterilen McDonnell-Douglas firması tarafından geliştirilen Betacel-400 modeli, Pm-147 radyoaktif kaynak tabanlıdır ve üst üste istiflenmiş birçok silikon yarı iletken tabakadan oluşmaktadır [101], [102]. Yapılan bu tasarımda, Pm-147 radyoaktif ince filmin her iki tarafı kullanılmış ve %4'lük pil verimliliği ile 400 μ W'lık elektrik enerjisi üretilmiştir. Betacel 400 modeli, birçok klinik çalışmalarında kullanılmıştır. ABD tarafından yapılan ilk 60 deneme Uruguay'da olmak üzere, toplam 285 hastaya uygulanmıştır [99], [100].

Tablo 4.1 Kalp pilleri için geliştirilen çeşitli termoelektrik nükleer piller

Ürün	Ülke	Radyoaktif Kaynak	Yükleme (g)	Klinik Vaka	Türü
ARCO	ABD	Pu-238	0.410	42	Termoelektrik
AtomCell	ABD	Pu-238	0.120	Hayvan testleri	Termoelektrik
Atomic Ener. Res. establish.	İngiltere	Pu-238	0.180	80	Termoelektrik
BetaCel-400	ABD	Pm-147	0.105	60	Betavoltaik
Gulf Energy and Envir. Sys.	ABD	Pu-238	0.180 0.160	Hayvan testleri	Termoelektrik
CIT Alcatel	Fransa	Pu-238/Sc Alaşım	0.200	400	Termoelektrik
Siemens AG	Almanya	Pu-238		Yok	Termoelektrik
Synical	ABD	Pu-238		Yok	Termoelektrik



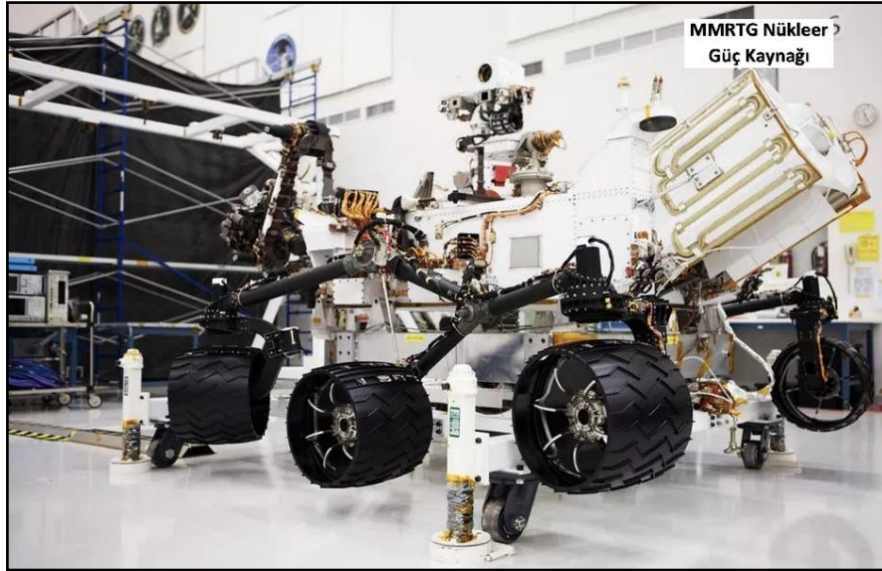
Şekil 4.1 Nükleer pil ile çalışan kalp pili (pacemaker)



Şekil 4.2 Pm-147 ile güçlendirilmiş Betacell-400 ve Medtronic's kalp pilleri

4.2 Araştırma Robotları

Küçük çaplı araştırmalar ve keşifler için kullanılan araştırma robotlarında, elektrik enerjisi üretmek için güneş pilleri kullanılmıştır. Ancak daha büyük çaplı araştırma çalışmalarında, SUV kadar büyük ve gaz kromatografi aygıtları gibi gelişmiş analiz cihazları içeren araştırma robotlarında, yaklaşık %6–7 verime sahip “Çok Misyonlu Radyoizotop Termoelektrik Jeneratör, (MMRTG)” kullanılmıştır [103]. Jeneratör, sekiz adet genel amaçlı ısı kaynağı modülünü (GPHS) kullanmakta ve 4.8 kg Pu-238 dioksit yakıt taşımaktadır. Bu konfigürasyon, ısı ile birlikte 110 W elektrik gücü üretir. Kaynağın sıcaklığı, cihazın kış mevsiminde çalışmasına izin verir. Ayrıca GPHS, çalışmalarda kullanılan elektronik cihaz ve ekipmanların verimli çalışma sıcaklığının korunması için gerekli ısıyı sağlamaktadır.

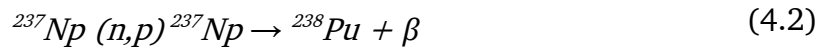
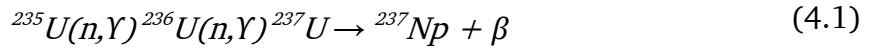


Şekil 4.3 MMRTG'nin Mars uzay aracı Curiosity'e yüklenmesi

4.3 Derin Uzay Ölçüm Problemleri

Güneş görmeyen Mars ötesi gezegen ve uzay araştırmaları için, mevcut güneş pilleri ile çalışmak, uzay araştırma problemlerine yeterli gücü sağlayamamaktadır. Diğer yandan, dünyanın etrafında dolanan yapay uydularda kullanılan güneş pilleri, Van-Allen radyasyon kuşağından geçerken zarar görmektedir. Bu durumlarda sıcaklık, basınç, nem, tozlu ortam gibi atmosferik şartlardan etkilenmeyen nükleer pillerin kullanılması büyük avantaj sağlamaktadır. Ayrıca

Ay, Mars veya Venüs üzerinde yapılan uzun dönemli araştırma görevlerinde, uydu veya gezegenin karanlık kalan bölgelerine girildiğinde, elektriğin depolanması için ağır aküler gerekir. Bu gibi durumlarda radyoizotop jeneratörler, alternatif enerji kaynağı olarak büyük kolaylıklar sağlamaktadır [104]. Uzay araştırma problemlerinde, radyoizotop üreteçlerin ilk geliştirilen modeli olan radyoizotop termal jeneratörler (RTG) büyük bir başarı ile kullanılmıştır. Tablo 4.2'de gösterildiği gibi, yapılan 26 araştırma görevinde, gerekli güç kaynağı olarak toplam 45 adet RTG kullanılmıştır [105]. RTG'ler radyasyon enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmede oldukça verimsiz olmalarına rağmen (% 4-10 arası), uzay araştırma görevlerindeki güvenilirlikleri doğrulanmış ve kapsamlı bir şekilde test edilmiştir [107]. RTG pil teknolojisinde güç sağlayan kaynak izotop, 87.7 yıl yarı ömüre sahip olan ^{238}Pu 'dır ve bir alfa kaynağıdır. ABD Ulusal Araştırma Konseyi, nükleer pillerde kullanılan radyoizotopların üretimlerinin çok sınırlı olduğu sonucuna varmış ve sadece ^{238}Pu radyoizotopunu, NASA görevleri için uygun kabul etmiştir. Ancak Pu-238, Uranyum-235 bozunma zincirindeki ayrılmış olan Np-237 yakıtından elde edilir ve üretilebilmesi için yüksek nötron akı reaktörleri gerekir. Üretim aşamasındaki reaksiyon ve bozunma zinciri aşağıda verilmiştir [106]. Bu şekilde 1 yılda maksimum 5 kg Pu-238 üretimi yapılabilmektedir ve maliyeti yıllık 77 milyon dolar civarındadır. Bu nedenle Avrupa Araştırma Programı'nda alfa kaynağı olarak Pu-238 yerine, yakıt yeniden işleme tesislerinde üretilebilen, daha ekonomik ve yarı ömrü daha uzun (433 yıl) olan Am-241 önerilmiş ve uygulanmıştır.



Tablo 4.2 RTG kullanılan çeşitli NASA görevleri

Görev	RTG	TE	Hedef	Yıl	Görev Süresi
Transit 4A	SNAP-3B7 (1)	PbTe	Dünya Yörüngesi	1961	15
Transit 4B	SNAP-3B8 (1)	PbTe	Dünya Yörüngesi	1962	9
Apollo 12	SNAP-27 RTG (1)	PbTe	Ay Yüzeyi	1969	8
Pioneer-10	SNAP-19 RTG (4)	PbTe	Dış Gezegenler	1972	34
Triad-01-1X	SNAP-9A RTG (1)	PbTe	Dünya Yörüngesi	1972	15
Pioneer-11	SNAP-19 RTG (4)	PbTe	Dış Gezegenler	1973	35
Viking 1	SNAP-19 RTG (2)	PbTe	Mars	1975	4
Viking 2	SNAP-19 RTG (2)	PbTe	Mars	1975	6
LES 8	MHW-RTG	Si-Ge	Dünya Yörüngesi	1976	15
LES 9	MHW-RTG	Si-Ge	Dünya Yörüngesi	1976	15
Voyager 1	MHW-RTG	Si-Ge	Dış Gezegenler	1977	31
Voyager 2	MHW-RTG	Si-Ge	Dış Gezegenler	1977	31
Galileo	GPHS-RTG	Si-Ge	Dış Gezegenler	1989	14
Ulysses	GPHS-RTG (1)	Si-Ge	Dış Gezegenler/Güneş	1990	18
Cassini	GPHS-RTG (3); RHU (117)	Si-Ge	Dış Gezegenler	1997	11
New Horizons	GPHS-RTG (1)	Si-Ge	Dış Gezegenler	2005	3
MSI.	MMRTG	Pb-Te	Mars	2011	3



Şekil 4.4 Radyoizotop termoelektrik üreticinin NASA uzay aracı New Horizons'a yüklenmesi

4.4 Uzaktan Kontrollü Güç Uygulamaları

Rusya genelinde deniz fenerleri ve kara tabanlı navigasyon sistemleri için Sr-90 gibi beta yayıcıları içeren RTG güç kaynakları kullanılmıştır. 1000'den fazla RTG ünitesinin Rusya'da konuşlandırıldığı düşünülmektedir.

4.5 Mobil Cihazlar

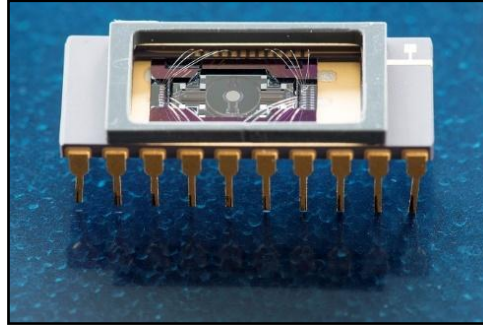
Prototip olarak geliştirilmiş olan, Xcell-N nükleer enerjili dizüstü bilgisayar bataryası, normal batarya ömrünün 7-8 bin katını sağlamış ve bilgisayar 8 ay boyunca kapanmadan sürekli olarak çalışmıştır.



Şekil 4.5 Radyoizotop tabanlı prototip bilgisayar bataryası (Xcell-N)

4.6 MEMS Uygulamaları

Günümüzde sayısız uygulaması bulunan mikro-elektromekanik sistemler (MEMS, 0.02 ve 1 mm arasındaki cihazlar) ve nano-elektromekanik sistemler (NEMS, 0.02 mm'den daha az olan cihazlar) küçük boyutta çeşitli işlevleri yerine getirebilen mikro ve nano makinelerdir. MEMS Teknolojisi mikro denetleyicilerden, telefonlarımıza kadar birçok alanda kullanılmaktadır [108].



Şekil 4.6 PZT kantilever içeren otonom RF basınç sensörü

Düşük giriş gücü gerektiren MEMS'ler, nükleer pillerin uygulandığı başlıca alanlardan biridir [87]. Günümüzdeki başlıca uygulamaları şunlardır,

- CMOS kızılötesi dedektörler
- İvme Sensörleri
- Jiroskoplar ve atalet sensörleri
- DNA analiz sistemleri
- Biyo-sensörler
- Mikro güç üretim jeneratörleri [109]
- Mikro-çip soğutma sistemleri
- Akustik sensörler
- Nem, sıcaklık, basınç sensörleri
- Piezoelektrik sensörler
- Düşük güç gerektiren işlemciler ve RFID sensörleri

MEMS - RFID Sensörleri Uygulama Alanları:

- *Hava trafik kontrol sistemleri*
- *Uydu iletişim sensörleri*
- *GSM transmitter ve receiver birimleri*
- *Telefon komütasyon ağları*
- *Kablosuz iletişim sistemleri*

MEMS – RFID/Kızılötesi dedektör uygulama alanları aşağıda verilmiştir.

Askeri Uygulamalar

- Basit gözetim
- Hafif başlık görüş sistemi
- Akıllı Mühimmat sistemleri
- Silah görüş sist.
- Gözetimsiz zemin sensörleri
- Gelişmiş tehdit uyarı sist.
- Uzun menzilli izleme sist.
- Füze arayan sistemler

Sivil Uygulamalar

- Sürücüler için gece görüş arttırıcılar
- Yangın söndürme sist.
- El kameraları
- Proses kontrol sist.
- Medikal görüntüleme
- Navigasyon
- Güvenlik sistemleri
- Uydu sistemleri

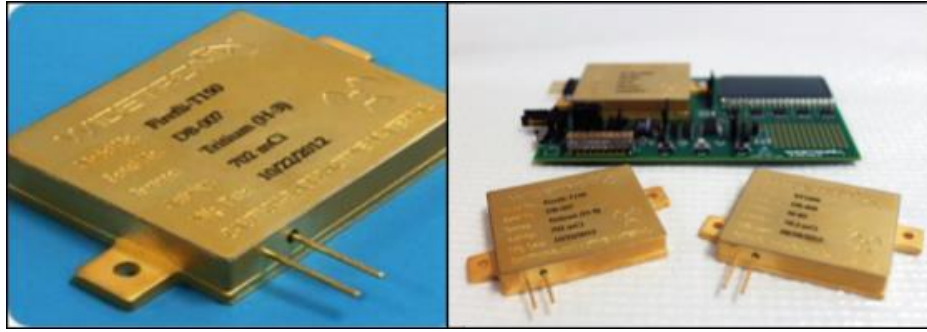
4.6.1 Nano Güç Sistemleri

Yukarıda bahsedilen birçok farklı alanda kullanılan mikro ve nano-elektromekanik sistemlerde, ultra düşük güç sensörlerinde ve lityum pillerin 24 saat boyunca hibrid batarya sistemi ile birlikte şarj edilmesinde kullanılan nanowatt veya

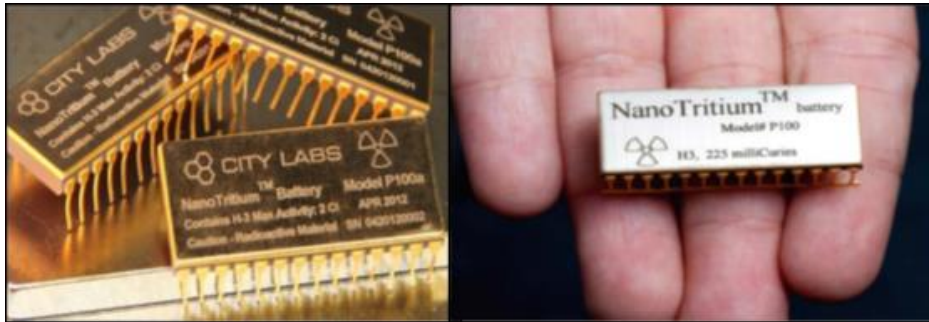
mikrowatt gücündeki nükleer piller özel bir ilgi görmektedir [85], [110]. Son 20 yıldır yoğunlaşan bu araştırmaların temel amacı, aşağıdaki özelliklere sahip güç sistemleri geliştirmektir,

- 1-100 mW / cm³ güç yoğunluğu
- 10 yıl veya daha uzun cihaz kullanım ömrü
- 1000 W_e/ kg güç üretim yoğunluğu

Bu koşulları belirli standartlarla sağlayan ABD'deki iki ticari firmanın üretmiş olduğu betavoltaik nükleer pil prototipleri Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 'de gösterilmiştir. [111], [112].

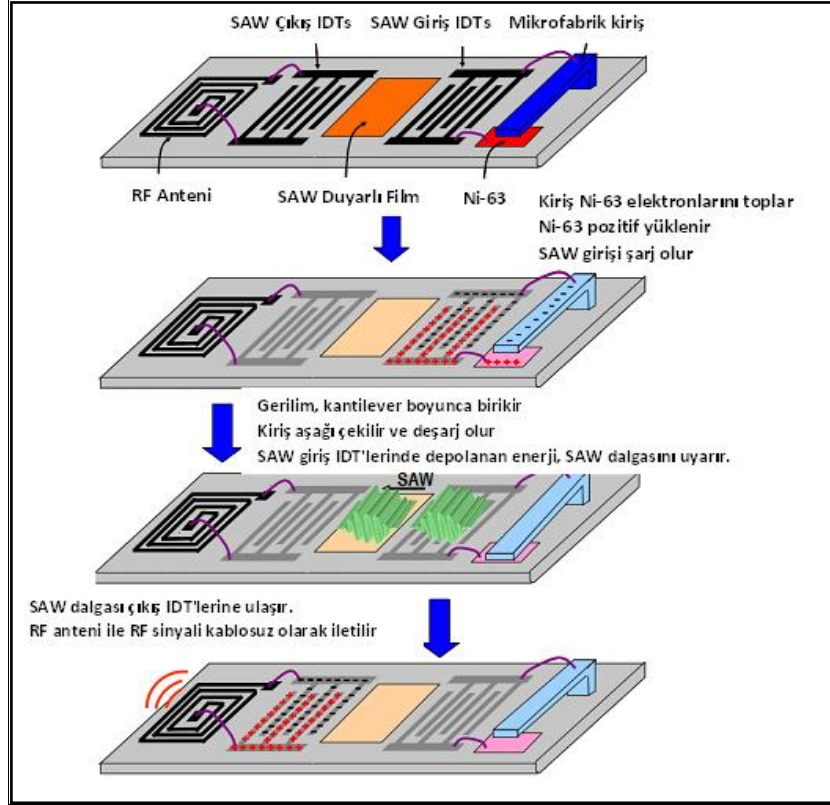


Şekil 4.7 Widetronix tarafından geliştirilen Frefly N-betavoltaik nükleer pil

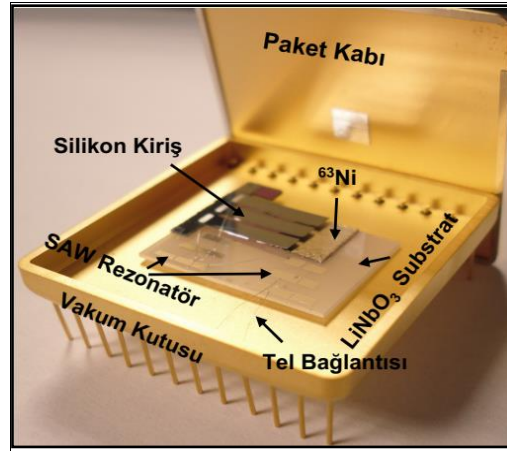


Şekil 4.8 City Labs - NanoTritium™ – betavoltaik nükleer pil

Nükleer pillerin kullanım alanları arasında bahsedilen MEMS – RFID sistemi, teknolojik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Örnek olarak, ABD-Cornell Üniversitesi SonicMEMS laboratuvarı tarafından geliştirilen, radyoizotop mikro güç kaynağı ile beslenen yarı-aktif RFID aygıt prototipi aşağıda gösterilmiştir [29],[113].



Şekil 4.9 Radyoizotop aktüatörlü kantileverin şematik gösterimi



Şekil 4.10 1 inç'lik vakum hücresi içine entegre edilmiş RFID aktarıcısı

Şekil 4.10'da iletim frekansı seçicisi olarak SAW (yüzey akustik dalga) cihazı kullanan bir RFID aktarıcısı (transponder) gösterilmektedir. Aygıtta güç kaynağı olarak, 100 yıllık bir yarı ömre, yüksek enerji yoğunluğuna ($\sim 105\text{kJ} / \text{m}^3$) ve 1.5 mCi aktiviteye sahip ^{63}Ni radyoizotop ince film kullanılmıştır. Aygıt, radyoizotop ile çalışan piezoelektrik güç jeneratörleri içermektedir. Şekil 4.10'da gösterildiği gibi, radyoaktif kaynaktan yayınlanan elektronlardan dolayı, kaynakla silikon kiriş

arasında elektrostatik çekim oluşur ve bu çekimin sonucunda piezoelektrik etki ortaya çıkar. Piezoelektrik güç üretici, %0,06'lık gibi düşük bir enerji dönüşüm verimine sahip olmasına rağmen, her üç dakikada bir, 5mW gücüne ve 100MHz frekansa sahip RF sinyalleri üretmiştir. Piezoelektrik tabanlı elektrik üreteçleri, periyodik algılama ve işleme için düşük radyoaktifiteli kaynaklarla bile gerekli çıkış gücünü üretebilirler [114]. Standart düşük güçle çalışan bir kablosuz sensörde, bellek durumunu korumak için güç gereksinimi 1-10 nW arasındadır. Periyodik algılama ve işleme için güç gereksinimi 0.1-1 mW arasında iken, periyodik kablosuz iletişim için 1-100 mW arasındadır [115]. Bu çalışma aralıklarına göre ^{63}Ni radyoaktif kaynağının RFID transponderi için ürettiği güç oldukça yeterlidir. Geliştirilen transponder, uzun yıllar boyunca otonom olarak çalışabilir ve güvenilir şekilde algılama ve izleme yapabilir.

4.6.2 İnsansız Hava Araçları

İnsansız hava araçlarının (İHA), askeri ve sivil birçok uygulaması bulunmaktadır. Önceden programlanmış bir uçuş planına veya karmaşık bir dinamik otomasyon sistemine bağlı olarak uçurulabilirler. Ancak bunların birçoğu nispeten büyük araçlardır ve uçmak için önemli güç gereksinimleri bulunmaktadır. Ancak günümüz teknolojisinde geliştirilen Mikro Hava Araçları (MAV) ve Nano Hava Araçları (NAV) sayesinde, insansız hava araçlarının boyutu ve kütlesi küçültülerek güç gereksinimleri azaltılmıştır [116],[117].



Şekil 4.11 Wasp mikro-istihbarat amaçlı insansız hava aracı

MAV'lar, 1 saat uçuş süresi ve 5 kg maksimum kalkış ağırlığı ile 10 km'lik bir aralıkta çalışabilen mikro hava araçlarıdır. NAV'lar ise, 1 saat uçuş süresi ve 25 g

maksimum kalkış ağırlığı ile 100 m yüksekliğe kadar çıkabilen ve 1 km'lik bir aralıkta çalışabilen nano hava araçlarıdır. Hafif ve uzun ömürlü bir güç kaynağı ile MAV ve NAV'ların uçuş süresi önemli ölçüde artırılabilir [118]. Örneğin 15 g'lık bir NAV pervanesine güç vermek için yaklaşık 585 mW, bir RF iletişim cihazına güç vermek için yaklaşık 500 mW ve bir kameraya güç vermek için 50 mW gerekir. Böylece toplam pil gücü 1.135 W civarında olmalıdır.

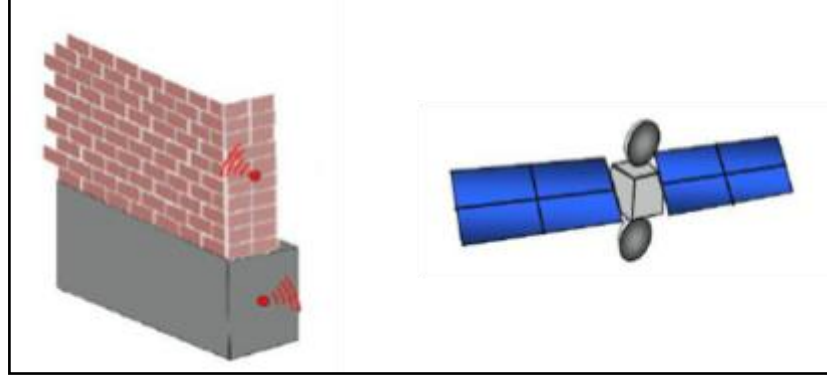
Radyoizotoplar yaklaşık 2×10^9 J/g'a kadar güç depolayabildiğinden, nükleer piller, lityum pillere kıyasla (460 J/g) oldukça ideal bir güç kaynağı olabilirler. Ancak nükleer piller, radyoizotopun yarı ömrüne bağlı olarak güç üretirler ve geçen her bir yarı ömürde sabit oranla, ürettikleri güç miktarı azalır. Yukarıda bahsedilen güç seviyelerine ulaşabilmek için (W), nükleer pil tasarımına bağlı olarak, radyoizotopun 5.000–10.000 Ci civarında bir aktiviteye sahip olması gerekir. Bu durumda, zırlama da dikkate alınarak, 1watt güce sahip nükleer pilin hacmi ve kütlesi, NAV'ın 15 g'lık kütlesinden çok daha büyük olacaktır. Ancak nükleer pilin yaydığı radyasyon türüne ve zırlamaya bağlı olarak ağırlık miktarı düşürülebilir. Diğer yandan, ileri teknolojik uygulamalarda boyutlar küçüldükçe ve güç gereksinimleri azaldıkça, uzun ömürlü radyoizotop tabanlı nükleer piller, otonom robotik sistemler için daha fazla uygulanabilir hale gelecektir.

4.7 Diğer Uygulama Alanları

Yukarıda belirtilen teknolojik alanların dışında nükleer pillerin kullanıldığı diğer önemli uygulamalar aşağıda sıralanmıştır [119], [120].

- Periyodik olarak ulaşılması zor olan kutup ve yüksek dağlık bölgelerde,
- Çevresel izlemede kullanılan sensör ağlarında,
- Köprü ve beton duvar yapılarında bulunan gömülü sensörlerde [19]
- Hibrid batarya sistemi içerisinde, kimyasal pillerin ve süper kapasitörlerin damlama şarj sistemiyle şarj edilmesinde (trickle charging),
- Ultra düşük güç gerektiren sensörlerin uzun yıllar boyunca aktif olarak izlenmesinde,

- Sıcaklık, basınç, titreşim hareketlerinin sürekli izlenmesinde,
- Büyük güçle çalışan sistemlerinin kablosuz sinyal gönderimi ile uyandırılmasında ve ilk güç patlamasını sağlayan tetikleyici olarak,
- Petrol ve maden arama çalışmalarında,
- RFID veya NFC, kablosuz ve periyodik olarak çalışmanın kontrol edilmesinde [115].



(a)

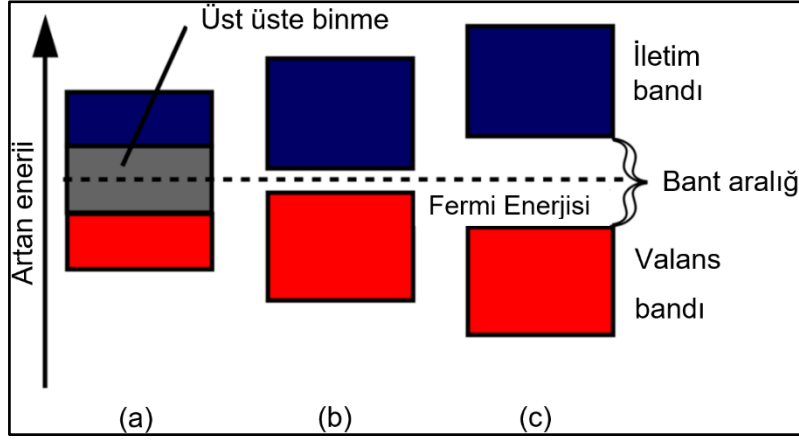
(b)

Şekil 4.12 Uzun pil ömrü gerektiren ortamlar

5.1 Yarı İletkenlerin Genel Özellikleri ve Enerji Bant Yapıları

Malzemeler, içerisindeki elektriksel yük taşıyıcılarının hareketleri göz önüne alınarak, süper iletken, iletken, yarı iletken ve yalıtkan olarak sınıflandırılabilir [121]. Atomlarda, çekirdekten uzaklaştıkça elektronların çekirdekle olan bağları zayıflar. Değerlik elektronu ya da valans elektron, bir atomun en dış kabuğunda (valans yörüngesi) bulunan elektronlara verilen isimdir. Çekirdekten en uzakta bulunan valans elektronları, maddenin yapısını belirlemede önemli bir rol oynar ve bir elementin diğer elementler ile kimyasal olarak nasıl etkileşeceğini belirler. Atomdaki değerlik elektronların sayısının daha düşük olması, atomu daha az kararlı ve etkileşime karşı daha fazla istekli hale getirir. Tam tersi durumda, valans kabuğu valans elektronları ile tam dolu ise atomun aktivitesi düşük olur, bu durumda diğer kimyasal elementler ile yapılacak etkileşimler için atom daha az istekli olur.

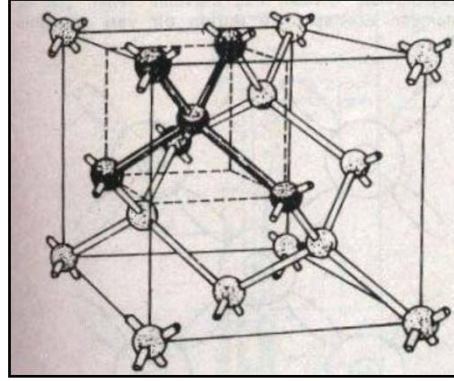
Valans elektronlarını serbest hale getirmek için gereken enerji düzeyi, maddenin yapısına göre değişir. Bu nedenle maddelerin iletkenlik dereceleri Şekil 5.1’de gösterildiği gibi en iyi şekilde, bant enerji seviyeleri metodu ile tanımlanabilir. Valans elektronlarının bulunduğu enerji bandına valans bandı (değerlik bandı) denir. Yasak enerji aralığından sonra elektronların bulunabileceği ilk enerji düzeylerinden başlayan enerji bandına ise “iletkenlik bandı” adı verilir. Şekil 5.1 (a)’da görüldüğü gibi, iletkenlerde, değerlik bandı ile iletim bandı bir miktar üstüste gelir [122].



Şekil 5.1 Enerji bant yapıları (a) İletken (b) Yarı iletken (c) Yalıtkan

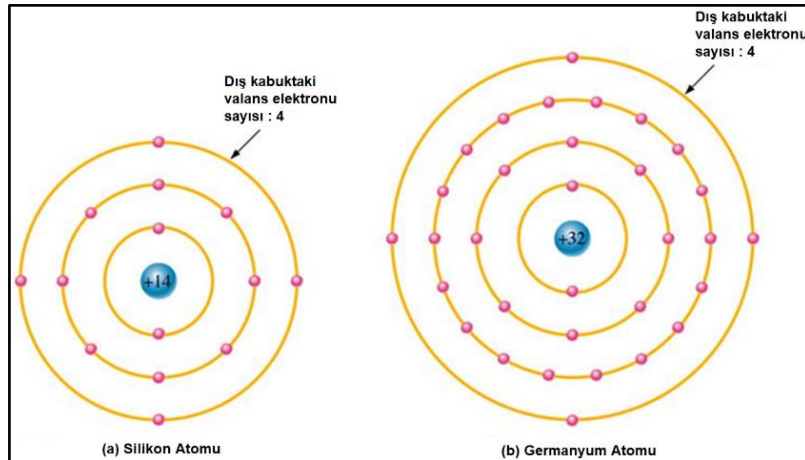
Bu örtüşme, değerlik elektronlarının serbestçe iletkenlik bandına girmesine ve iletme katılmasına neden olur. Bu nedenle verilen küçük bir enerjiyle, pek çok valans elektronu serbest hale geçer ve iyi bir iletken olan metallerde, komşu atomlar arasında kolayca hareket edebilir. Bulundukları enerji düzeyinden daha yüksek enerji düzeylerine çıkmadan metal içerisinde rahatça dolaşan bu elektronlara “serbest elektronlar” adı verilir. Şekil 5.1 (a)’daki üstüste gelme durumu, tam bir örtüşme olmadığından, değerlik elektronlarının yalnızca bir kısmı malzeme içerisinde hareket edebilir. Ancak bu durum metalleri iletken yapmak için hala yeterlidir. Yarı iletkenlerde ve yalıtkanlarda ise, valans elektronlarının bulunduğu enerji düzeyi ile bu elektronların bulunabileceği bir sonraki enerji düzeyi arasında, elektronların bulunmasının yasak olduğu enerji bölgesi bulunmaktadır. Yalıtkanlarda valans elektronlarını, valans bandından iletkenlik bandına geçirebilmek için oldukça yüksek bir enerji verilmesi gerekir. Ancak yarı iletkenlerde yasak bant aralığı Şekil 5.1 (b)’de görüldüğü gibi daha küçük olduğundan, yarı iletkenleri iletken hale getirebilmek için gerekli enerji oldukça düşüktür. Gerekli enerji, malzemedeki atomların ısı hareketlerinden veya malzemeye çarpan fotonlardan temin edilebilir. Şekilde görülen Fermi enerji seviyesi, mutlak sıfır noktasında (0 Kelvin) elektronların bulunabileceği en üst enerji seviyesini tanımlamak için kullanılır. Belirli bir sıcaklıkta, elektronların Fermi seviyesinin üzerindeki herhangi bir enerji durumunda bulunabilme olasılığı Fermi fonksiyonu ile ifade edilir [123].

Yarı iletkenler kristal yapıya sahiptirler ve atomları kübik kafes sistemi denilen belirli bir düzende sıralanmıştır (Şekil 5.2) [124]. Bu yapı tekli kristal (mono kristal) ya da çoklu kristal (polikristal) olabilmektedir.



Şekil 5.2 Silikon monokristal kübik kafes görüntüsü

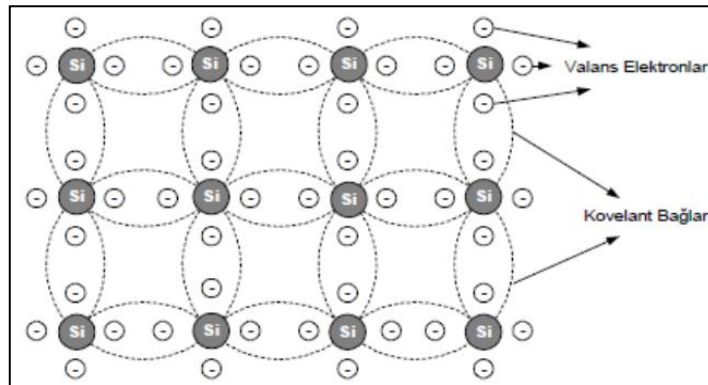
Yarı iletkenlerin son yörüngelerinde (valans bandı) 4 elektron bulunur. Örnek olarak, çekirdeğinde 14 proton bulunan Silisyum (silikon) atomu ile çekirdeğinde 32 proton bulunan Germanyum atomlarının elektron dizilişleri Şekil 5.3 'te gösterilmiştir [125].



Şekil 5.3 Silisyum ve germanyum atomlarının elektron dizilimi

Maddelerin içinde bulunan atomların elektronları dizilirken kimyasal olarak sekizli bağlarla birbirine bağlanırlar. Yani, kovalent yapının oluşması için 8 elektrona gerek vardır. Bu işlem yarı iletken atomlarının son yörüngelerindeki elektronların karşılıklı kullanımıyla gerçekleşir. Yukarıda verilen örnekte silisyumun (ya da germanyumun) 4 elektronu, komşu silisyum atomlarının

elektronlarını ortak olarak kullanır [126]. Kristal yapı içerisinde atomları birbirine bağlayan bu bağa, "kovalent bağ" denir.



Şekil 5.4 Saf Silisyum kristalinin kovalent bağ yapısı

Germanyum ve silisyumun saf kristalleri oldukça iyi bir yalıtkan olmalarına karşın molekül yapılarına küçük miktarlarda arsenik, indiyum vb. ekleyerek iletkenlikleri önemli ölçüde değiştirilebilir. Kullanılan en yaygın yarı iletken maddelerin periyodik tablodaki yerleri Şekil 5.5'te gösterilmiştir [127].

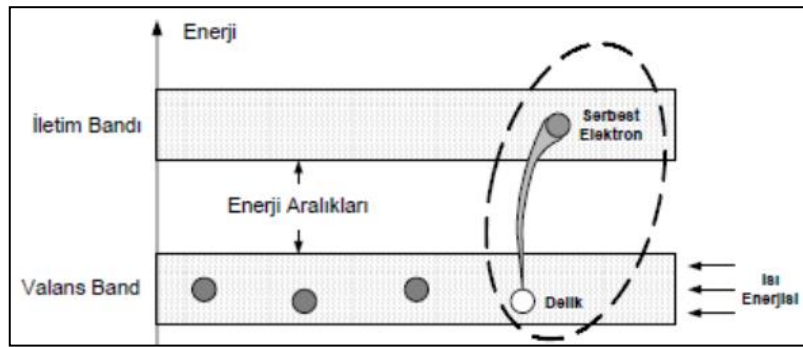
																VIIIa											
																2	He										
																	4.003										
																IIIa	IVA	VA	VIA	VIIa	10	Ne					
																5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	20.183	
																10.811	12.011	14.007	15.999	18.998							
																13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar
																26.982	28.086	30.974	32.064	35.453	39.948						
IB	IIB																										
29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr												
63.54		65.37		69.72		72.59		74.922		78.96		79.909		83.80													
47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe												
107.870		112.40		114.82		118.69		121.75		127.60		126.904		131.30													
79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn												
196.967		200.59		204.37		207.19		208.980		(210)		(210)		(222)													

Şekil 5.5 Yarı iletken maddelerin periyodik tablodaki yerleri

Yarı iletken maddelerin iletkenliği sıcaklık, ışık, manyetik alan gibi etkilerle değişir, mutlak sıfır sıcaklıkta yarı iletken madde, bir yalıtkan gibi davranır. Sıcaklık arttıkça valans bandında bulunan bir miktar valans elektronu iletim bandına geçer. Bu durumda valans bandında bir deşik (hole-boşluk) kalır. Prensip olarak bu deşiklerin pozitif (+) yüklü olduğu kabul edilir. Yarı iletkenlerde akım

taşıyıcılar olarak da adlandırılan bu ikili, elektron-deşik çifti (EHP) olarak adlandırılır (Şekil 5.6) [128].

Yarı iletken madde, yüksek sıcaklık derecelerinde bir metal gibi davranır. Yarı iletken kristal yapıya termal bir enerji verildiğinde, elektronların komşu atomlarla yaptığı kovalent bağlar kopar. Bu durumda elektronlar kristal örgü içinde serbestçe hareket edebilirler. Ancak yarı iletkenin bu şekilde iletkenlik özelliği kazanması geçici olup, herhangi bir dış etkinin olmadığı durumlarda, serbest elektronlar enerjilerini diğer elektronlara ve örgü titreşimlerine verdikten sonra komşu atomlarla yeniden birleşirler.



Şekil 5.6 Enerji diyagramı

5.2 Katlı İşlemi (Doping)

Doğal yarı iletken, kristal örgüsünde hiçbir safsızlığı olmayan saf bir yarı iletken maddeye karşılık gelir. Yalıtkan ve iletkenlerden farklı olarak, yarı iletkenlerde iletkenliği kontrollü olarak artırmak için saf yarı iletken malzemeye katkı maddesi eklenir. Difüzyon yoluyla safsızlık atomlarının eklenmesi işlemine, doping (katkılama) adı verilir. Doping yöntemi ile, yarı iletkenlerde kontrollü bir şekilde ve yüksek miktarda deşikler ve elektronlar oluşturulabilir. Akım taşıyıcılarının (elektron veya deşik) sayısının artırılması malzemenin iletkenliğini artırırken, azaltılması malzemenin direnci artırır. Her iki katkılama sonucunda n-tipi veya p-tipi madde oluşur [129].

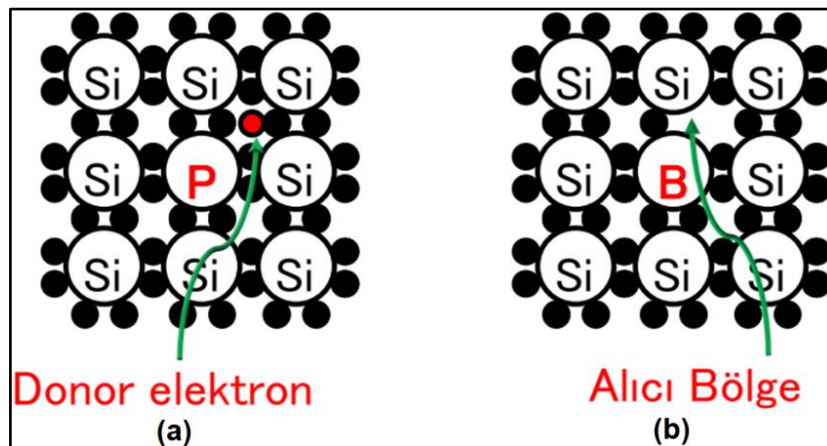
5.3 N-Tipi ve P-Tipi Yarı İletkenler

Silikon veya germanyum gibi saf bir yarı iletken kristalin, iletkenlik bandındaki elektronların artırılması, atomlara katkı maddesi ekleyerek yapılır. Daha sonra

belirli yöntemler kullanılarak, katkı maddesi atomlarının kristal içine yayılıp etrafındaki germanyum veya silikon atomları ile kovalent bağ oluşturması sağlanır.

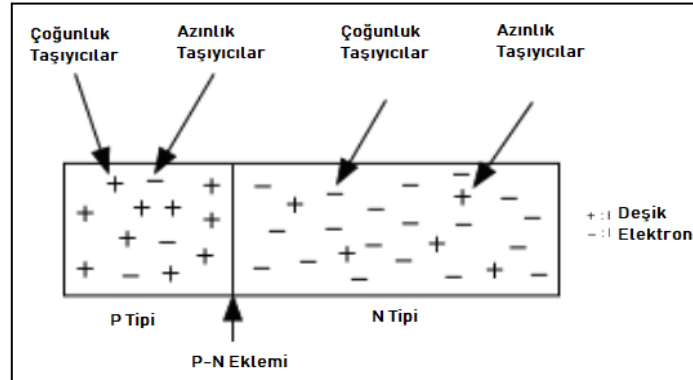
Örneğin, dört değerlikli (tetravalent) yapıdaki silikon kristali dikkate alınırsa, bu atom çevresindeki en yakın diğer silikon atomu ile kovalent bağ yapar (Şekil 5.7) [130]. Eğer çok az miktarda bir safsızlık, örneğin fosfor gibi 5 değerlikli (pentavalent) bir atom ile katkılanırsa, bu atom kristal örgü içindeki bir silikon atomunun yerini alır. Safsızlık atomunun beş valans elektronu olduğundan dört tanesi silikon ile kovalent bağ yapar ancak 1 tanesi boşta kalır. Bu durumda yarı iletken içerisinde fazladan birçok elektron oluşur ve bu elektronlar örgüye zayıf olarak bağlı olduğundan, ısı ve ışık gibi dış etkilerle, iletkenlik bandındaki elektronlara katkı sağlarlar. Bu tür yarı iletkenler, örgüden kolaylıkla ayrılabilen elektronlara sahip olduklarından dolayı n tipi yarı iletken olarak adlandırılırlar. Bu tür safsızlıklara ise donör (verici) safsızlık denilir. N tipi yarı iletken kristali oluşturulmasında, katkı maddesi olarak kullanılan atomlar, 5-değerlikli valans elektronlarına sahip olan Arsenik (As), Fosfor (P), Bizmut (Bi) ve Antimon'dur.

Donör taşıyan bir yarı iletkende, saf bir yarı iletkene göre iletkenlik bandındaki elektron sayısı daha fazladır. Bu nedenle n tipi kristal içerisinde pek çok serbest elektron bulunmaktadır. Böyle bir durumda fosfor, silisyum kristali için bir elektron kaynağı görevi görür.



Şekil 5.7 Yarı iletken bağ yapıları (a) P Tipi (b) N Tipi

İkinci durumda, yarı iletken bor gibi üç değerlikli bir atom katılır. Bu durumda bor atomları kendilerini çevreleyen dört silikon atomu ile kovalent bağ oluşturur, ancak bir elektron eksik kaldığı için son bağ boşta kalır ve deşik (hole) olarak adlandırılır. Diğer bir ifadeyle deşik, bağdaki bir elektronun yokluğuna verilen isimdir. Bununla birlikte, bu deşikler elektronlarla birlikte yarı iletkendeki toplam akıma katkıda bulunur. Aşırı deşik sayısına sahip olan yarı iletken, p-tipi yarı iletken olarak adlandırılır. Deşikler, boş olan bağa elektron çekmeleriyle pozitif bir yük gibi davranırlar. Ancak, bu sadece bir kabuldür ve p tipi yarı iletken gerçekte pozitif yüklü değildir ve tüm atomlar nötrdür. Bir n-tipi yarı-iletken de gerçekte, p tipi yarı iletkenle benzer şekilde nötr olarak yüklüdür. Şekil 5.8, sırasıyla p tipi ve n-tipi yarı iletkendeki çoğunluk taşıyıcı olan deşikleri ve elektronları göstermektedir. Deşikler ve elektronlar her zaman zıt yönde hareket ederler. Bir elektron boş bir bağa geçiş yaptığında arkasında bir boşluk bırakır. Bu durumda yarı iletkenlerdeki elektronların yük hareketi sonucunda, deşikler de sanki hareket ediyormuş gibi görünür.

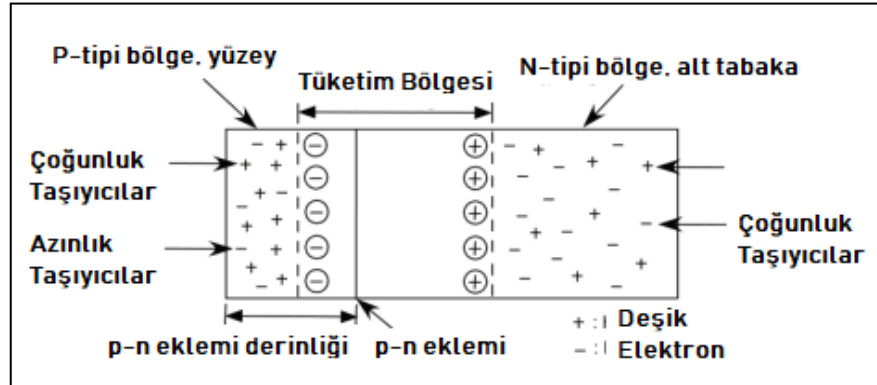


Şekil 5.8 P tipi ve n tipi yarı iletkenlerde azınlık ve çoğunluk yük taşıyıcıları

5.4 Tüketim Bölgesi

P-tipi ve n-tipi yarı iletken malzemeler, bir p-n bağlantısı oluşturmak üzere bir araya getirildiğinde, deşikler ve elektronlar, yoğunluğu yüksek olan bölgeden düşük olan bölgeye doğru yayılırlar. Bu akıma difüzyon akımı denilir. Difüzyon hareketi, p-n birleşiminin her iki tarafındaki atomların yük dengesini bozar. Sonuçta iki bölge arasında farklı bir uzay yük bölgesi daha oluşur ve bu bölge içerisinde bir elektrik alan meydana gelir. Yük taşıyıcıları bu alan sebebiyle

hareket ettiğinden dolayı, p-n birleşiminin oluşturduğu bu bölge civarında tükenmiş olurlar. Bu nedenle oluşan uzay yük bölgesi, “Tüketim Bölgesi” olarak adlandırılır. Bu bölgenin kalınlığı, katkılama yoğunluğuna ve yarı iletken malzemeye bağlı olarak μm mertebesindeir. Tüketim bölgesinin p tarafındaki katkı atomları negatif, n tarafındakiler ise pozitif yüklü iyonlar haline gelirler. Bu kutuplaşma tüketim bölgesi içerisinde “Yapısal (built-in) Potansiyel” olarak bilinen bir potansiyel oluşturur. Bu potansiyel, p-n eklemlerinde kendiliğinden oluştuğundan dolayı, “İnşa Potansiyeli” veya “Bariyer Potansiyeli” olarak da adlandırılmıştır. Çünkü deşikler ve elektronların daha fazla difüzyonunu önlemek için bir bariyer görevi görür. Böylece, tüketim bölgesinin kenarlarındaki iyonize olmuş atomlar arasında oluşan bu itme kuvveti ile denge durumuna ulaşılır. Şekil 5.9, deşiklerin ve elektronların difüzyonundan sonra tüketim bölgesinin oluşumunu göstermektedir [131]. Şekilde görüldüğü gibi tüketim bölgesi, p ve n tipi bölgelerdeki atomların katkılama yoğunluğuna bağlı olarak tam ortada oluşmamaktadır yani asimetriktir.

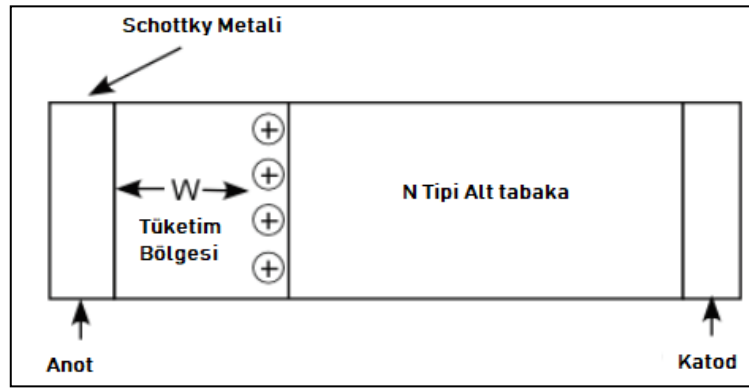


Şekil 5.9 Taşıyıcı difüzyonu ile p-n eklemde tüketim bölgesi oluşumu

Betavoltaik nükleer pillerde genellikle p tarafı yüksek oranda katkılanır. Bu durumda yüksek yoğunluklu p tipi bölgedeki deşikler, daha düşük yoğunluklu n tipi bölgeye doğru hareket ederler. Bu durumda tüketim bölgesi n tipi bölgeye doğru kayar. Yarı iletken p-n eklemi üretiminden sonra oluşan tüketim bölgesinin kalınlığı, betavoltaik nükleer pillerde ve güneş pillerinde oldukça önemli bir parametredir [132].

5.5 Schottky Bariyeri ve Yapısı

Güneş pilleri veya betavoltaik nükleer pillerin yapısında p-n ekleminden başka, Schottky eklemi olarak adlandırılan ikinci bir yarı iletken eklem daha kullanılmaktadır. Schottky diyotları, bir Schottky metal ile p-tipi veya n-tipi bir alt tabaka birleştirilerek oluşturulur [133]. Tüketim bölgesi, metal kontak ile p tipi veya n tipi bölge arasında oluşur. Bu tip bir kontak bir Schottky kontağı olarak bilinir ve bu kontağı oluşturmak için kullanılan metal, Schottky metal olarak adlandırılmıştır [134]. Schottky metallerine örnek olarak Nikel (Ni) ve Nikel Silisyum (Ni_2Si) verilebilir. Tipik bir Schottky eklemi Şekil 5.10 'da gösterilmiştir [119].



Şekil 5.10 Schottky betavoltaik pil yapısı

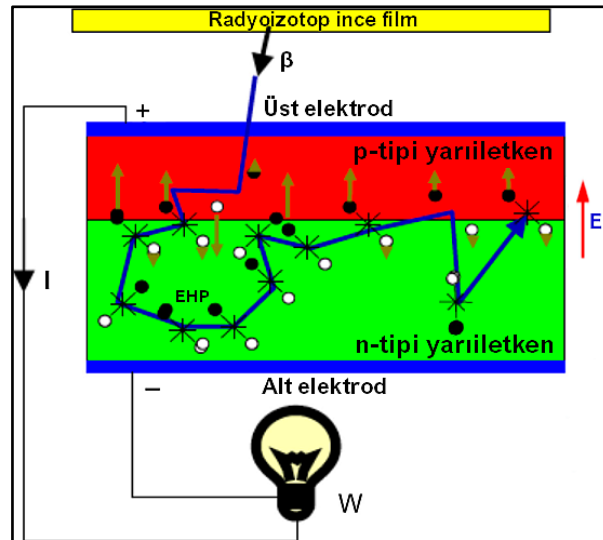
BETAVOLTAİK VE DOĞRUDAN ŞARJLI NÜKLEER PİL VERİMİNİN TEORİK İNCELENMESİ

Betavoltaik nükleer pil tasarımı, kullanılan yarı iletken malzemelerde bazı optimizasyonların yapılmasını gerektirmektedir. Nükleer pilin enerji dönüşüm veriminin ve çıkış gücünün artırılması için; katkılama (doping) konsantrasyonları, azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğu, direnç ve sıcaklık değerleri, tüketim bölgesinin genişliği, yüzey geometrisi ve p-n eklemi tabaka kalınlıkları gibi birçok yarı iletken parametrenin optimize edilmesi gerekir. 6. bölümün birinci kesiminde, verime etki eden bu faktörler, betavoltaik nükleer pillerin çalışma prensibi ve teorik verim hesaplamaları yapılmıştır.

Bölümün ikinci kesiminde ise doğrudan şarjlı nükleer pillerin çalışma prensibi anlatılmış, toplam pil verimini etkileyen fiziksel parametreler tanımlanmış ve bu faktörlerin matematiksel ifadeleri yapılmıştır.

6.1 Betavoltaik Nükleer Pilin Çalışma Prensibi ve Verim Hesaplamaları

Betavoltaik nükleer piller, beta parçacıklarının kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürür. Ancak kinetik enerjinin tümü, yarı iletkendeki elektron-deşik çiftlerinin (EHP) üretilmesinde kullanılmaz. Beta parçacık enerjisinin büyük bir kısmı, fonon etkileşimi ve x-ışını üretimi yoluyla yarı iletkenlerin örgü yapıları tarafından soğurulur [4], [61]. Bu nedenle her türlü etkileşimi gözönüne alarak, yarı iletken malzemedeki elektron taşınım (transport) sürecinin doğru modellenmesi oldukça önem teşkil eder. Şekil 6.1' de modellenen betavoltaik nükleer pilin genel yapısı şematik olarak gösterilmiştir [21].

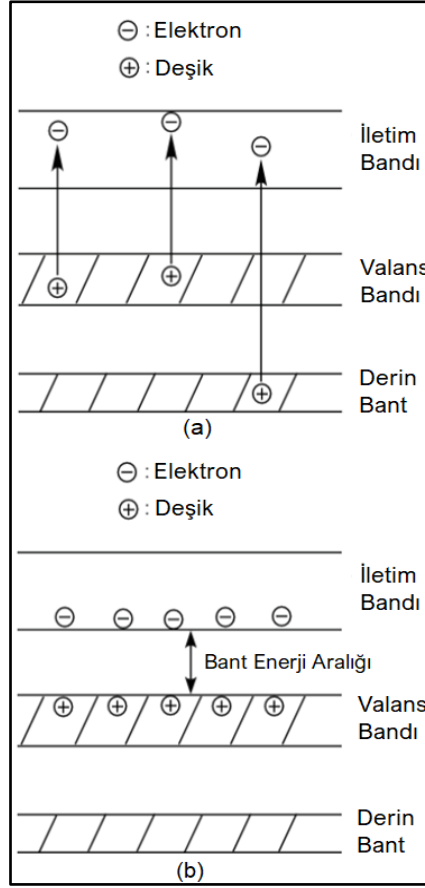


Şekil 6.1 Betavoltaik nükleer pilin genel yapısı

Kesim 5.4 'te bahsedildiği gibi betavoltaik nükleer pillerde p (veya n) tarafı yüksek oranda katkılanır. Bu durumda yüksek yoğunluklu p (n) bölgesindekideşikler, daha düşük yoğunluklu n (p) tipi bölgeye doğru hareket ederler. Bu durum, tüketim bölgesinin n (p) tipi bölgeye doğru kaymasına neden olur [61]. Betavoltaik nükleer pil tasarımının en önemli kısmı, radyoizotoptan yayınlanan yüksek enerjili beta parçacıklarının yarı iletkene girdikten sonra, elektron-deşik çiftlerinin (EHP) yarı iletkende nasıl üretildiğini anlamaktır. Bu mekanizma anlaşıldığında, betavoltaik pilin çalışma prensibi tam olarak anlaşılmış olacaktır.

Şekil 6.2'de gösterilen bant diyagramı EHP oluşumunu açıklamaktadır [21]. İlk adım, uyarılma adımı olarak adlandırılır. Bu aşamada valans bandındaki elektronlar, beta parçacıkları ile yaptıkları çarpışmalardan yeterli miktarda enerji aldıklarında, iletim bandına atlarlar. Bazı elektronlar valans bandının altındaki daha derin bantdan bile atlayabilirler. Bu süreç elektron sayısını artırdığı gibi, valans bandı ve daha derin bantta boşluklar bırakır. Bu işlem 10 ps sürer [131].

Bir sonraki aşamaya de-eksitasyon adım denir. Bu aşamada, elektronlar iletim bandının altına hareket ederlerken, deşikler valans bandının üst tarafına doğru hareket ederler. Ayrıca de-eksitasyon durumunda da elektron-deşik çiftleri üretilmeye devam eder. Bu aşamada momentum korunumundan dolayı, kristal örgüde fononlar üretilir. Bu yolla örgüye bir miktar da enerji verilmiş olur.

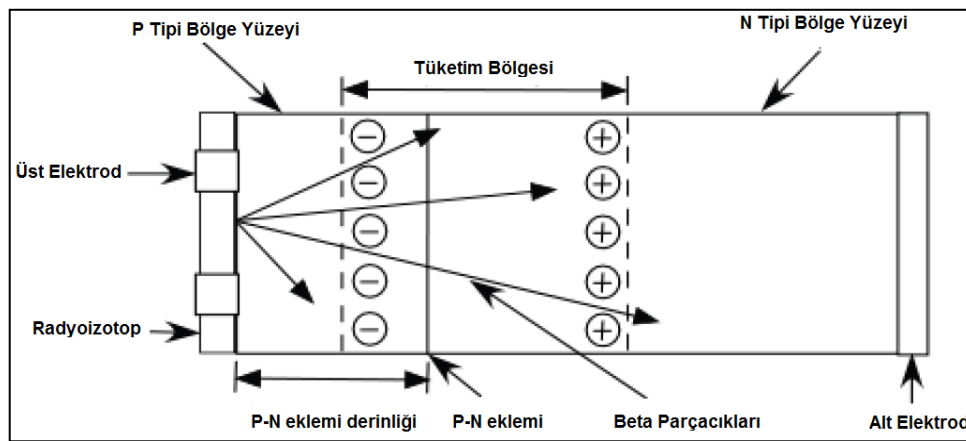


Şekil 6.2 Elektron-deşik çiftlerinin üretimi (a) Uyarılma (b) Taban durumuna dönme (de-eksitasyon)

Düşük enerjilerde bant boşluğu enerjisinden çok daha fazla sayıda kristal titreşim modu vardır. Bu çok adımlı bant diyagramı yöntemi, bir EHP üretmek için gereken enerjinin neden yarı iletkenin bant enerji aralığından daha yüksek olması gerektiğini başarılı bir şekilde açıklar. Ortalama olarak, bir EHP üretimi için gerekli enerji, bant aralığı enerjisinin üç katıdır. Örneğin, 1.12 eV'lik bant aralığına sahip silikonda, bir EHP oluşturmak için gerekli ortalama enerji 3.64 eV'dir [135]. EHP üretimi sürecinde termalleşme ve fonon kayıpları da hesaba katılır [136], [137].

Yarı iletken tabanlı nükleer pillerde, beta (elektron) yayan radyoizotop, yarı iletkenin p tarafına veya n tarafına yerleştirilebilir. Ancak en yaygın yarı iletken üretim yöntemlerinden biri olan “Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD)” üretim tekniğinden dolayı, beta radyoizotop genellikle p tipi bölgeye yerleştirilir. Bu yöntemde yarı iletken kristal, kimyasal buhar biriktirme

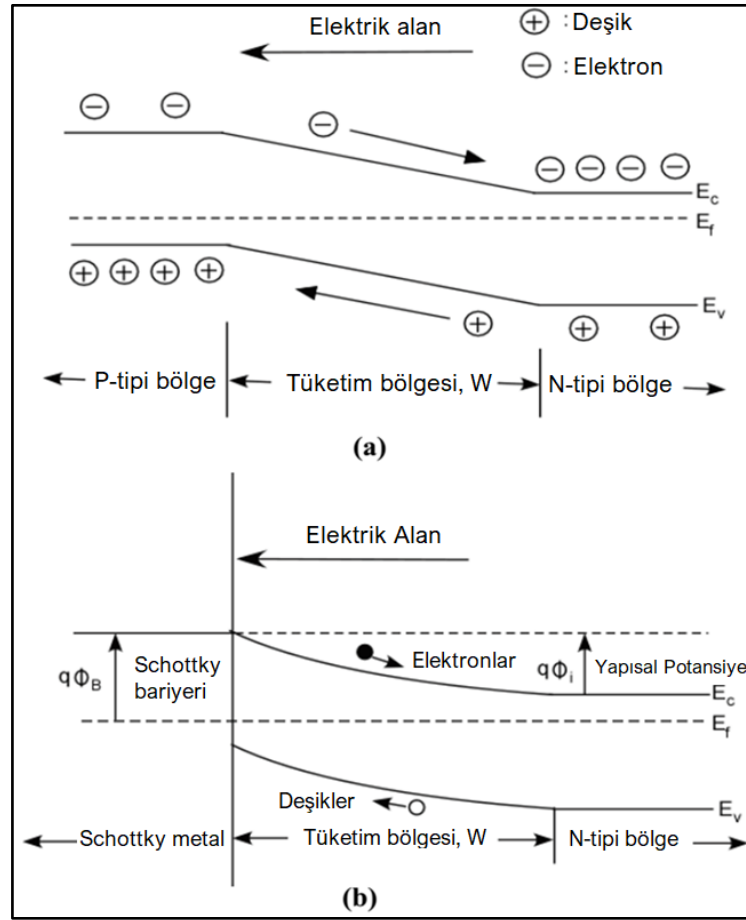
Şekil 6.3'te beta yayan radyoizotopun p tipi bölge yüzeyine yerleştirildiği tipik bir betavoltaik pilin iç yapısı gösterilmiştir [83]. Şekilde görüldüğü gibi pilin içyapısı, üst elektrot, p-tipi bölge (katkılı yüzey bölgesi), tüketim bölgesi, n-tipi bölge (katkılı substrat) ve bir alt elektrottan oluşur [138].



Temel çalışma prensibi, radyoizotop kaynaktan yayınlanan beta parçacıklarının yarı iletken malzemeye girdikten sonra, malzemenin atomlarıyla çarpışma, uyarma (eksitasyon) ve iyonlaştırma etkileşimleri yaparak burada elektron-deşik çiftlerinin (EHP) oluşumuna sebep olması ve üretilen bu EHP'lerin elektrotlarda toplanarak elektrik üretilmesi esasına dayanır. Üretilen elektron-deşik çiftlerinin sayısı, kaynaktan gelen beta parçacıklarının kinetik enerjilerine bağlıdır. Ortalama olarak keV mertebesinde enerjiye sahip olan her bir beta parçacığı başına binlerce EHP üretilir [17]. Bu sebeple betavoltaik nükleer piller, yüksek enerjili az sayıdaki beta parçacığını, düşük enerjili çok sayıda EHP'ye dönüştürürler. Ancak maksimum gücün elde edilebilmesi için, elektronların pozitif iyonlarla tekrar

birleşmesini yani rekombinasyonun en aza indirilmesini ve üretilen EHP'lerin birbirinden ayrılmasını sağlamak oldukça önemlidir.

Şekil 6.4 a-b'de gösterildiği gibi, tüketim bölgesinde üretilen EHP'ler, uzay yük dağılımının yapısal potansiyeli (built-in potansiyel) nedeniyle hareket ederler [21]. Elektronlar, bu potansiyel farktan kaynaklanan elektrik alan nedeniyle n tipi bölgeye, deşikler ise p tipi bölgeye doğru itilirler. Deşiklerin toplandığı p-tipi bölgedeki elektrot anot, elektronların toplandığı n-tipi bölgedeki elektrot ise katot olarak adlandırılır [139], [140].



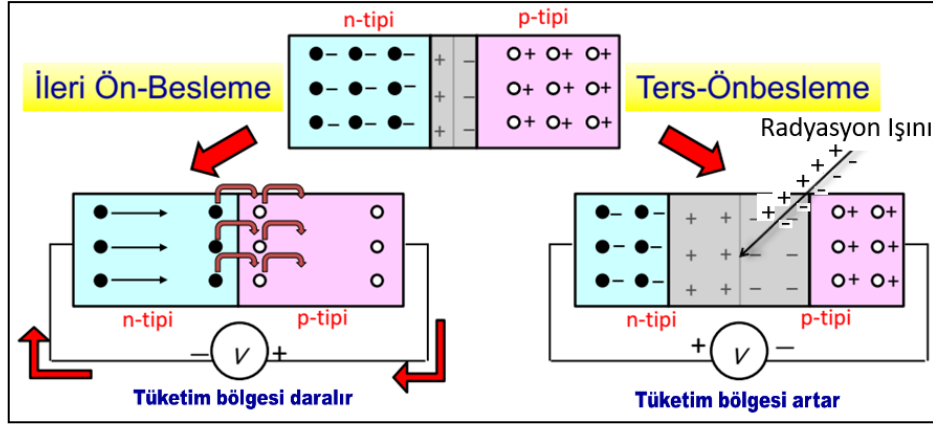
Şekil 6.4 (a) p-n eklemde elektron-deşik hareketi (b) Schottky eklemi

Rekombinasyon, betavoltaik pillerde enerji kayıplarına neden olur. Bununla birlikte enerji kayıplarına sebep olan başka faktörler de bulunmaktadır. Örneğin, radyoizotoptan gelen yüksek enerjili elektronların enerjisi, yarı iletkendeki diğer elektronlarla yaptığı çarpışmalardan dolayı veya malzemenin sıcaklığında meydana gelen bir artışın sonucunda örgü titreşimlerinin artmasından kaynaklı

olarak kaybolabilir [141]. Bu nedenle EHP'lerin maksimum toplama verimliliğinin elde edilebilmesi için, birbirlerinden ayrılma mekanizmasının bilinmesi önemlidir. Radyoizotop, yarı iletkenin p-tipi bölgesine yerleştirilirse, yüksek enerjili beta parçacıkları, önce p-tipi bölgeye, daha sonra tüketim bölgesine ve en son olarak n-tipi bölgeye doğru nüfuz ederler. Bu sırada p-tipi veya n-tipi bölgede üretilen EHP'lerin toplanarak elektrik üretimine katkıda bulunabilmesi için, difüzyon yoluyla tüketim bölgesine ulaşmaları gerekmektedir. Bu nedenle, tüketim bölgesi sınırları içinde mümkün olduğu kadar çok sayıda EHP oluşması sağlanmalıdır. Bu koşulun sağlanması için p-tipi tabaka mümkün olduğu kadar ince üretilir.

Betavoltaik nükleer piller, foton enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü fotovoltaik pillere benzer bir çalışma prensibine sahiptir. Betavoltaik ve fotovoltaik piller arasındaki en önemli farklardan biri, betavoltaik pillerde radyoaktif izotoptan yayınlanan yüksek enerjili her bir beta parçacığı başına yarı iletken malzemede binlerce EHP oluşmasıdır. Oysa güneş ışığından gelen fotonlar çok daha düşük enerjiye sahiptir ve bir foton emilimi başına sadece bir EHP üretilir. Bu durumda betavoltaik nükleer pil üzerine saniyede düşen elektron akısı (aktivite), fotovoltaik pil üzerine düşen foton sayısı ile aynı olduğu durumda, betavoltaik nükleer pillerin ~ 1000 kat daha verimli çalışacağı ve yüksek güç üreteceği anlamına gelir. Betavoltaikler ve fotovoltaikler arasındaki diğer bir önemli fark, betavoltaiklerde kaynaktan salınan yüksek enerjili beta parçacıklarının yarı iletkene derinlemesine nüfuz edebilmesidir. Ancak fotovoltaiklerde düşük enerjili fotonların penetrasyon derinliği, malzemenin gelen fotonun dalga boyuna göre değişen soğurma katsayısına bağlıdır [85].

Diğer yandan, betavoltaik nükleer piller ve radyasyon dedektörleri de oldukça benzer bir çalışma prensibine sahiptir. Bununla birlikte, Şekil 6.4'te gösterildiği gibi bir radyasyon detektörü, yüzlerce kilovolt (kV) harici ters ön-besleme voltajı uygulanmasını gerektirir [142]. Uygulanan ters voltaj yarı iletken p-n eklemi içerisindeki elektrik alanı artırır ve geniş bir tüketim bölgesi oluşturur. Bu durumda, artırılan tüketim bölgesi bir radyasyon sensörü gibi davranır. Şekil 6.5'te ileri ve ters ön besleme durumunda, yarı iletken p-n eklemine tüketim bölgesindeki daralma ve genişlemeyi göstermektedir [143].



Şekil 6.5 İleri ve ters ön besleme durumunda, p-n eklemindeki değişim

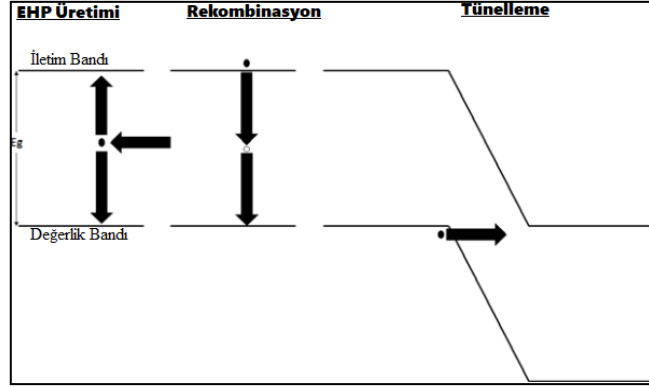
Radyasyon dedektörleri ve betavoltaik nükleer pillerin her ikisinde de gelen radyasyon ışını tarafından üretilen EHP'lerin tümünü toplamak için, tüketim bölgesinin yeterince geniş olması gerekmektedir. Radyasyon dedektörlerinde tüketim bölgesinin ters bir voltajla genişletilmesi, yanlış pozitif sinyallerden kaçınılması için gereklidir. Bir radyasyon detektöründe toplanan yükler, puls sinyali olarak harici bir devrede kaydedilir. Betavoltaik piller ise, bağlandığı elektrik devresine dışarıdan harici olarak bir yük sağlamaktadır.

6.1.1 Performansı Etkileyen Faktörler

Yukarıda anlatıldığı gibi, betavoltaik pilde oluşan elektriksel yüklerin toplanma verimliliğini artırabilmek için, tüketim bölgesi genişliğinin artırılması gerekir. Yarı iletken içerisindeki yük taşıyıcıların taşınımı, sürüklenme ve difüzyon olayları ile kontrol edilir. Sürüklenme ve difüzyon parametreleri ise, cihaz içinde meydana gelen rekombinasyondan etkilenmektedir. Rekombinasyon aynı zamanda, yük taşıyıcı yaşam süresini de belirler. Burada yaşam süresi, yük taşıyıcılarının yüklerini kaybetmeden veya rekombinasyona uğramadan önce yarı iletken ne kadar süre kaldığının bir ölçüsüdür [144].

Yarı iletken malzemenin fiziksel parametreleri ve yük taşıyıcıların taşınımı radyasyondan çeşitli şekillerde etkilenir. İyonlaştırıcı radyasyon, cihaz içinde elektron-deşik çiftlerinin oluşmasına neden olduğu gibi, aynı zamanda yarı iletken malzemenin katkılama (doping) seviyesini değiştiren kusurların oluşmasına da neden olur. Bu durumda iyonlaştırıcı radyasyon etkisiyle oluşan tünelleme,

rekombinasyon ve tuzaklama olayları, betavoltaik pilde üretilen akımın azalmasına neden olur [145]. Radyasyondan kaynaklanabilecek farklı etkiler Şekil 6.6'da gösterilmiştir.



Şekil 6.6 Radyasyon-yarı iletken etkileşimi ve betavoltaik EHP üretimi

6.1.1.1 Yarı İletken Malzemenin Fiziksel Parametreleri

Betavoltaik nükleer pil verimini etkileyen birbirine bağımlı fiziksel parametrelerin bazıları aşağıda verilmiştir [146], [147].

- Yük taşıyıcı mobilitesi
- Derin seviye tuzakları
- Yük taşıyıcılarının yaşam süresi
- Yük taşıyıcılarının sürüklenme uzunluğu
- Yüzey rekombinasyonu
- Tuzak destekli tünelleme
- Oluşan elektrik alan şiddeti vb.

Verimi etkileyen bu parametrelerin ayrıntılı incelemesi aşağıda verilmiştir.

1. Yük Taşıyıcı Mobilitesi

Yük taşıyıcı mobilitesi (hareketliliği), elektrik alan uygulandığında, yarı iletken malzeme içerisindeki elektronun hızını ifade eden bir niceliktir. Bu nicelik, malzeme direncini etkileyen yük taşıyıcılarının sürüklenme hızını kontrol eder. Yarı iletkenindeki taşıyıcı hareketliliği, kesim 6.1.2 'de anlatıldığı gibi sıcaklık ve

katkılama konsantrasyonuna bağlıdır [148]. Malzemeye daha fazla katkı atomu girdiğinde yük taşıyıcı mobilitesi Coulomb kuvvetleri nedeniyle azalır. Sıcaklık aynı zamanda fonon olarak adlandırılan örgü titreşimlerinden kaynaklı saçılmaya neden olur [149].

Katkılanan safsızlık miktarına bağlı olarak, GaN yarı iletken malzeme içerisindeki elektron mobilitésinin Silvaco ATLAS modellemesinden elde edilen değişim grafiğı 7. bölümde anlatılmıştır.

2. Derin Seviye Tuzakları

Yarı iletken fabrikasyon işleminden veya radyasyondan kaynaklı olarak, yarı iletken kristal yapı içerisinde kusurlar oluşmaktadır. Bu kusurlar, birim hücrede eksik veya fazla atomdan kaynaklı oluşan noktasal kusurlardır. Bu kusurlar, yarı iletken yapı içerisinde tuzak olarak adlandırılan ek enerji durumları yaratır. Tuzak enerji durumları, cihazın bant aralığı içindeki enerji düzeyleridir. Derin seviye tuzakları, değerlik ve iletkenlik bandından tamamen farklı enerji seviyesine sahiptir, malzeme içerisinde termal olarak aktive edilemez ve yük taşıyıcılarının rekombinasyonuna neden olurlar.

Silvaco ATLAS modellemesi kullanılarak, 5 keV elektron ışıını altında yarıiletken I-V grafiğinin tuzak yoğunluğına bağlı değişimi 7. Bölüm’de anlatılmıştır.

3. Yük Taşıyıcılarının Yaşam Süresi

Azınlık taşıyıcı yaşam süresi temel olarak 3 bileşenden oluşur. Bunlar, SRH (Shockley-Read-Hall), Auger ve radyatif olarak isimlendirilmiştir [129].

$$\frac{1}{\tau_{hacimsel}} = \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_{Auger}} + \frac{1}{\tau_{Radyatif}} \quad (6.1)$$

Burada SRH (Shockley-Read-Hall), yarı iletken içindeki yük taşıyıcılarının rekombinasyon mekanizmasını oluşturur. SRH türü rekombinasyon, malzeme kalitesine ve çalışma alanına bağlı olarak, Si veya SiC gibi benzer bant aralığına sahip malzemelerde rekombinasyonun temel mekanizmasıdır. Auger rekombinasyonu, yüksek akım yoğunluklarında belirgin bir etkiye sahiptir ancak

düşük akım yoğunluklarında (betavoltaik pil için) dikkate alınmaz. Benzer şekilde radyatif rekombinasyon da pil verimi üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahiptir.

a. Shockley-Read-Hall Yaşam Süresi Etkisi

Yarı iletkenlerdeki azınlık taşıyıcılarının yaşam süresi, kristalin üretim sürecinden veya radyasyon gibi nedenlerden dolayı oluşan kristal kusurlarından olumsuz etkilenir. Yaşam süresinin düşmesi, betavoltaik nükleer pilin akım-voltaj (I-V) karakteristik grafiğindeki diz noktasının düşmesine sebep olur. Diğer bir ifadeyle, azınlık taşıyıcı yaşam süresi ne kadar düşerse, I-V grafiğindeki diz voltajı daha düşük bir voltaj değerine kayar.

Silvaco ATLAS modellemesi kullanılarak, taşıyıcı yaşam süresine bağlı olarak elde edilen I-V grafiği, 7. bölüm - Şekil 7.3'de anlatılmıştır.

b. Radyatif Rekombinasyon Parametresi Etkisi

Radyatif rekombinasyonda, iletim bandındaki bir elektron, valans bandında bir deşik ile birleşir ve fazla enerji foton olarak dışarı verilir. Örneğin GaN malzemesi kullanıldığında dışarı verilen bu foton ultraviyole (UV) spektrumunda yayınlanır. Silvaco ATLAS modellemesi kullanılarak, 5 keV elektron ışıınımı altında radyatif rekombinasyon parametresinin akım-voltaj eğrisi üzerindeki etkisi Şekil 7.4'de anlatılmıştır.

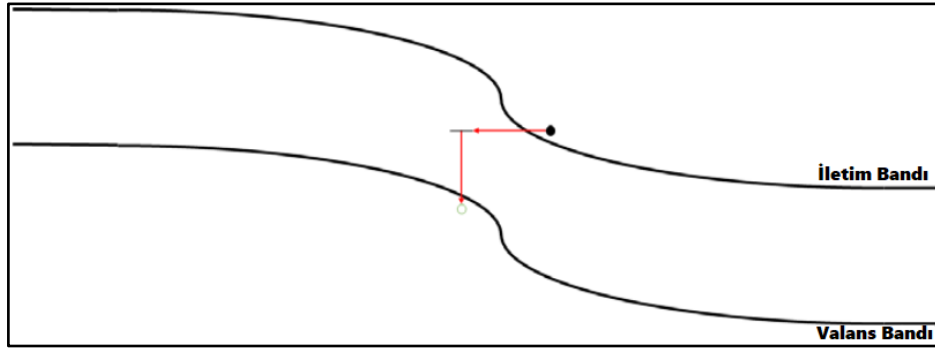
4. Yüzey rekombinasyonu

Yüzey rekombinasyonu, betavoltaik veya fotovoltaik pillerin difüzyon akımını ne kadar verimli toplayabildiğini açıklar. Kristal yapının yüzeyinde, yapının sonlanması nedeniyle bir kısım sarkan bağ kalır [150]. Bu sarkan bağlar, yük taşıyıcıların rekombinasyon yapabileceği aktif durumlar yaratır. Bu da yarı iletken tabanlı bir nükleer pildeki taşıyıcı ömrünü daha da azaltır. Yüzey rekombinasyonu, yük taşıyıcılarının yüzeyde yapacağı muhtemel rekombinasyona bağlı olarak, difüzyon akımının toplanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Difüzyon akımı, elektron-deşik çiftlerinin yarı iletken eklem içerisindeki dengeyi tekrar sağlamak için yaptıkları rastgele hareketleridir. Hareketin yönü, konsantrasyonu yüksek olan bölgeden düşük olan bölgeye doğrudur.

Silvaco ATLAS modellemesi kullanılarak, GaN malzeme için yüzey rekombinasyonunun I-V karakteristik eğrisi üzerindeki etkisi modellenmiş ve 7. Bölüm altında Şekil 7.5'de gösterilmiştir.

5. Tuzak Destekli Tünelleme

Tuzak destekli tünelleme, yük taşıyıcılarının bir tuzak enerji seviyesini kullanarak potansiyel engeli aşabileceğini ifade eden bir olgudur. Bu etki, çok düşük voltaj seviyelerinde akımın artmasına yol açabilir ve genellikle hetero yapılarda görülür [151]. Valans bandında deşik ile rekombinasyon yapan bir elektronun örnek gösterimi Şekil 6.7'de verilmiştir.



Şekil 6.7 Tuzak destekli tünelleme mekanizması

Şekilde görüldüğü gibi, bir elektron tuzak enerji seviyesini kullanarak değerlik bandına veya iletim bandına geçebilir. Böylece potansiyel engelden “tünelleme ” yapabilir.

6.1.2 Elektriksel Parametreler ve Verim Hesaplamaları

Yarı iletken filmlerin dislokasyon (kayma) yoğunluklarının azaltılarak iyileştirilmesi, yük toplama verimliliğini arttırmaktadır. Ancak, üretim teknolojisindeki sınırlamalarından dolayı geniş bant aralığına sahip yarı iletkenlerde kalın ve yüksek kaliteli kristal tabakalar oluşturulması zordur. Örneğin geniş bant aralığına sahip Galyum Nitrit (GaN) yarı iletkende daha geniş bir tüketim bölgesi oluşturmak, p tipi katkılama ile ilgili bir takım teknolojik sınırlamalardan dolayı oldukça zordur. Çünkü GaN, residual (artık) safsızlıklar

nedeniyle n-tipi iletkenliğe sahiptir. Bu nedenle i-tipi (intrinsik) ve p-tipi katmanlar oluşturmak zorlaşmaktadır [152].

P ve n tabakası arasında, yarı iletken katkılama sırasındaki safsızlıklara bağlı olarak, u-tipi tabaka (unintentionally layer) olarak adlandırılan üçüncü bir tabaka daha oluşur. Kendiliğinden oluştuğu için, istemsiz katkılı tabaka olarak da adlandırılır. Artık safsızlıklara bağlı olarak $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 'ün üzerinde bir elektron konsantrasyonuna sahip olan bu tabaka, nominal katkılı olarak büyütülmüştür. Fotovoltaik pillerde foton soğurma verimi veya betavoltaik nükleer pillerde yüksek enerjili beta parçacığı soğurma verimi artırmak için u-tipi tabakaya çeşitli safsızlıklar eklenerek, i-tipi tabaka olarak adlandırılan ara bir tabaka elde edilir [153]. i-tipi tabaka oluşturmak için, kullanılan yarı iletken malzemenin elektron konsantrasyonunun azaltılması gerekir. Örneğin, betavoltaik pil geliştirilmesi ile ilgili literatürde yapılan bir çalışmada, p-n GaN ve p-u-n GaN malzemeden yavaş yavaş p-i-n GaN tabakası geliştirilmiştir [154]. Çalışmada epitaksi büyütülürken kendiliğinden oluşan u-tipi bölge, demir (Fe) ile katkılanarak intrinsik tabaka (i-tipi bölge) elde edilmiştir. İşlemden elde edilen i-tipi bölgenin kalınlığı $0.9 \mu\text{m}$, Magnezyum (Mg) atomları ile katkılanmış p-tipi bölgenin kalınlığı $0.05 \mu\text{m}$ ve Silisyum (Si) ile katkılanmış n-tipi bölgenin kalınlığı $1 \mu\text{m}$ 'dir. Sonuçta, bu yöntemle p-i-n GaN yarı iletken eklemi elde edilmiştir.

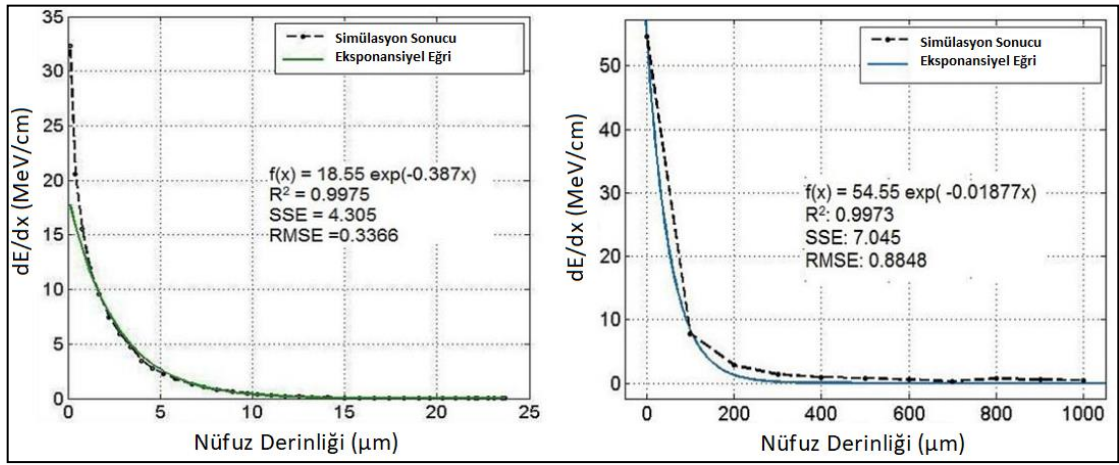
Radyoizotoptan yayınlanan beta parçacıkları nedeniyle yarı iletkenin tüm tabakalarında oluşan enerji birikimi ile penetrasyon derinliği arasındaki ilişki, denklem 2.9'da verilen iyonizasyondan kaynaklı enerji transfer ifadesinin yalnızca sağ tarafı gözönüne alınarak, denklem (6.2)'deki gibi eksponansiyel olarak ifade edilebilir. Böylece yarı iletkenin tüm ara tabakalarındaki enerji birikimi analitik olarak hesaplanabilir. Denklem,

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{toplama}} = \int f(E) \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{iyon}} dE = a_1 \exp(-a_2 x) \quad (6.2)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadenin sonucu olarak EHP üretim olasılığı, yarı iletkenin derinliği boyunca değişen beta parçacık enerjisinin bir fonksiyonu olarak belirlenir. Burada $f(E)$, E enerjili bir beta parçacığının yayınlanma olasılığı, a_1 ve

a_2 cihazın fiziksel özelliklerine ve geometrik konfigürasyonlarına bağlı olan katsayılarıdır.

Diğer yandan, literatürde yapılan farklı bir çalışmada ^{90}Sr ve ^{63}Ni radyoizotoplarından yayılan beta parçacıklarının silikonun farklı kalınlıklarında bıraktığı enerji miktarı analitik olarak hesaplandıktan sonra MCNP kodu ile modellenmiş ve yarı iletkenin farklı tabakalarındaki enerji birikiminin simülasyonla da elde edilebileceği gösterilmiştir [23]. Modelleme sonuçlarına ait grafikler Şekil 6.8’de verilmiştir.



Şekil 6.8 Silikon eklemi boyunca depolanan enerji (a) ^{63}Ni (b) ^{90}Sr

Betavoltaik nükleer pil tasarımında oldukça önemli diğer bir parametre tüketim bölgesi genişliğidir ve aşağıdaki şekilde hesaplanır [20].

$$W = \sqrt{V_{bi} \left(\frac{2\epsilon_r \epsilon_0}{q} \right) \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right)} \quad (6.3)$$

Burada yapısal (built-in) potansiyel V_{bi} ,

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \quad (6.4)$$

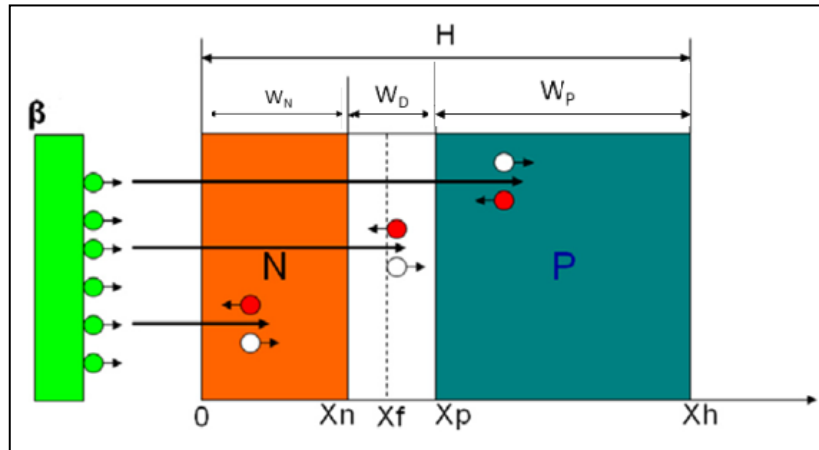
ile verilir. Burada ϵ_r ve ϵ_0 , sırasıyla ortamdaki ve vakumdaki dielektrik sabitleridir. N_a ve N_d sırasıyla, p-tipi (akseptör-alıcı) ve n-tipi (donör-verici) katkılama yoğunluklarını ve n_i intrinsik taşıyıcı yoğunluğunu ifade etmektedir.

Benzer şekilde Schottky eklemi için tüketim bölgesi genişliği,

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s V_{bi}}{qN_d}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s (\varphi_B \frac{kT}{q} \ln(\frac{N_c}{N_D}))}{qN_d}} \quad (6.5)$$

ile verilir [155]. Burada ε_s bağıl dielektrik sabitini, q elektronun yükünü, N_D katkılama yoğunluğunu, N_c yarı iletkenin iletim bandındaki etkin durum yoğunluğunu, φ_B Schottky bariyerinin yüksekliğini, k Boltzmann sabitini ve T Kelvin olarak sıcaklığı ifade etmektedir.

Farklı bölgelerdeki enerji absorpsiyonunun ayrıntılı olarak incelenmesi için, yarı iletken eklemdaki farklı bölgelerin genişliği ve radyoizotoptan yayınlanan beta parçacıklarının bu bölgeler içerisindeki etkileşimlerini gösteren teorik model Şekil 6.9'da verilmiştir.



Şekil 6.9 Betavoltaik pilin bir boyutlu şematik diyagramı

Şekilde, W_D tüketim bölgesinin toplam genişliğini, W_P p bölgesinin genişliği, H ise tüm yarı iletkenin kalınlığını ifade etmektedir. Tüketim bölgesi W_D 'nin genişliği yarı iletkene eklenen alıcı (akseptör) ve verici (donor) atomların katkılama yoğunluğuna bağlıdır. Yarı iletkenin toplam genişliği H , radyoizotoptan yayınlanan beta parçacıklarının ortalama enerjisine göre belirlenir.

Şekildeki radyoizotoptan izotropik olarak yayınlanan beta parçacıkları, ilk olarak n tipi yüzey ile etkileşir. Başlangıç kinetik enerjisine ve yönüne bağlı olarak, yarı

iletken eksenini boyunca içeri doğru nüfuz eder. Beta parçacıkları enerjilerinin bir kısmını, yaptıkları etkileşimler nedeniyle yarı iletkenindeki elektronlara aktarırlar. Bu sayede, elektronların kendi orbitallerini terk etmesi ve atomlarda boşluklar bırakması mümkün olur. Fotovoltaik pillere benzer şekilde, tüketim bölgesine ait azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğu içinde kalan elektron ve boşluklar, yarı iletkenindeki yapısal elektrik alandan dolayı birbirinden ayrılırlar ve şekildeki gibi farklı yönlerde doğru sürüklenirler [22].

Denklem (6.3) ve denklem (6.4)'ten, katkılama yoğunluğunun nükleer pil tasarımı için oldukça önemli bir parametre olduğu görülmektedir. Çünkü katkılama yoğunluğu doğrudan, tüketim bölgesi genişliğini, kısa devre devre akımını ve açık devre voltajını etkiler. Düşük katkılama yoğunluğu tüketim bölgesi genişliğini, azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğunu, EHP toplama verimini ve kısa devre akımını artırır. Ancak bu avantajlara sahip olmasına rağmen, düşük katkılama yoğunluğu aynı zamanda sızıntı akımını da artırır [30] ve bu durum açık devre voltajının düşmesine neden olur. Çünkü bu durumda, tüketim bölgesindeki elektrik alan da düşük olacağından yük taşıyıcıları rastgele (random) hareket etmeye başlarlar ve düşük olan yapısal potansiyel engelini aşarak yeniden birleşirler (rekombinasyon). Bu nedenle katkılama yoğunluğunun, en iyi pil performansını elde etmek için optimize edilmesi gerekmektedir. Literatürde betavoltaik nükleer pil verimi üzerine yapılan bir araştırmada, ^{63}Ni radyoizotop ile güçlendirilerek geliştirilmiş, $0.3\ \mu\text{m}$ 'lik ince eklem derinliğine sahip silikon tabanlı bir betavoltaik nükleer pilde, $10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ 'ten $10^{19}\ \text{cm}^{-3}$ 'e kadar yüksek katkılama yoğunluklu p-tipi bölge ile $10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ 'ten $10^{17}\ \text{cm}^{-3}$ 'e kadar düşük katkılama yoğunluğuna sahip n-tipi bölgenin, maksimum çıkış gücü elde etmek için ideal olduğu bulunmuştur [24].

İkinci durum, p-n eklemine her iki tarafındaki katkılama yoğunluklarının yüksek oranda farklı olmasıdır ve bu fark tüketim bölgesi genişliğini artırır. Ancak farkın yüksek olması aynı zamanda kristaldeki örgü kusurlarının artmasına ve rekombinasyona neden olur. Bu durum yarı iletken eklemine kaçak akımını artıracığından, çıkış gücünün düşmesine sebep olur [156]. Böyle bir durumda,

genellikle birkaç nA düzeyindeki küçük bir kaçak akım, betavoltaik nükleer pillerin performansını önemli ölçüde düşürür. Bunun nedeni, betavoltaik pillerde üretilen akımın zaten, nA ile μ A aralığında olmasıdır. Halbuki bir güneş pilinde üretilen akımın değeri, 1 mA ile 100 mA arasındadır [157]. Betavoltaik nükleer pillerde, bu kaçak akımı düşürmek ve elektrik dönüşüm verimini artırmak için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde, katkılama yoğunlukları oldukça farklı olan p ve n tabakaları arasına ara katmanlar (PDL) eklenmiştir. Bu katmanlar izolasyon etkisi yaratarak sızıntı akımını düşürürler. GaAs yarı iletkeni ile yapılan çalışmalarda $n^+ - p - p^+$, $p^+ - n - n^+$, $p^+ - p - n^+$ gibi birçok ara katman kombinasyonu denenmiştir. Sonuçta $p^+ - p - n^+$ eklemine 10 pA ile en düşük sızıntı akımına sahip olduğu bulunmuştur. Burada, p^+ ve n^+ , yüksek katkılama yoğunluğuna sahip p ve n tipi tabakayı ifade etmektedir.

Geniş tüketim bölgesi, sızıntı akımının yanında tabakalarda oluşan yüklerin toplanmasını da engeller. Azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğu tüketim bölgesi genişliğinden daha küçükse, yarı iletken eklemdaki yük toplama verimi azalacaktır. Örneğin literatürde bu konuyla ilgili bir çalışmada, teorik ve deneysel kısa devre akımının bir karşılaştırması yapılmış ve azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğunun tüketim bölgesi genişliğinin yarısı olması durumunda, oluşan EHP'lerin yalnızca yarısının toplanabildiği görülmüştür [158]. Sonuç olarak, çok eklemli bir yapının, tek eklemli ve geniş tüketim bölgesine sahip bir yapıdan daha iyi bir tasarım olacağı belirlenmiştir. Yapılan bu çalışmada kullanılan ^{63}Ni radyoizotopu için, GaAs yarı iletkeninde kullanılması gereken çoklu tabakaların sayısının 6 ile 10 arasında olması gerektiği belirlenmiştir.

Geniş tüketim bölgesi oluşturulmasının getirdiği dezavantajları azaltmak için, dar bir bölgede enerji depolama yoğunluğunu arttırmak gibi farklı bir çözüm daha geliştirilmiştir. Bu amaçla, birçok yarı iletken eklemine üst tabakasındaki enerji depolama miktarları ve beta parçacıklarının yarı iletken eklemdaki menzili karşılaştırılmıştır. Sonuçta Si/SiC hetero eklemi, Si, GaN, GaAs, SiC, InGaP homo eklemleri ve bunların Si katkılanmış hetero eklemleri arasında en iyi enerji depolama özelliğini göstermiştir [159]. Si/SiC için elde edilen sonuçlar, $0.3 \mu\text{m}$ kalınlığındaki üst tabakada %24.6 oranında enerji depolandığını göstermiştir.

Denklem (2.15)'te ifade edildiği gibi Ni-63 kaynağından yayılan ortalama 17.4 keV enerjili beta parçacıklarının silikon yarı iletkenindeki menzili $2.1 \mu\text{m}$ 'dir. Sonuçta, üst tabaka çıkarıldığında maksimum enerjinin depolandığı tüketim bölgesi kalınlığı $1.8 \mu\text{m}$ 'ye düşürülmüş olur. Diğer yandan SiC, kesim 6.1.4'te anlatıldığı gibi, saf Si yarı iletkeninden daha yüksek bir radyasyon eşik enerjisine sahiptir.

Dar bir bölgede enerji depolama yoğunluğunu arttırmak için, tüketim bölgesi dışında oluşan EHP'lerin toplanma olasılığının bilinmesi gerekir. Bunun matematiksel ifadesi denklem (6.6) ile verilir [28].

$$CE = 1 - \tanh \frac{d}{L} \quad (6.6)$$

Burada CE, EHP'leri toplama olasılığı, d tükenme bölgesi sınırına olan mesafe ve L, n-tipi veya p-tipi malzemedeki azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğudur. Denklem (6.6), p-n eklem kalınlığı ve tüketim bölgesi genişliğinin, beta parçacıklarının bu eklemdeki penetrasyon derinliğine göre ayarlanması gerektiğini ifade eder. Maksimum EHP'nin toplanması için, gelen beta parçacıklarının enerjisinin büyük bir kısmı tüketim bölgesi içerisinde soğurulmalıdır. Bu nedenle yarı iletken eklemde ne kadar geniş tüketim bölgesi oluşturulabilirse, o kadar çok EHP üretilir [20].

EHP'lerin toplanma verimliliği, yukarıda bahsedilen basitleştirilmiş modelin yanında, "Sürüklenme-Difüzyon Modeli" adı verilen başka bir model ile de hesaplanmaktadır [30]. Bu modelde, tüketim bölgesi dışında oluşturulan EHP'lerin, bu bölgelerden tüketim bölgesine difüzyon yolu ile toplandığı kabul edilir. Modelde, yarı iletken akımın oluşmasına en büyük katkıyı tüketim bölgesindeki ve tüketim bölgesinden bir azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğuna kadar mesafede oluşan EHP'ler sağlamaktadır [85]. Çünkü modelde, tüketim bölgesinde oluşturulan tüm EHP'lerin akım olarak toplandığı varsayılmaktadır. Yani tüketim bölgesinde üretilen EHP'lerin toplama verimliliği yaklaşık olarak % 100'dür ve tüketim bölgesinden bir azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğu içerisinde oluşturulan EHP'lerin toplanma olasılığı yüksektir [160]. Bunun sonucu olarak,

tüketim bölgesi dışında oluşan EHP'lerin toplanma verimliliği, tüketim bölgesine olan uzaklığın bir fonksiyonudur [69].

Oluşacak EHP'lerin hesaplanması için ilk olarak denklem (6.7)'de verilen azınlık taşıyıcı formülü, yarı iletken eklemnin sınır koşulları kullanılarak çözümlenmelidir. Bu şekilde beta radyasyonundan dolayı oluşan toplam akım yoğunluğu ifadesi elde edilebilir [161].

$$D_p \frac{\partial p_n}{\partial x^2} + G(x) - \frac{p_n - p_{n_0}}{\tau_p} = 0 \quad (6.7)$$

Burada p_n ve p_{n_0} sırasıyla, radyoizotop varlığında ve yokluğundaki deşik konsantrasyonlarıdır. D_p deşik difüzyon katsayısı, G ise EHP üretim hızıdır ve aşağıdaki şekilde ifade edilir [162].

$$G(x) = A \frac{(-\frac{dE}{dx})_{toplam}}{E_{EHP}} = A \frac{a_1 \exp(-a_2 x)}{E_{EHP}} \quad (6.8)$$

Burada E_{EHP} , bir elektron deşik çifti (EHP) oluşturmak için gereken enerji, A ise aktivitedir. Yarı iletkenlerde bir EHP oluşturmak için gerekli enerji o yarı iletkenin enerji bant aralığının bir fonksiyonu olup denklem (6.9) ile ifade edilir.

$$E_{EHP} = 2.8E_g + 0.5 \quad (6.9)$$

Örneğin bant aralığı 1.12 eV olan Si yarı iletkeni için bir EHP oluşturmak için gereken enerji 3.6 eV iken, GaN yarı iletkeni için bu değer 10.3 eV'dir [65].

Tüketim bölgesinde üretilen EHP'lerin toplanma verimi %100 olarak kabul edildiğinde kısa devre akım yoğunluğu,

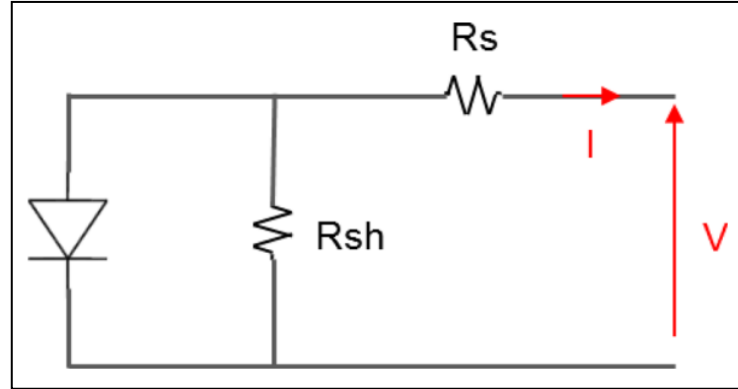
$$J_{sc} = \frac{Aq}{E_{EHP}} \sum_{n=1}^n CE(n)x E(n) \quad (6.10)$$

şeklinde ifade edilebilir [28]. Burada A radyoaktivite (Bq/s), E_{EHP} yarı iletkende bir EHP çifti oluşturmak için gerekli enerji ve $E(n)$ yarı iletkenin n . tabakasının depoladığı beta radyasyon enerjisidir.

İdeal durumda, radyasyondan dolayı oluşan akım yoğunluğunun kısa devre akım yoğunluğuna eşit olduğu kabul edilir. Bu durumda toplam akım yoğunluğu, yarı iletkenin p-tipi, n-tipi ve tüketim bölgesi tabakalarında üretilen akımların toplamı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [85].

$$J_{rad} = J_{sc} = J_n + J_p + J_D \quad (6.11)$$

Denklemden ifade edilen kısa devre akımı, betavoltaik devre modeli ile kolayca açıklanabilir. Bu modelde, Şekil 6.10'da gösterildiği gibi betavoltaik bir hücrenin eşdeğer devre modeli bir akım kaynağı, diyot, şant direnci, seri dirençten oluşur [163]. Burada akım kaynağı radyoizotopu, diyot GaN yarı iletkenini temsil eder. Diyotun karakteristik değerleri GaN'ın fiziksel parametreleri ile kontrol edilir. Şant direnci, sızıntı ve taşıyıcı rekombinasyonundan dolayı oluşan direnci, seri direnç ise metal kontaklardan ve yarı iletkenin kenar bölgelerinden gelen iç direnci temsil etmektedir [164]. Bu dirençler, yarı iletkenin üretim aşamasında oluşmaktadır.



Şekil 6.10 p-n eklemli betavoltaik pilin örnek eşdeğer bir devre modeli

Devre çözümlemesi yapıldığında,

$$I = I_{rad} - I_{diyot} - I_{sh} \quad (6.12)$$

$$I = I_{rad} - I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V}{R_{sh}} \quad (6.13)$$

yazılabilir. İdeal durumda $I_{rad} = I_{sc}$ olduğundan betavoltaik pilin çıkış akım yoğunluğu aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [165].

$$J_{toplam}(V) = J_{sc} - J_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (6.14)$$

Açık devre voltajı betavoltaik pilin ürettiği en yüksek voltaj değeridir. Matematiksel ifadesini bulmak için denklem (6.13) ifadesindeki toplam akım değerini sıfıra eşitlemek yeterlidir. Bu durumda açık devre voltajı,

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \frac{J_{sc}}{J_0} \quad (6.15)$$

bulunur [166]. Burada q elektronun yükü, T sıcaklık (Kelvin) ve k Boltzman sabitidir. J_0 ters doyma akım yoğunluğu olup,

$$J_0 = 1.5 \times 10^5 \exp(-E_g/kT) \quad (6.16)$$

şeklinde tanımlanır [167]. Betavoltaik pilde üretilen maksimum güç değeri,

$$P_{max} = V_{max} J_{max} \quad (6.17)$$

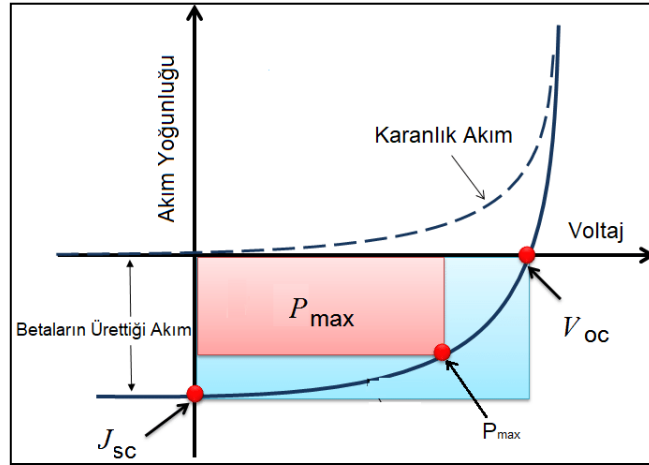
ile verilir. Burada V_{max} ve J_{max} sırasıyla maksimum güç değerine karşılık gelen maksimum voltaj ve akım yoğunluğudur.

Güneş pillerine benzer şekilde, betavoltaik pilin verimini belirlemede kullanılan önemli bir parametre “*Dolum Faktörü (FF)*”dür. Dolum faktörü (FF) yarı iletkenin yapısal parametrelerinden biri olup I-V eğrisinin kareselliğinin bir ölçüsüdür. Karanlık ortam ve beta radyasyonu altında elde edilecek örnek bir betavoltaik I-V eğrisi şekil 6.11’de verilmiştir [168]. Şekildeki akım-voltaj eğrisinin Y eksenini kestiği nokta kısa devre akım yoğunluğunu, X eksenini kestiği nokta ise açık devre voltajını vermektedir. Karanlık akım eğrisi, ideal durumda diyotun açılma gerilimine kadar Y ekseninin sıfır noktasından geçmelidir.

Dolum faktörünün değeri, betavoltaik pilin akım-voltaj grafiğindeki maksimum güç noktasında en yüksek değerine ulaşır. Matematiksel ifadesi,

$$FF = \frac{V_{max} J_{max}}{V_{oc} J_{sc}} \quad (6.18)$$

şeklinde tanımlanır [20].



Şekil 6.11 P-N eklemnin karanlık ve beta radyasyonu altındaki J-V eğrisi

Üretilen maksimum güç değeri (P_{max}),

$$P_{çıkış} = FF (V_{oc} J_{sc}) \quad (6.19)$$

şeklinde ifade edilir. Gücün maksimum değeri (P_{max}), Şekil 6.11’de verilen akım, voltaj ve dolum faktörünün çarpımı olarak aşağıdaki şekilde de ifade edilebilir.

$$P_{max} = J_{sc} V_{oc} FF \quad (6.20)$$

Dolum faktörünün deneysel ifadesi, Denklem (6.18)’in yanında açık devre voltajının fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde de hesaplanabilir.

$$FF = \frac{V_{oc} - \ln(V_{oc} + 0.72)}{V_{oc} + 1} \quad (6.21)$$

Betavoltaik nükleer pilin radyasyon-elektrik dönüşüm verimliliği denklem (6.22) ile ifade edilir.

$$\eta = \frac{P_{çıkış}}{P_{giriş}} = \frac{V_{oc} J_{sc} FF}{e A E_{\beta,ort}} \quad (6.22)$$

Burada $P_{giriş}$, kullanılan radyoizotopun gücüdür. $E_{\beta,ort}$ kaynağın ortalama beta enerjisi, A Becquerel (Bq) biriminde aktivitesidir. İnce filmden yarı iletkene giren

beta parçacıklarının toplam gücüdür. Denklem (6.18)'deki ifadeye benzer şekilde verim değeri, maksimum akım voltaj değerleri cinsinden,

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{giris}} = \frac{V_{max} J_{max}}{eAE_{\beta,ort}} \quad (6.23)$$

şeklinde de ifade edilebilir.

6.1.3 Sıcaklık Değişimlerinin Betavoltaik Nükleer Pilin Elektrik Performansına Etkisi

Betavoltaik nükleer pillerin ürettiği güç ve elektrik dönüşüm verimliliği, temel olarak iki yöntemle artırılabilir. Bunlardan birincisi, yüksek enerjili bir radyoizotop kaynağı kullanılması, ikincisi ise p-n bileşiminin farklı ara tabakalar eklenerek geliştirilmesidir [169]. Ancak pil performansını etkileyen çevresel faktörler de bulunmaktadır. Bu faktörlerin başında yarı iletkenin çalışma sıcaklığı gelir. Yarı iletkenlerde difüzyon uzunluğu (L), yapısal (intrinsik) taşıyıcı yoğunluğu (n_i) ve taşıyıcı mobilitesi (μ), sıcaklığın bir fonksiyonudur. Diğer yandan difüzyon uzunluğu kısa devre akımını (I_{sc}), intrinsik taşıyıcı yoğunluğu ise kaçak akımı (I_o) doğrudan etkiler. Çalışma sıcaklığında meydana gelen bir artış, dolum faktörü değerini (FF) ve açık devre voltajını düşürür. Bu nedenle cihaz performansını (η) azaltır. Kısa devre akımı ise, çalışma sıcaklığındaki değişimden oldukça az etkilenir. Ancak açık devre voltajı düştüğünden dolayı, Betavoltaik nükleer pillerin çıkış gücü sıcaklıktaki artışla neredeyse doğrusal olarak azalır [170].

Betavoltaik nükleer pile ait performans parametrelerinin sıcaklığa bağlı değişimleri aşağıda ayrıntılı olarak incelenmiştir.

a. Kısa Devre Akımının (I_{sc}) Sıcaklığa Bağlı Değişimi:

Kısa devre akımının (I_{sc}) sıcaklığa bağlı değişimi, difüzyon uzunluğu (L) nin bir fonksiyonu olarak ortaya çıkar. Burada difüzyon uzunluğu aşağıdaki gibi ifade edilir [171],

$$L = (D\tau)^{1/2} \quad (6.24)$$

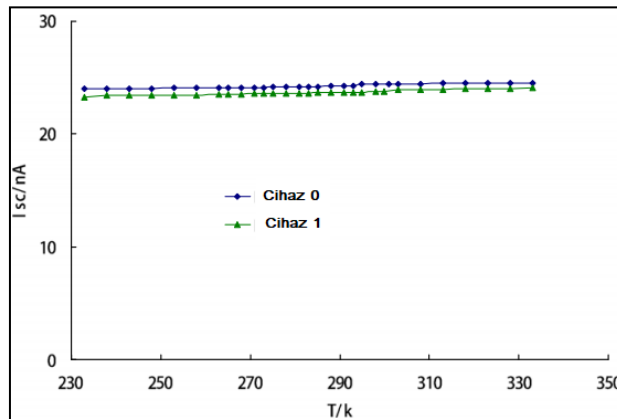
Burada D difüzyon katsayısı ve τ taşıyıcı yaşam süresidir. Difüzyon katsayısı D, mobilite (μ) ile denklem (6.25)'teki gibi doğru orantılı olduğundan, Einstein bağıntısı denklem (6.26)'daki gibi ifade edilebilir [172].

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q} \quad (6.25)$$

$$\mu_{n,p} = \mu_{on,p} + \frac{\mu_{1n,p}}{1 + \left(\frac{N_{a,d}}{N_{n,p}}\right)^{\gamma_{n,p}}} (T/300)^{\alpha_{n,p}} \quad (6.26)$$

Burada alt indis olarak verilen n ve p, N ve P tipi bölgelerini ifade etmektedir. Denklem (6.24) bağıntısına göre μ parametresi sıcaklıkla oldukça yavaş değiştiğinden dolayı, difüzyon katsayısının (D), difüzyon uzunluğu (L) üzerindeki etkisi oldukça düşüktür.

Kısa devre akımı I_{sc} ile ilgili diğer bir faktör EHP üretim hızıdır. Üretim hızı sıcaklığa bağlı olarak yavaşça artar. Bu artış, bant enerji aralığının düşmesinden dolayı elektron-deşik çifti sayısının artmasından kaynaklanır. Ancak üretim hızındaki sıcaklığa bağlı bu artış oldukça küçüktür. Bu nedenle kısa devre akımının sıcaklığa bağlı değişimi ihmal edilebilir. Şekil 6.12'de, yapılan bir deneysel çalışmada elde edilen I_{sc} - T grafiği gösterilmiştir [172].



Şekil 6.12 Kısa devre akımının (I_{sc}) sıcaklığa bağlı değişimi

b. Açık Devre Voltajının (V_{oc}) Sıcaklığa Bağlı Değişimi:

Betavoltaik nükleer pillerde, n_i , $\mu_{n,p}$ and I_0 karakteristik parametreleri sıcaklık (T) ile doğru orantılı olarak değiştiğinden dolayı, açık devre voltajı (V_{oc}) üzerinde sıcaklığın etkisi büyüktür. İntrinsik taşıyıcı yoğunluğunun (n_i) sıcaklığa bağlı matematiksel ifadesi,

$$n_i = 3.87 \times 10^{16} T^{3/2} \exp\left(-\frac{0.605 eV}{kT}\right) \quad (6.27)$$

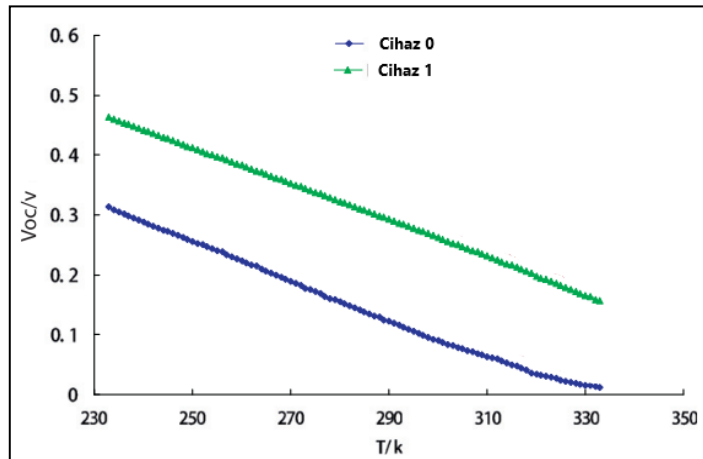
şeklinde verilir. Burada k Boltzman sabitidir. Kaçak akımın (I_0) matematiksel ifadesi ise,

$$I_0 = sqn_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_a} + \frac{D_p}{L_p N_d} \right) \quad (6.28)$$

şeklindedir. Sonuç olarak açık devre voltajı V_{oc} 'nin sıcaklığa bağlı ifadesi,

$$V_{oc} = \frac{AkT}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right) \quad (6.29)$$

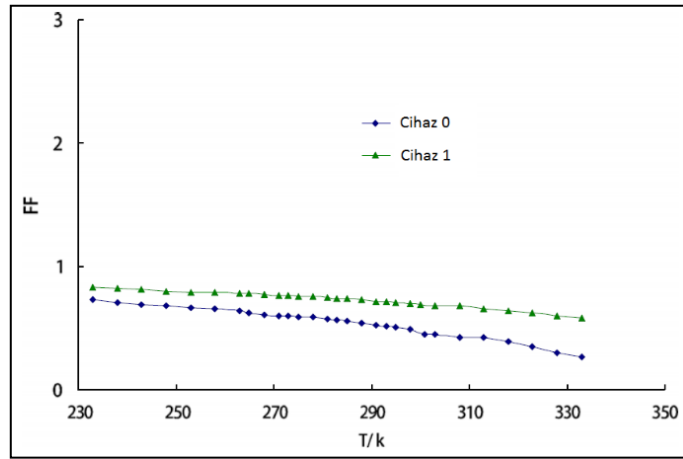
olarak ifade edilir [165]. Denklem (6.29)'dan görüldüğü gibi V_{oc} 'nin sıcaklığa bağımlılığı başlıca kaçak akımdan (I_0) kaynaklanır. Şekil 6.13'te V_{oc} 'nin sıcaklığa bağlı değişimi verilmiştir.



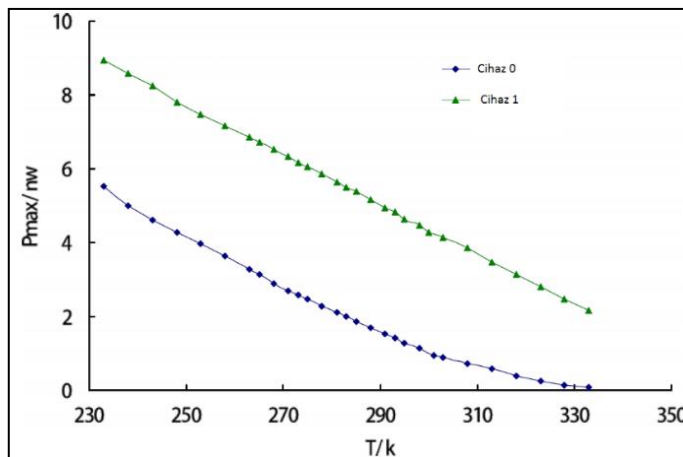
Şekil 6.13 Açık devre voltajının (V_{oc}) sıcaklığa bağlı değişimi

c. Maksimum Güç (P_{max}) ve Verimin (η) Sıcaklığa Bağlı Değişimi:

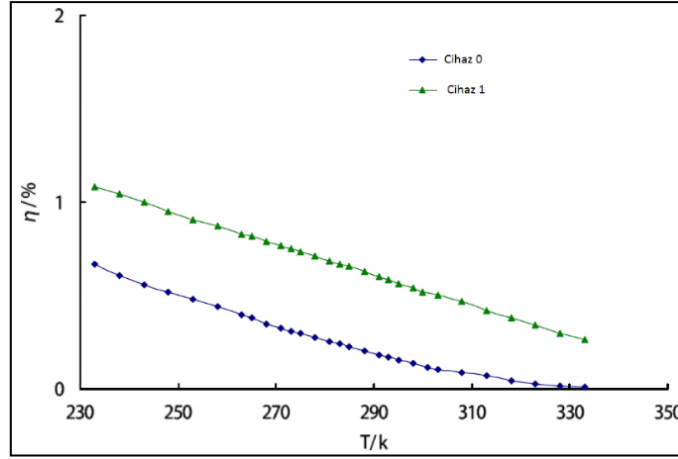
Betavoltaik pilin elektriksel performansı, yukarıda bahsedildiği gibi doğrudan V_{oc} ve I_{sc} tarafından belirlenir. Maksimum çıkış gücü, dolum faktörü ve pilin verimi, I-V eğrisinin bir sonucu olarak ortaya çıkar. I_{sc} 'nin göreceli olarak sabit kalmasına rağmen V_{oc} 'nin ve dolum faktörünün (FF) değeri sıcaklığa bağlı olarak düşer. Bunun sonucu olarak, denklem (6.20) ve denklem (6.23)'te verilen, çıkış gücü (P_{max}) ve verim (η) değerleri, sıcaklıkla beraber önemli ölçüde azalır. Bu durum, Şekil 6.14, Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'da gösterilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi dolum faktörü, maksimum çıkış gücü ve verim değerleri sıcaklıkla ters orantılı olarak azalmaktadır.



Şekil 6.14 Dolum faktörünün sıcaklığa bağlı değişimi.



Şekil 6.15 Maksimum gücün (P_{max}) sıcaklığa bağlı değişimi



Şekil 6.16 Pil veriminin (η) sıcaklığa bağlı değişimi

6.1.4 Geniş Bant Aralıklı Yarı İletkenler ve Radyasyon Dayanıklılığı

Betavoltaik nükleer pilin zaman içindeki performansı, yarı iletken malzemelerin radyasyona bağlı bozulmasından dolayı düşebilir. Bu durum meydana geldiğinde, pilin güç çıkışı ve ömrü azalır. Literatürde bu konuda yapılan farklı araştırmalarda, radyasyon hasarını belirlemek için birçok farklı ölçüm ve teorik hesaplama yapılmıştır. Bu hesaplamalarda; çıkış gücündeki azalma, kapasitans-gerilim (C-V) değeri, azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğu, yük taşıyıcı konsantrasyonu, açık devre voltajı ve radyasyon hasar faktörü gibi parametreler yer alır. Bununla birlikte, tek bir parametre radyasyon hasarına bağlı bozulmayı tespit etmek için yeterli olmayabilir. Örneğin pilin çıkış gücü, radyasyon hasarının yanında, radyoaktif kaynağın yarı ömrüne bağlı olarak da azaldığından dolayı, radyasyon bozulmasının bir göstergesi olmayabilir. Bu nedenle, radyasyon hasar etkisi, pilin çıkış gücü ölçülerek tespit ediliyorsa, kaynağın bozunma faktörü de hesaba katılmalıdır.

Diğer yandan, radyoaktif kaynaktan yayınlanan beta parçacıklarının yarı iletkende oluşturacağı hasar hem beta parçacıklarının enerjisine hem de yarı iletken malzemenin radyasyon dayanıklılığına bağlıdır. Genel olarak, malzemede radyasyon hasarı meydana gelme olasılığı, radyasyonun enerjisi azaltılarak veya malzemenin atomik bağlarının kuvveti artırılarak minimize edilebilir. Malzemede radyasyondan kaynaklı kusurların oluşması sürecinde, yeterli miktarda enerji

soğurulduktan sonra atomik bağlar kırılır. Geniş bant aralığına sahip yarı iletken malzemeler, yapılarında sahip oldukları minimum difüzyon ile daha yüksek bir bağlanma kuvvetine sahiptir. Diğer bir ifadeyle, radyasyon bu malzemelerde düşük yayılma gücüne sahip olduğundan dolayı, radyasyon dayanıklılıkları yüksektir [173]. Ancak bunun yanında, düşük yayılma gücü, p-n eklemi oluşturmak için yeterince katkılama yapılmasını zorlaştırmaktadır.

Radyasyon eşik enerjisi yüksek ve betavoltaik nükleer pil tasarımında kullanılan yarı iletken malzemeler başlıca; GaN, SiC, GaAs, $Al_{0.7}Ga_{0.3}N$, a-Si:H, AlGaAs, InP, InGaP ve elmadır [174]. Bu kesimde, geniş bant yarı iletkenlerin özelliklerini ve bu yarı iletkenler kullanılarak geliştirilmiş betavoltaik nükleer pillerdeki elde edilen maksimum verim ve güç değerlerini incelemek uygun olacaktır.

a. GaN Tabanlı Betavoltaik Nükleer Piller

Galyum Nitrit (GaN), betavoltaik nükleer pillerde kullanımı oldukça uygun, geniş enerji bant aralığına sahip (3.4 eV) ve radyasyon bozulma eşik enerji düzeyi yüksek olan bir yarı iletkenidir. Radyasyon dayanıklılığı nedeniyle uzay uygulamalarında da kullanılmaktadır. GaN'ın radyasyon eşik değerini belirlemek amacıyla 300 keV – 1400 keV enerji aralığındaki elektronlarla oda sıcaklığında yapılan bir deneyde atomik yer değiştirme enerjisi (bozulma eşik enerji düzeyi), 440 keV (19 ± 2 eV) olarak bulunmuştur [175]. Atomik yer değiştirme enerjisi, kristaldeki bir atomu, bulunduğu kristal örgü bölgesinden kusurlu örgü noktasına geçirmek için gerekli minimum kinetik enerjidir [176]. Yapılan araştırmalarda nitrojen atomları için herhangi bir atomik yer değiştirme enerjisi belirlenmemiştir [177]. GaN'ın radyasyon eşik enerjisi, betavoltaik pillerde yaygın olarak kullanılan SiC ve GaAs'den çok daha yüksektir [178]. GaAs'e kıyasla GaN yarı iletkeni bozmak için, aynı enerjide iki kat daha yüksek bir radyasyon akısı gerekir. GaN'in diğer birçok yarı iletken malzemeye göre, daha iyi bir eşik enerjisine sahip olmasının nedeni, radyasyon karşısındaki atomik yer değiştirmesinin çok küçük olması ve bağlanma gücünün yüksek olmasıdır [179]. Ayrıca GaN yarı iletkeni içerisinde düşük atom numaralı yoğun nitrit içerikli malzeme olması da radyasyon

dayanıklılığını artırmaktadır. Düşük atom numaralı malzemeler, örgü içerisindeki çekirdek elektronlarının, radyoaktif kaynaktan gelen yüksek enerjili elektronlarla etkileşimini azaltır. Böylece, radyasyon nedeniyle, kristal örgüde daha az kusur oluşur. Örneğin, 5.8 eV geniş bant aralıklı $Al_{0.7}Ga_{0.3}N$ yarı iletkeni, Si yarı iletkeninden altı kat daha yüksek radyasyon direncine sahiptir. Bunun nedeni yapısında düşük atom numaralı alüminyum ve nitrat bulunmasıdır. Geniş bant aralığına sahip yarı iletkenlerde kaçak akım çok düşük olduğundan dolayı, radyasyon toleransına ek olarak çıkış gücü ve enerji dönüşüm verimliliği de daha yüksektir. Bununla birlikte, enerji bant aralığının çok büyük olması durumunda, yarı iletkenin iletkenliğini azalacak ve bu durum yük toplama işlemini engelleyecektir. Yarı iletkeninde oluşan radyasyon hasarını belirlemek amacıyla birçok farklı çalışma yapılmış ve radyoizotoptan yayılan beta parçacık enerjisinin, yarı iletkenin eşik enerji düzeyinden düşük olduğu durumlarda, bozulduğuna ilişkin deneysel bir bulguya rastlanmamıştır. Yapılan farklı bir çalışmada, 317 keV beta enerjisine ve 1.33 MeV gama enerjisine sahip Co-60 kaynağı ile Si güneş hücresi ve GaN malzeme ışınlanmıştır. Sonuçta her iki yarı iletkenin açık devre voltajındaki düşüş ölçülerek, oluşan radyasyon hasarı incelenmiştir. Açık devre voltajı, azınlık taşıyıcı ömrü ile ilgili olduğundan dolayı, ışınlama sonucunda GaN azınlık taşıyıcı ömrü beşte birine düşmüştür. Bunun sonucu olarak açık devre voltajı ise %1.6 oranında azalmıştır. Si güneş hücresinde ise, azınlık taşıyıcı ömrü 52 kat düşerken açık devre voltajı %25 oranında azalmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar, GaN yarı iletkeninin eşik enerjisinden daha yüksek bir radyasyon ışınlamına maruz kaldığında bile, kristal yapısında çok fazla bozulma olmadığını göstermiştir [89]. Literatürde, GaN yarı iletken tabanlı betavoltaik nükleer pillerin MCNP modelleme sonuçlarından elde edilen maksimum açık devre voltajı, kısa devre akımı ve verim değerleri maksimum, 3 V ve $1.6 \mu A/cm^2$ ve %13 civarındadır [20]. Teorik araştırmalarda analitik hesaplama ile elde edilen verim ise maksimum %25 civarındadır. Ancak Tablo 6.1’de görüldüğü gibi, literatürde elde edilen deneysel sonuçlar analitik hesaplama ve modelleme sonuçlarından oldukça düşüktür [160], [28],[30]. Bu farkın nedenlerinden birincisi, gerçek eklem derinliğinin simülasyonlarda varsayılan eklem derinliğine göre çok düşük olması,

ikincisi, cm^2 boyutunda üretilen yarı iletkenlerde üretimden kaynaklı örgü kusurları nedeniyle rekombinasyon meydana gelmesi, üçüncüsü ise, GaN yarı iletken üretimindeki p-tipi bölgenin kristal kalitesinin düşük olması nedeniyle kaçak akım oluşmasıdır.

Tablo 6.1 Literatürde GaN için elde edilen bazı deneysel sonuçlar

Yarıiletken Tipi	Kaynak (Aktivite) (mCi/cm^2)	(V_{oc}) V	I_{sc} (nA/cm^2)	P_{max} (nW/cm^2)	Verim (%)	Dolum F. (FF)
GaN (Schottky)	Ni-63 (3)	0.1	1.2		< 0.32	
GaN (p-n)	Ni-63 (11)	0.025	2		< 1	
GaN (p-i-n)	Ni-63(12.5)	0.47	17	2.72	0.21	0.34
GaN (p-i-n)	Ni-63(12.5)	1.65	12	10.69	0.82	0.54

GaN için elde edilen en yüksek deneysel verim değeri %1.13 civarındadır [160]. Bunun yanında alüminyum katkılı $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{N}$ yarı iletkeni ile yapılan modelleme ve teorik hesaplamalara göre %27.4 dönüşüm verimi elde etmek mümkündür ancak şimdiye kadar bu yarı iletken ile ilgili benzer deneysel bir sonuç bulunmamıştır [55].

b. SiC Tabanlı Betavoltaik Nükleer Piller:

4H-SiC yarı iletken kristali hekzagonal yapıda olup 3.3 eV bant enerji aralığına sahiptir [180]. SiC, gerek yüksek kalitede alt tabaka büyütme imkânı, gerekse epitaksiyel büyütme teknolojisinin ilerlemesi sayesinde betavoltaik nükleer pil için oldukça uygun bir malzemedir [4]. Ayrıca yukarıda bahsedilen geniş bant aralıklı yarı iletkenlerin arasında, radyasyon dayanıklılığı ve elektriksel dönüşüm

verimliliği açısından, SiC ve GaN, betavoltaik pillerde kullanılan en popüler yarı iletkenlerdir.

Tablo 6.2’de, literatürde geliştirilen bazı SiC tabanlı betavoltaik piler için elde edilen deneysel sonuçlar verilmiştir [4], [18], [32]. Bunların arasında en yüksek güce sahip olan model, 820 mCi aktiviteli P-33 radyoizotop ile geliştirilen nükleer pildir. Ancak P-33, 25 gün gibi oldukça kısa bir yarı ömre sahiptir. Bu durumda, araştırma çalışmaları dışında, ticari betavoltaik nükleer pillerde olarak kullanılması uygun olmayacaktır. Ni-63 ile geliştirilen SiC tabanlı betavoltaik nükleer piller ise GaN ile benzer verim ve güç değerlerine sahiptir [181].

Tablo 6.2 Literatürde SiC için elde edilen bazı deneysel sonuçlar

Yarıiletken Tipi	Radyoaktivite (mCi/cm ²)	Açık Devre Voltajı (V _{oc})	Kısa Devre Akımı (nA/cm ²)	Maksimum Güç (nW/cm ²)	Toplam Verim (%)	Dolum Faktörü (FF)
SiC (p-i-n)	P-33 (820)	2.04	2000	2100	0.56	0.51
SiC (p-n)	Ni-63 (1.5)	1.9	30			
SiC (p-i-n)	Ni-63 (4), (2.4)	(0.98), (0.95)	(12.75), (5.25)	(8), (3.5)	(1.99), (1.5)	(0.64), (0.75)

c. GaAs Tabanlı Betavoltaik Nükleer Piller:

GaAs yarı iletkeni 1.42 eV bant enerji aralığına sahiptir. Bu değer 1.17 eV bant enerji aralığına sahip Si yarı iletkenine oldukça yakındır. Literatürde geliştirilen GaAs tabanlı nükleer pillerin açık devre voltajı maksimum 0.3 V civarında olup, kısa devre akımları 0.3 nA/cm²’den 28 nA/cm²’ye kadar değişmektedir. Alüminyum katkılı AlGaAs tabanlı geliştirilen piller, GaAs’e göre daha yüksek verim ve çıkış gücüne sahiptir [141], [70].

d. a-Si:H ve Selenyum (Se) Tabanlı Betavoltaik Nükleer Piller:

a-Si:H, hidrojenleşmiş amorf silikon olarak adlandırılır. Yapısında bulunan hidrojen, malzemedeki bağ kusurlarını azaltır. Selenyum ise, $\text{Se}_{65}\text{S}_{35}$ karışımı ile oluşturulan sıvı bir yarı iletkenidir. Erime sıcaklığı 105°C 'dir. Her ikisi de kristal yapıda olmamalarından dolayı, radyasyondan kaynaklı kusurların oluşması söz konusu değildir. Bu açıdan nükleer pil çalışmalarında kullanılmaları uygundur. Literatürde kristal yapıda olmayan bu tip yarı iletkenler için radyoizotop kaynak olarak trityum veya trityumlanmış metal kullanılmıştır. Ancak diğer bazı araştırmacılar tarafından sıvı yarı iletken malzemeler için radyoaktif kaynak olarak, 87.9 yıl yarı ömre ve 167 keV maksimum beta enerjisine sahip sülfür (S-35) denenmiştir.

a-SiC:H'de kristal yapıya yarı iletken bir malzemedir. Düşük maliyetli olmasının yanında oldukça iyi optoelektronik özelliklere sahiptir. a-SiC:H tabanlı nükleer pillerin şimdiye kadar elde edilen en yüksek açık devre voltajı 0.46, kısa devre akımı 637 nA/cm^2 ve gücü 136 nW/cm^2 civarındadır [89]. Ancak radyoizotop olarak kullanılan trityum gaz formunda olmasından dolayı pilin çıkış gücünün hızlı bir şekilde düştüğü gözlenmiştir. Bunun sonucu olarak, bu tip pillerin açık devre voltajı 0.02 V ile 0.46 V arasında, kısa devre akımı ise 5.3 nA ile 637 nA gibi geniş bir aralıkta değişmektedir. Bu da diğer yarı iletken tabanlı nükleer pillerle karşılaştırılmasını zorlaştırmaktadır.

Diğer yandan, sıvı selenyum yarı iletken malzemesi ile yapılan çalışmalarda, S-35 radyoizotopu ile güçlendirilmiş nükleer pillerin ürettiği açık devre voltajı 0.34, kısa devre akımı 104.4 nA ve ürettiği güç 15.58 nW/cm^2 olarak ölçülmüştür. Geliştirilen nükleer pil 140°C 'de çalıştırılmıştır.

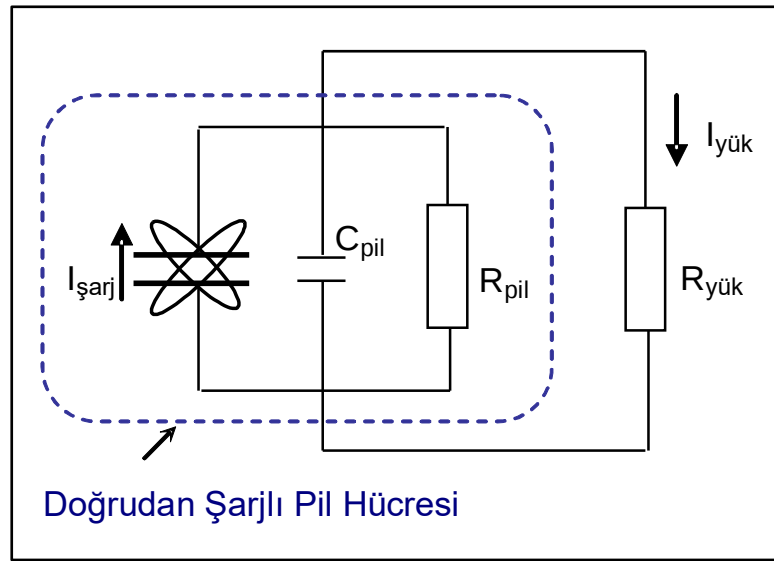
Tablo 6.3'de, yukarıda bahsedilen ve betavoltaik pillerde en yaygın kullanılan bu yarı iletken malzemelerin fiziksel parametre değerleri verilmiştir [119], [182].

Tablo 6.3 Betavoltaik pillerde en sık kullanılan yarı iletkenlerin elektriksel ve fiziksel parametre değerleri

Parametreler	Silikon (Si)	Galyum Arsenid (GaAs)	Silisyum Karbür (4H-SiC)	Galyum Nitrit (GaN)	Elmas (C)
Bant Aralığı, E_g (eV)	1.12	1.43 (1.42)	3.26 (3.23)	3.45 (3.43)	5.45
Dielektrik Sabiti (ϵ_r)	11.9	13.1 (13.2)	10.1 (9.7)	9 (8.9)	5.5
Elektrik Bozulma Alanı - E_c (MV cm ⁻¹)	0.3 (0.23)	0.4	2.2 (2.2)	2 (3.3)	10 (5.6)
Elektron Mobilitesi, μ_n (cm ² V ⁻¹ S ⁻¹)	1,500	8,500	1,000	1,250	2,200
Deşik Mobilitesi, μ_p (cm ² V ⁻¹ S ⁻¹)	600	400	115	850	850
Termal İletkenlik Lambda (W cm ⁻¹ K ⁻¹)	1.5	0.46	4.9	1.3	22
Doygun Elektron Hızı (x 10 ⁷ cm ⁻³ s ⁻¹)	1 (1.03)	1 (0.77)	2 (2.2)	2.2 (1.9)	2.7 (2)
Doygun Deşik Hızı	1.03	0.77	1	1	0.1
İntrinsik Taşıyıcı Yoğunluğu (300 K)	1.45x10 ¹⁰	2.67x10 ⁶	1.73x10 ⁻⁸	1.9x10 ⁻¹⁰	1x10 ⁻²²
Elektron Difüzyon Katsayısı	36	200	22	25	57
Deşik DifüzyonKatsayısı	12	10	3	9	46

6.2 Doğrudan Şarjlı Nükleer Pilin Verim Hesaplamaları

Doğrudan şarjlı nükleer pillerin (DŞNP) temel çalışma prensibi, kaynak bir elektrottan yayılan yüklü parçacıkların, karşıda bulunan başka bir toplayıcı elektrotta birikmesi esasına dayanır. Bu tür pillerde alfa veya beta kaynakları kullanılabilir. En basit durumda DŞNP, üzerinde elektrostatik yükün biriktiği bir metal plakaya (kolektöre) bakan iletken bir plaka üzerinde veya içinde bulunan radyoaktif kaynaktan oluşur. Kaynak ve metal kolektör bir dielektrik ile birbirinden ayrılır. Pildeki doğrudan şarj mekanizmasının tarif edilmesi için, hücrenin eşdeğer devre şeması Şekil 6.17'de verilmiştir.

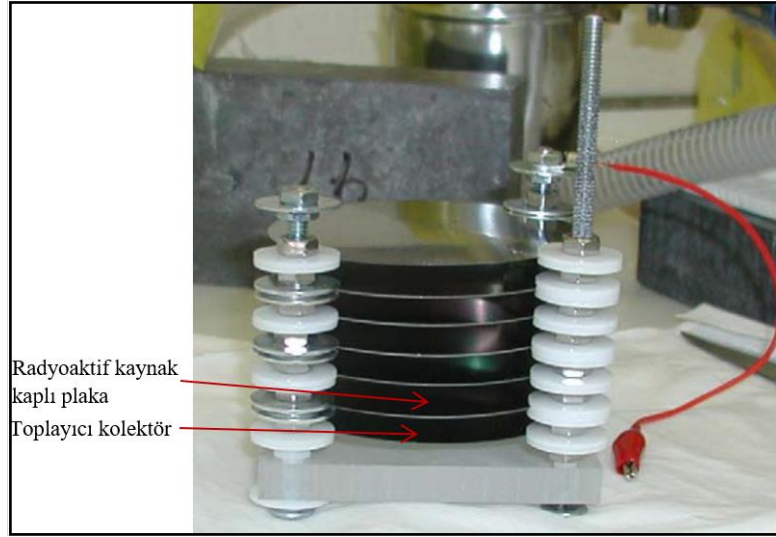


Şekil 6.17 Doğrudan şarjlı nükleer pil devre hücresinin şeması

Doğrudan şarjlı nükleer pilin deneysel plaka düzeneği Şekil 6.18'de gösterildiği şekilde kurulur. Şekildeki radyoaktif kaynaktan yayınlanan beta parçacıklarının bir kısmı metal kolektörde birikmektedir. Bir kısmı ise kaçak direnç ($R_{\text{kaçak}}$) üzerinde kaybolur. Her t 'den $t+dt$ zaman aralığına kadar radyoaktif kaynaktan yayınlanan toplam yük ifadesi,

$$dQ_{in} = I_{\text{şarj}} \cdot dt \quad (6.30)$$

şeklindedir.



Şekil 6.18 Radyoaktif kaynak ve toplayıcı plaka sistemi

Burada $I_{\text{şarj}}$ şarj akımı, dQ_{in} plakada indüklenen toplam yüküdür. C kapasitansına sahip plakada biriken voltaj $V(t)$,

$$dQ_{\text{in}} = dQ_C + dQ_R \quad (6.31)$$

$$dQ_{\text{in}} = I_{\text{şarj}} \cdot dt ; dQ_C = C \cdot dV(t); dQ_R = V(t)/R_{\text{kaçak}} dt \quad (6.32)$$

$$I_{\text{şarj}} \cdot dt = C \cdot dV(t) + \frac{V(t)}{R_{\text{kaçak}}} \cdot dt \quad (6.33)$$

veya

$$\frac{dV(t)}{dt} + \frac{V(t)}{R_{\text{kaçak}} \cdot C} = \frac{I_{\text{şarj}}}{C} \quad (6.34)$$

şeklinde ifade edilir. Burada dQ_C , şarj akımından dolayı kapasitör plakasında biriken toplam yük, $(-dQ_R)$ ise pilin kendi iç direnci üzerinde harcanan yük olarak ifade edilir. Kaynaktan yayınlanan yük akımı devam ettikçe, toplayıcı plakada (kolektör) yük akümüülasyonu devam eder. Kolektörde biriken eksi voltaj nedeniyle kaynak plakaya doğru oluşan zıt yönlü elektrik alandan dolayı toplam şarj akımı $I_{\text{şarj}}$ durmadığı sürece (diğer bir ifadeyle kolektörde pilin beta akımını durduracak yeterli zıt yük birikmediği sürece), denklem (6.34)'ün çözümü şu şekilde yazılır,

$$V(t) = I_{\text{şarj}} \cdot R_{\text{kaçak}} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{R_{\text{kaçak}} \cdot C}\right) \right] \quad (6.35)$$

Denklemde $t \gg R_{\text{kaçak}} \cdot C$ ise akümülyasyon voltajı doyumuna ulaşır. Bu durumda V_{doyum} ,

$$V_{\text{doyum}} = I_{\text{şarj}} \cdot R_{\text{kaçak}} \quad (6.36)$$

yazılabilir. $t \ll R_{\text{leak}} \cdot C$ olduğunda $V(t)$, t ile doğru orantılı olarak değişir.

$$V(t) = \frac{I_{\text{şarj}} \cdot t}{C} \quad (6.37)$$

Doğrudan şarjlı nükleer pilin (DŞNP) doyum voltajı, denklem (6.35) kullanılarak hesaplanabilir. Eğer biriken voltaj harici bir devrede kullanılmak için, DŞNP bir $R_{\text{yük}}$ direncine parallel olarak bağlanırsa kaçak akım ifadesi,

$$R_{\text{kaçak}} = \frac{R_{\text{pil}} \cdot R_{\text{yük}}}{R_{\text{pil}} + R_{\text{yük}}} \quad (6.38)$$

olur. Burada R_{pil} , doğrudan şarjlı nükleer pilin iç direncidir.

➤ Eğer $R_{\text{yük}} \gg R_{\text{pil}}$ ise $R_{\text{kaçak}} = R_{\text{pil}}$ yazılır (açık devre durumu). Bu durumda doyum voltajı, açık devre voltajı (V_{oc}) olarak da ifade edilebilir.

➤ Eğer $R_{\text{yük}} = 0$ ise (kısa devre durumu), kısa devre akımı (I_{sc}), şarj akımına ($I_{\text{şarj}}$) eşit olacaktır.

$R_{\text{yük}}$ direnci üzerinden geçen akım ($I_{\text{yük}}$),

$$I_{\text{yük}} = \frac{V_{\text{doyum}}}{R_{\text{yük}}} = \frac{I_{\text{şarj}}}{R_{\text{yük}}} \cdot \frac{R_{\text{pil}} \cdot R_{\text{yük}}}{R_{\text{pil}} + R_{\text{yük}}} = \frac{I_{\text{şarj}} \cdot R_{\text{pil}}}{R_{\text{pil}} + R_{\text{yük}}} \quad (6.39)$$

şeklinde yazılabilir. Pilin toplam gücü P_{pil} ,

$$P_{\text{pil}} = V_{\text{doyum}} \cdot I_{\text{yük}} = I_{\text{şarj}} \cdot \frac{R_{\text{pil}} \cdot R_{\text{yük}}}{R_{\text{pil}} + R_{\text{yük}}} \cdot I_{\text{şarj}} \cdot \frac{R_{\text{pil}}}{R_{\text{pil}} + R_{\text{yük}}} = \left(\frac{I_{\text{şarj}} \cdot R_{\text{pil}}}{R_{\text{pil}} + R_{\text{yük}}} \right)^2 \cdot R_{\text{yük}} \quad (6.40)$$

şeklinde ifade edilir. $R_{yük} = R_{pil}$ olduğunda $R_{yük}$ direnci üzerinden hesaplanan pil gücü ($P_{pil, \max}$) maksimum olur. Bu durumda denklem (6.40) sağ tarafı,

$$\frac{R_{pil} \cdot R_{yük}}{(R_{pil} + R_{yük})^2} = 0.25 \quad (6.41)$$

şeklinde yazılabilir ve pilin üreteceği maksimum güç $P_{pil, \max}$,

$$P_{pil, \max} = 0.25 \cdot I_{yük}^2 \cdot R_{pil} = 0.25 \cdot V_{oc} \cdot I_{sc} \quad (6.42)$$

Şeklinde yazılabilir. Elektriğe dönüştürülen radyoaktif bozunma gücü P_{RB} , denklem (6.43)'deki gibi ifade edilir.

$$P_{RB} = A \cdot \varepsilon_{ort} \quad (6.43)$$

Burada A radyoaktif maddenin aktivitesi (Becquerel) ve ε_{ort} radyoizotoptan yayınlanan parçacıkların ortalama enerjisidir (Joule). Şarj akımının, kolektör üzerinde biriken voltaj nedeni ile düşmediği durumda DŞNP verimi $\eta_{DŞNP}$,

$$\eta_{DŞNP} = \frac{P_{el, \max}}{P_{RB}} \cdot 100\% = \frac{0.25 \cdot V_{oc} \cdot I_{sc}}{A \cdot \varepsilon_{ort}} \cdot 100\% \quad (6.44)$$

ile hesaplanır. Burada ε_{ort} ortalama enerji (keV), A ise aktivitedir.

6.2.1 Doğrudan Şarjlı Nükleer Pil Verimlilik Denklemi

Bir önceki kesimde bahsedildiği gibi DŞNP toplam verimi, elektriksel güç P_{pil} ile P_{RB} 'nin oranına eşittir ve P_{pil} , $R_{yük} = R_{pil}$ durumunda maksimumdur. Bu durumda $I_{yük}$,

$$I_{yük} = \frac{I_{şarj} \cdot R_{pil}}{R_{pil} + R_{yük}} = \frac{I_{şarj}}{2} \quad (6.45)$$

olur. Akümüilasyon sırasında pilde oluşan şarj akımı ($I_{şarj}$) beta parçacık akısına bağlıdır. 2. Bölümde bahsedildiği gibi $1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$ olduğundan dolayı, 1 Ci 'lik bir kaynağın beta elektron akımı teorik olarak,

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ (elektron/s)} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 5.92 \text{ nA} \quad (6.46)$$

şeklindedir. Şarj akımı ($I_{\text{şarj}}$), radyoaktif kaynağın noktasal ve kolektörün küresel olması durumunda beta elektron akımına eşit olur yani tüm yük kayıp olmadan kolektörde toplanabilir. Ancak deneysel kayıplar olacağından ($I_{\text{şarj}}$) daima beta elektron akımından daha düşük olur. Deneysel kayıpların başlıca nedenleri,

- Metal üzerine kaplanmış radyoaktif kaynağın aktif tabakasının, kendi kendini zırlaması. Verimi etkileyen bu parametre, kaynak verimi (η_K) olarak ifade edilir ve aktif tabakadan yayılan beta parçacıklarının, kaynaktan çıkan tüm beta parçacıklarına oranı olarak tanımlanır.
- Kaynaktan kolektöre doğru yayınlanan beta parçacıklarının kaybı. Bu parametre, geometrik parametre (k_g) olarak ifade edilir ve kolektöre ulaşan beta parçacık akısının, radyoaktif kaynağın aktif yüzeyinden yayınlanan beta parçacık akısına oranı olarak tanımlanır.
- Elektriksel itme kaybı. Bu parametre, kolektör üzerinde biriken voltaj ile oluşan Coulomb itme kuvvetinden dolayı, beta parçacıklarının bir kısmının kolektöre ulaşamaması olarak tanımlanır. İtme faktörü $\eta_R(V)$ ile ifade edilir.
- Kolektöre çarpan beta parçacıklarının geri saçılma faktörü, b ile ifade edilir.
- Yüksek enerjili beta parçacıklarının kolektöre çarptığında kolektörde oluşan ikincil (sekonder) elektronların oluşturduğu zıt akımdan dolayı pilin şarj akımının azalması, s ile ifade edilir.

Buna göre,

$$I_{\text{şarj}} = q_e \cdot A \cdot \eta_K \cdot k_g \cdot \eta_R(V) \cdot (1 - s) \cdot (1 - b) \quad (6.47)$$

şeklinde yazılır. Pilin verimi ise,

$$\eta = \frac{V \cdot I_{\text{yük}}}{\varepsilon_{\text{ort}} \cdot A} = \frac{V \cdot I_{\text{şarj}}}{\varepsilon_{\text{ort}} \cdot A \cdot 2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{V \cdot \eta_R(V)}{\varepsilon_{\text{ort}}} \cdot \eta_K \cdot k_g \cdot (1 - s) \cdot (1 - b) \quad (6.48)$$

ile hesaplanır. Verimlilik denklemindeki bu parametrelerin fiziksel açıklaması aşağıda verilmiştir.

6.2.2 Doğrudan Şarjlı Nükleer Pilin Verimini Etkileyen Faktörler

Betavoltaik nükleer pillerde olduğu gibi doğrudan şarjlı nükleer pillerde de radyoizotop seçimi son derece önemlidir. Yarı ömrü çok kısa olan kaynak seçilmesi pilin kullanım ömrünü kısaltırken, yarı ömrü çok uzun kaynağın seçilmesi durumunda ise spesifik güç (W/g) düşük olur. Yüksek gama radyasyonu olan bir kaynak, ekstra zırhlama gerektirir. Alfa parçacıkları çarptığı malzemede birçok ikincil elektron oluşmasına sebep olduğu için, DŞNP'lerde alfa kaynağı yerine genellikle beta kaynağı tercih edilmektedir. Bu koşulları taşıyan en ideal beta kaynakları, H-3, Ni-63, Pm-147 ve Sr-90 'dır.

a. Kaynağın Verimi

Nükleer pilin gücü (özümlü güç) ve verimliliği temel olarak yüklü parçacık akımına ve radyoaktif kaynağın beta emisyon verimine bağlıdır. Yayınlanan beta akımı, radyoaktif kaynak tabakasının spesifik aktivitesine, kaynak tabakasının kütle kalınlığına ve beta parçacıklarının kaplanan ince film içerisindeki absorpsiyonuna bağlıdır.

i. Kaynağın Beta Parçacık Akısı

Kaynak yüzeyinden yayınlanan beta parçacık akısının toplam spesifik gücü, radyoaktif kaynak noktasal kabul edilerek hesaplanabilir. Bu güç, küçük bir beta kaynağı etrafında homojen bir ortamda absorbe edilen enerji dağılımını ifade eder. Noktasal beta kaynağının gücü $W(r)$ fonksiyonu ile gösterilir ve yarıçapı r olan küresel tabakada emilen enerji olarak tanımlanır. $W(r)$ 'nin matematiksel ifadesi denklem (6.49)'da verilmiştir [183].

$$W(r) = W_0 \cdot (0.25 \cdot e^{-10 \cdot r \cdot v} + 0.75 \cdot e^{-2 \cdot r \cdot v}) + (\epsilon_{\text{ort}} \cdot v - 0.4 \cdot W_0) \cdot r \cdot v \cdot e^{-r \cdot v} \quad (6.49)$$

Burada r yarıçap (mg/cm^2), kütle soğurma katsayısı, W_0 kaynağın durdurma gücüdür ($\text{keV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$). H-3, Ni-63, Pm-147 ve Sr-90 için bu parametreler Tablo 6.4'te verilmiştir [184].

Tablo 6.4 H-3, Ni-63, Pm-147 ve Sr-90 için kütle soğurma katsayıları ve durdurma güçleri

İzotop	Beta parçacıklarının maksimum enerjisi ϵ_{max} , keV	Beta parçacıklarının ortalama enerjisi ϵ_{avg} , keV	Kütle soğurma katsayısı ν , cm ² /mg	Kaynağın durdurma gücü W_0 , keV·cm ² /mg
H-3	18	5.7	15.1	56.6
Ni-63	67	17.4	1.48	30.6
Pm-147	225	62	0.19	13.8
Sr-90	540	198	0.044	5.76
Y-90	2240	930	0.0066	2.31

Noktasal bir kaynağın yüzeyindeki beta parçacık akısının toplam gücü, $dP(A_{sp}, D)/ds$ ifadesi ile hesaplanırken, beta parçacık akım yoğunluğu olan $dI_\beta(A_{sp}, D)/ds$ ifadesi aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\frac{dI_\beta(A_{sp}, D)}{ds} = \frac{1}{\epsilon_{ort}} \cdot \frac{dP(A_{sp}, D)}{ds} = \frac{0.08 \cdot A_{sp}}{\epsilon_{ort}} \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cdot \cos \theta \int_0^D \frac{D}{\cos \theta} (\epsilon_{ort} - \int_0^D W(r) dr) dp d\theta \quad (6.50)$$

Burada $dI_\beta(A_{sp}, D)/ds$ 'nın birimi nA/cm² 'dir. A_{sp} kaynağın spesifik aktivitesi (GBq/mg), D radyoaktif tabakanın kütle kalınlığı (mg/cm²) [69].

ii. H-3, Ni-63, Pm-147 ve Sr-90 Kaynaklarından Yayınlanan Beta Akımı

Genel olarak bir radyoaktif kaynağın spesifik aktivitesi aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$A_{sp} = \frac{nN_A \lambda}{M_A 10^{12}} \left(\frac{GBq}{mg} \right) \quad A_{sp} = \frac{nN_A \lambda}{M_A \cdot 3.7 \cdot 10^{13}} \left(\frac{Ci}{mg} \right) \quad (6.51)$$

Burada n moleküldeki radyoaktif izotop atomlarının sayısı, λ bozunma sabiti (s⁻¹), $N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$ mol⁻¹ avogadro sayısı ve M_A moleküler ağırlıktır (g·mol⁻¹).

Radyoizotop atomları genellikle kimyasal bileşikler halinde ve bu bileşiğin içinde spesifik aktivitelere sahip bir şekilde bulunurlar. Bu nedenle izotoplar ile çalışılırken kimyasal bileşikleri de dikkate alınmalıdır. Örneğin, trityum kaynağı yaygın olarak titanyum veya skandiyum trid bileşiği olarak kullanılır [185]. Titanyum ve skandiyum, 1100 Ci / g'a kadar aktive edilebilir. Yani H-3 radyoaktif izotop içeren bir tabakanın elde edilebilecek spesifik aktivitesi maksimum 1000 Ci/g'dır [186]. Saf Ni-63'ün spesifik aktivitesi 57 Ci/g'dır. Ancak metal nikel, izotopların bir karışımıdır ve aktivitesi yaklaşık 10 Ci civarındadır. Pm-147'nin yaygın kimyasal bileşiği, 800 Ci / g spesifik aktiviteye sahip Pm_2O_3 'dür [184].

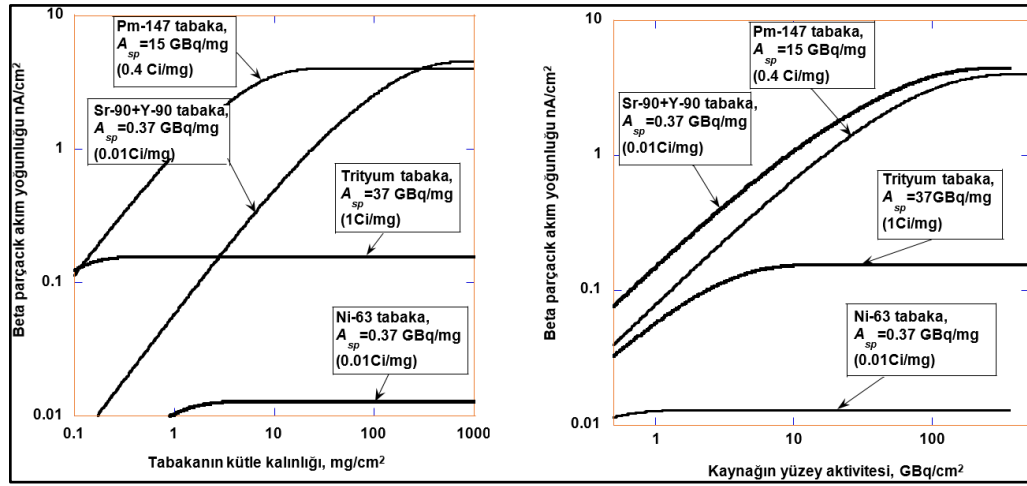
Tablo 6.5 H-3, Ni-63, Pm-147, Sr-90 kimyasal bileşiği ve spesifik aktiviteleri

Parametre	İzotop				
	H-3	Ni-63	Pm-147	Sr-90	
Yarı ömür (yıl)	12.32	100.1	2.62	28.9	
Bozunma sabiti, s^{-1}	$1.78 \cdot 10^{-9}$	$2.2 \cdot 10^{-10}$	$8.4 \cdot 10^{-9}$	$7.6 \cdot 10^{-10}$	
Kimyasal bileşik	Ti^3H_2 Sc^3H_2	^{63}Ni	$^{147}\text{Pm}_2\text{O}_3$	$^{90}\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$	
Kimyasal bileşiğin spesifik aktivitesi GBq/mg (Ci/mg)	41 (1.1)	2.1 (0.057)	30 (0.8)	2.1 (0.058)	
Matris veya bağlayıcı	Titanyum veya skandiyum	Metalik nikel	Enamel	Silika-titan sol-jel	Grafit Seramik
Radyoaktif tabakanın Spesifik aktivitesi GBq/mg (Ci/mg)	37 (1.0)	0.37 (0.01)	0.37(0.01)	15 (0.4)	0.37(0.01) (0.74(0.02))

Şekil 6.19 (a) ve (b), literatürde yapılan deneysel bir araştırmada beta parçacık akım yoğunluğunun, H-3, Ni-63, Pm-147 ve Sr-90 spesifik aktivitesine ve kütle kalınlığına bağlı nasıl değiştiğini göstermektedir [187]. Akı değeri, denklem (6.50) ile hesaplanabilir. Şekilde görüldüğü gibi, Ni-63 'ün beta akısı, aynı aktif

tabakanın kütle kalınlığına sahip olan H-3, Pm-147 ve Sr-90'dan yaklaşık iki kat daha düşüktür. Pm-147 ve Sr-90 kaynakları karşılaştırıldığında, her iki izotop için de beta akısının cm^2 başına 4-5 nanoamper olduğu görülmektedir. Ancak Sr-90 kaynağının kız çekirdeği olan Y-90'ın maksimum beta enerjisi çok yüksek olduğundan dolayı (2841 keV), aynı yüzey aktivitesine sahip Pm-147'den daha tehlikelidir. Bu nedenle, DŞNP'de Sr-90 yerine Pm-147'nin kullanılması tercih edilmektedir.

Bu amaçla mevcut tez araştırmasında, DŞNP yapısının incelenmesi için Pm-147 kaynağı seçilmiştir. Ayrıca araştırma kapsamında temin edilmesi planlanan H-3 kaynağı için yapılan bazı teorik hesaplamalar da aşağıda verilmiştir.



Şekil 6.19 Beta parçacık akım yoğunluğunun, radyoaktif tabakanın (a) kütle kalınlığına (b) yüzey aktivitesine bağlılığı

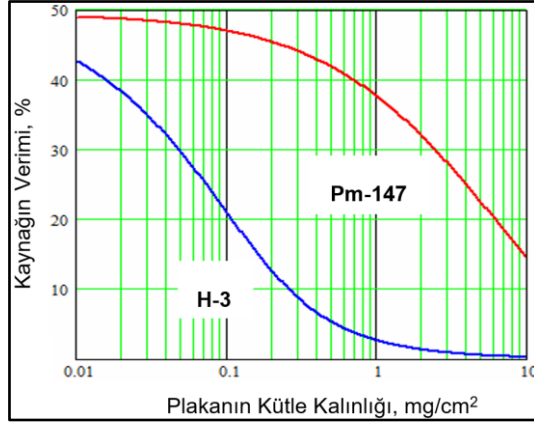
iii. Radyoaktif Tabaka Kalınlığının Etkisi

Kaynağın verimi (η_K), radyoaktif plakanın kütle kalınlığına (D) bağlıdır. Beta parçacık akım yoğunluğu ifadesini veren denklem (6.50) kullanılarak, kaynağın verimi aşağıdaki gibi η_K hesaplanabilir.

$$\eta_K = \frac{1}{q_e \cdot A_{sp} \cdot D} \cdot \frac{dI_\beta(A_{sp}, D)}{dS} \quad (6.52)$$

$A_{sp} = 500 \text{ mCi/mg}$ aktiviteli H-3 için ve $A_{sp} = 500 \text{ mCi/mg}$ aktiviteli Pm-147 için η_K 'nin D değerine bağlılığı Şekil 6.20'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi kaynağın verimi maksimum %50'ye kadar ulaşabilir. Bunun nedeni kaynağın

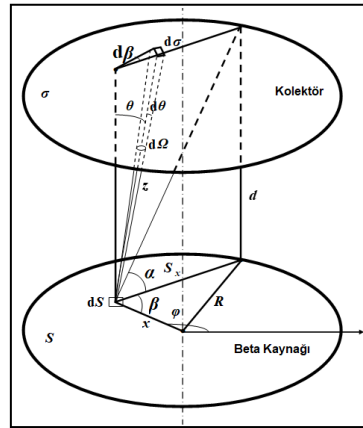
yalnızca bir yüzünden (2π) çıkan beta parçacıklarının kolektöre ulaşmasıdır. Eğer kaynak tabakasının her iki yüzeyinden (4π) yayınlanan beta parçacıkları, kolektörler ile toplanabilirse verim iki katına kadar çıkarılabilir.



Şekil 6.20 2π geometride, kaynak veriminin kütle kalınlığına bağlılığı

b. Pil Geometrisinin Etkisi

R yarıçapına sahip dairesel ve birbirine paralel doğrudan şarj pili ele alalım (Şekil 6.21). Plakalardan biri, beta radyoaktif ince filmin kaplandığı elektrot, diğeri ise beta parçacıklarının toplandığı kolektördür. Elektrotların arasındaki mesafe d 'dir.



Şekil 6.21 Paralel plakalı kolektörlerde beta akısının hesaplanması

Şekil 6.21'de alttaki kolektör yüzeyinin her bir diferansiyel elemanından yayınlanan beta akısı, θ ve β açılarının fonksiyonu olan $\Phi(\theta, \beta)$ katı açısı ile belirlenir. Bu yaklaşımda, yüzeyin her bir elemanı tek başına düz bir kaynaktır. Bu durumda,

$$\Phi(\theta,\beta)=\Phi_0 \cdot \cos\theta \quad (6.53)$$

yazılabilir. Burada Φ_0 , yüzey elemanına dik doğrultudaki parçacık akısıdır. Kaynağın Ω katı açısı içerisindeki tüm yüzeyinden yayılan beta parçacık akısı Φ , aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\Phi = \int_{S_{kaynak}} \int_{\Omega} \Phi(\theta, \beta) d\Omega dS \quad (6.54)$$

Bu denklemde $\Omega=2\pi$ alınarak kaynağın bir yüzeyinden yayınlanan toplam beta parçacık akısı Φ_{toplam} hesaplanabilir. Yayınlanan bu betalardan kolektöre ulaşan akı $\Phi_{kolektör}$ ile gösterilirse, geometrik verim faktörü k_g ,

$$k_g = \frac{\Phi_{kolektör}}{\Phi_{toplam}} \quad (6.55)$$

ile verilir. Radyoaktif kaynağının homojen olarak beta yayınladığı varsayılırsa k_g ,

$$k_g = \frac{\int_{S_{kaynak}} \int_{\Omega} \Phi(\theta, \beta) d\Omega dS}{\int_{S_{kaynak}} \int_{2\pi} \Phi(\theta, \beta) d\Omega dS} = \frac{\int_{S_{kaynak}} \int_{\Omega} \cos \theta d\Omega dS}{\int_{S_{kaynak}} \int_{2\pi} \cos \theta d\Omega dS} \quad (6.56)$$

şeklinde hesaplanır. Denklemdeki $d\Omega = \sin \theta d\theta d\beta$ olduğundan,

$$\int_{\Omega} \cos \theta d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}-\alpha} \cos \theta \cdot \sin \theta d\theta d\beta = \frac{1}{2} \cdot \int_0^{2\pi} \cos^2 \alpha d\beta \quad (6.57)$$

yazılabilir. Burada,

$$\int_{2\pi} \cos \theta d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta \cdot \sin \theta d\theta d\beta = \pi \quad (6.58)$$

bulunur. α ve β açıları dS elemanı ile kaynağın merkezi arasındaki x mesafesine bağlıdır. Kutupsal koordinatlar kullanılarak,

$$dS = x \cdot dx \cdot d\phi \quad (6.59)$$

Denklem (6.57), (6.58) ve (6.59), denklem (6.56)'de yerine konulursa,

$$k_g = \frac{1}{2\pi \cdot \pi R^2} \cdot \int_0^R \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos^2 \alpha \cdot x \cdot d\beta d\phi dx$$

$$= \frac{1}{\pi R^2} \cdot \int_0^R \int_0^{2\pi} \cos^2 \alpha \cdot x \cdot d\beta dx$$
(6.60)

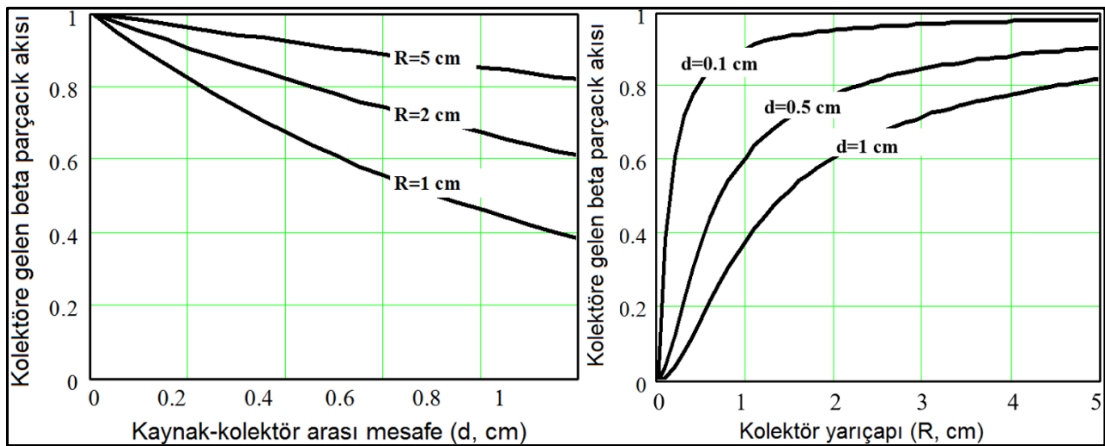
elde edilir. Kaynağın kenarına olan uzaklık S_x , dS elemanına olan uzaklık x ve β açısı cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$S_x = x \cdot \cos \beta + \sqrt{R^2 - x^2 \cdot \sin^2 \beta}$$
(6.61)

Burada,

$$\cos \alpha = S_x (S_x^2 + d^2)^{-1/2}$$
(6.62)

şeklindedir. Geometrik faktör k_g 'nin farklı yarıçap değerleri için hesaplanan grafiği Şekil 6.22'de gösterilmiştir. Grafiklerden anlaşılabacağı üzere, kolektöre ulaşan beta parçacık akısı, elektrotlar arası mesafe ile ters orantılı, elektrotların yarıçapı ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Örneğin 5 cm yarıçaplı bir kaynak plaka ile kolektör arasındaki mesafe 5 mm olduğunda, beta akısının % 90'ı kolektöre ulaşmaktadır. Teorik olarak kaynağın homojen olduğu varsayılmıştır ancak deneysel olarak hazırlanan radyoaktif ince film % 100 düzgün dağılımlı değildir. Bu nedenle k_g faktörü ancak yaklaşık olarak belirlenebilir.

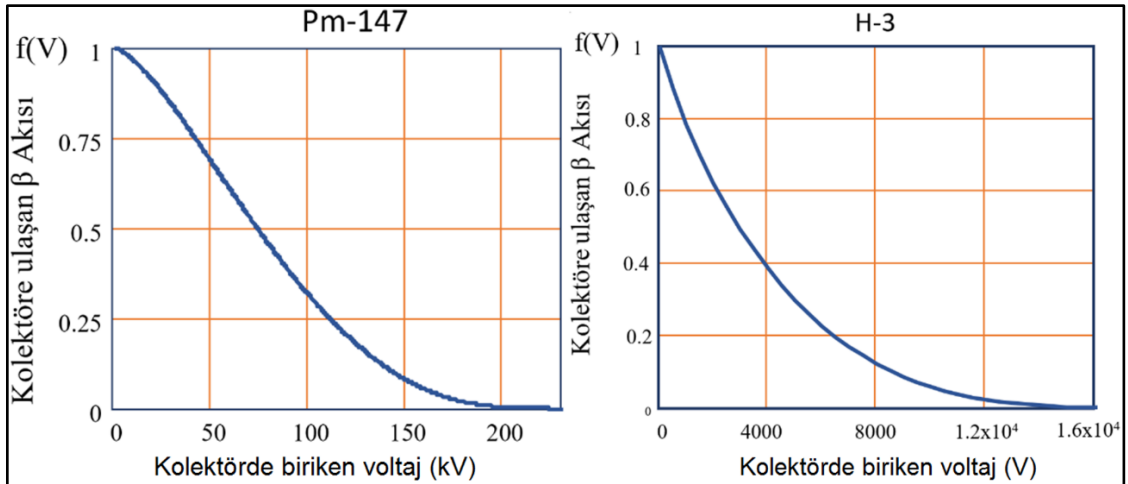


Şekil 6.22 Kolektörler arasındaki mesafeye bağlı beta akı değişimi

c. Kolektör Üzerinde Biriken Voltajın Etkisi

Elektrotlardan gelen beta parçacıklarının etkisiyle toplayıcı kolektör negatif olarak yüklenecektir. Kolektördeki artan negatif potansiyel nedeniyle, kaynaktan gönderilen bir sonraki beta parçacığı, sürekli olarak artan bir itme kuvvetine maruz kalır. Nükleer pilin elektrotları arasındaki elektrik alan boyunca hareket eden parçacıkların enerjisi, elektrik alanın enerjisine eşit veya küçük ise parçacıklar kolektöre ulaşamaz. Beta parçacığının enerjisi, kolektör üzerindeki voltaj ile elektron yükünün çarpımından ($q_e V$) büyük ise, parçacıklar elektrik alanının etkisi ile doğrusal yörüngesinden saparak kolektöre doğru belirli bir açı ile hareket edecektir. Böylece daha az beta parçacığı kolektöre ulaşacaktır. $q_e V$ değerinden daha yüksek enerjili beta parçacığının izlediği yol $\eta(V)$, denklem (6.63) ile hesaplanır. Beta parçacık akısının, biriken voltaja göre karşı kolektöre ulaşan kesri Pm-147 ve H-3 için hesaplanarak Şekil 6.23'te verilmiştir.

$$\eta(V) = \int_{qV}^{\varepsilon_{max}} w(\varepsilon_\beta) d\varepsilon_\beta \quad (6.63)$$



Şekil 6.23 Pm-147 ve H-3 için biriken voltaja göre kolektöre ulaşan β akısı

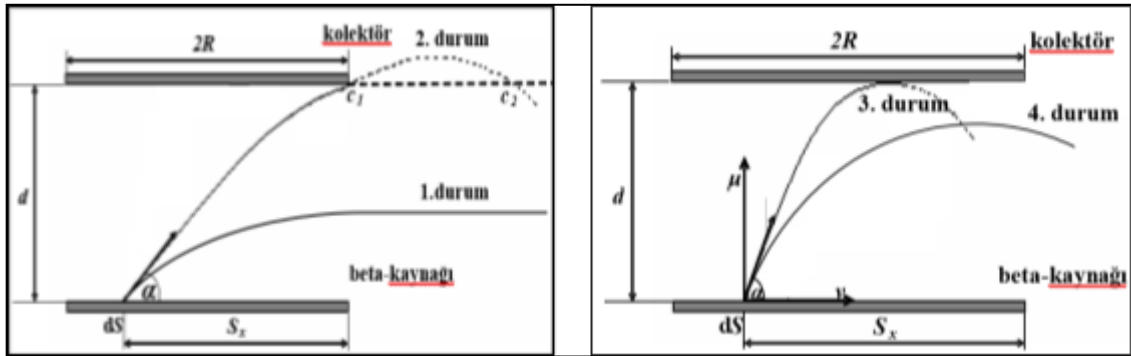
Herbir radyoaktif kaynağın kendine özgü (spesifik) beta enerji dağılımına sahip olduğu kesim 3.7'de anlatılmış ve farklı kaynaklara ait beta enerji spektrumları verilmişti. Deneysel olarak elde edilen bu spektrum eğrileri analitik olarak da hesaplanabilmektedir. Örneğin araştırmanın bir sonraki aşamasında kullanılması

planlanan trityum beta enerji spektrumu için, denklem (6.63) integralinin içerisindeki enerji dağılım ifadesi aşağıdaki şekilde hesaplanır [81].

$$w(\varepsilon_\beta)d\varepsilon_\beta = k_n(\varepsilon_{max} - \varepsilon_\beta)^2 \cdot \left\{1 - \exp\left(-\frac{1.47}{\sqrt{\varepsilon_\beta}}\right)\right\}^{-1} d\varepsilon_\beta \quad (6.64)$$

Burada $k_n=1/4120$ normalizasyon katsayısıdır. Benzer şekilde Pm-147 kaynağının beta enerji spektrumu, Fermi–Curie formülasyonu ile ifade edilebilmektedir.

Şekil 6.24'de plakalar arasındaki elektrik alan içinde bulunan elektronların, olası yörüngeleri gösterilmiştir. Bu yörüngelerin hesaplanmasında denklem (6.61) kullanılmıştır. Kaynak plaka üzerindeki α açısıyla kolektöre giden beta parçacıklarının ulaşacağı nokta yalnızca kaynağın yüzeyi üzerinde bulunduğu pozisyona değil, aynı zamanda kolektörün voltajına da bağlıdır. Şekilde görüldüğü gibi parçacıkların izlediği yörünge paraboliktir. Elektrik alanın değeri çok büyük değilse, parabolün maksimum noktası kolektörün dışındadır. Diğer durumda, parabolün maksimum noktası kolektörün içerisinde kalır.



Şekil 6.24 Kolektör voltajı a) düşük b) parçacığı durdurabilecek kadar büyük olduğunda beta yörüngesine etkisi

Şekil 6.24 (a) durumunda, beta parçacığının kolektör üzerinde ulaşacağı nokta, α açısına ve sınır koşullarına bağlıdır.

$$S_x = v \cdot \cos \alpha \cdot t \quad (6.65)$$

$$d = v \cdot \sin \alpha \cdot t - \frac{a \cdot t^2}{2} \quad (6.66)$$

Burada t , beta parçacık yayımlanma süresi veya parçacığın uçuş zamanıdır. v , beta parçacığının başlangıç hızıdır.

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_\beta}{m_e}} \quad (6.67)$$

ε_β beta parçacığının enerjisidir (Joule) ve m_e elektronun kütlesidir ($9.1 \cdot 10^{-31}$ kg). Elektrik alandan dolayı elektronun sahip olacağı ivme (m/s^2),

$$a = \frac{q_e}{m_e} \cdot \frac{V}{d} \quad (6.68)$$

olur. Burada q_e elektronun yükü ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C); V elektrotlar arasındaki voltajdır. Denklem (6.65) ve denklem (6.66)'dan,

$$d = S_x \cdot tg\alpha - \frac{a \cdot S_x^2}{2 \cdot v^2 \cdot \cos^2 \alpha} \quad (6.69)$$

elde edilir. Denklem (6.69)'da, $\cos^2 \alpha = \frac{1}{1+tg^2 \alpha}$ eşitliği kullanılarak,

$$S_x \cdot tg\alpha - \frac{a \cdot S_x^2}{2 \cdot v^2} \cdot (1 + tg^2 \alpha) = d \quad (6.70)$$

bulunur. Bu denkleminin çözümünden,

$$tg\alpha_{1,2} = \frac{S_x \pm \sqrt{S_x^2 - 2 \cdot \frac{a \cdot S_x^2}{v^2} \cdot (\frac{a \cdot S_x^2}{2 \cdot v^2} + d)}}{\frac{a \cdot S_x^2}{v^2}} \quad (6.71)$$

elde edilir. Şekil 6.24 (a)'daki bu değerler için, toplayıcı düzlemini geçen elektronun hareket yörüngesi c_1 noktasıdır. Küçük $tg\alpha$ değeri 2. duruma denk gelir. Denklemdaki kritik α açısı,

$$\alpha = arctg\left(\frac{v^2 \cdot S_x - \sqrt{(v^2 \cdot S_x)^2 - a \cdot S_x^2 \cdot (a \cdot S_x^2 + 2 \cdot v^2 \cdot d)}}{a \cdot S_x^2}\right) \quad (6.72)$$

şeklinde hesaplanır.

Şekil 6.24 (b) durumunda, kritik açıdan daha düşük açiya sahip olan beta parçacıkları kolektör yüzeyine ulaşamayacaktır. Bu parçacıkların yörüngesi, (a) durumuna benzer şekilde α açısı kullanılarak,

$$v = v \cdot \cos \alpha \cdot t \quad (6.73)$$

$$\mu = v \cdot \sin \alpha \cdot t - \frac{a \cdot t^2}{2} \quad (6.74)$$

şeklinde hesaplanabilir. (6.73) ve (6.74) denklemlerinden,

$$\mu = v \cdot t g \alpha - \frac{a \cdot v^2}{2 \cdot v^2} \cdot (1 + t g^2 \alpha) \quad (6.75)$$

bulunur. Yörüngenin maksimum noktası kolektörün düzlemi ile çakışyorsa,

$$\frac{d\mu}{dv} = t g \alpha - \frac{a \cdot v}{v^2} \cdot (1 + t g^2 \alpha) = 0 \quad (6.76)$$

$$d = v \cdot t g \alpha - \frac{a \cdot v^2}{2 \cdot v^2} \cdot (1 + t g^2 \alpha) \quad (6.77)$$

olur. Denklem (6.76) ve denklem (6.77)'den,

$$t g \alpha = \sqrt{\frac{2 \cdot a \cdot d}{v^2 - 2 \cdot a \cdot d}} \text{ veya } \alpha = \arctg \left(\sqrt{\frac{2 \cdot a \cdot d}{v^2 - 2 \cdot a \cdot d}} \right) \quad (6.78)$$

$$v = \frac{v^2 \cdot t g \alpha}{a \cdot (1 + t g^2 \alpha)} \quad (6.79)$$

elde edilir. İkinci durumda verilen parçacığın yörüngesini denklem (6.79) ile ifade edilir. (b) durumunda parçacığın kolektör içinde kalması koşulu,

$$v = \frac{v^2 \cdot t g \alpha}{a \cdot (1 + t g^2 \alpha)} \leq S_x \quad (6.80)$$

ile belirlenir.

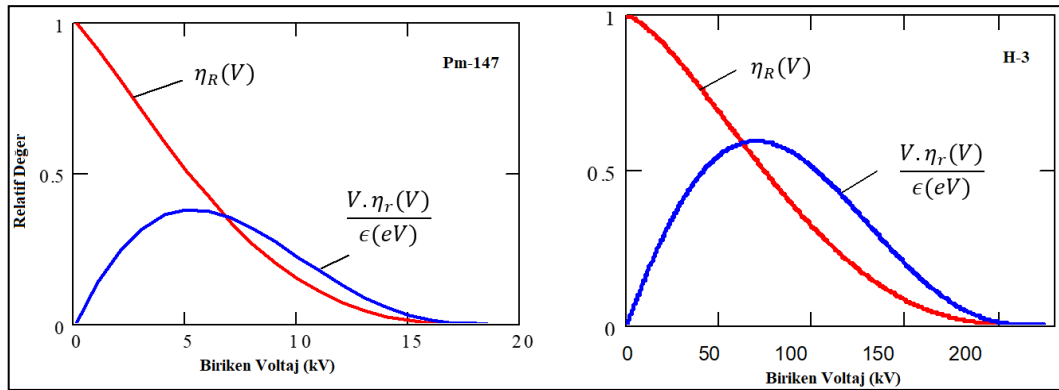
$$\sqrt{\frac{2 \cdot d \cdot (v^2 - 2 \cdot a \cdot d)}{a}} \leq S_x \quad (6.81)$$

Bu koşul gerçekleşmediğinde parçacık (a) durumunda verilen yörüngeyi izler.

Beta parçacığının denklem (6.63)'de verilen enerji spektrumu dikkate alınarak, denklem (6.60) ve (6.64) yeniden birleştirilip, aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\eta = \int_0^{\varepsilon_{\max}} w(\varepsilon_\beta) \frac{1}{\pi \cdot R^2} \cdot \int_0^R \int_0^{2\pi} \cos^2 \alpha \cdot x \cdot d\beta dx d\varepsilon_\beta \quad (6.82)$$

Denklem (6.82), pil geometrisi ve kolektör üzerinde biriken voltaj dikkate alınarak kolektöre ulaşan beta parçacık akısını ifade eder. Paralel plakalı sistem için bu fonksiyon $\eta_R(V)$ ile gösterilebilir. Örneğin tezde yapılacak olan, 5 cm yarıçaplı ve 5 mm aralıklı kolektörün geometrisi için, denklem (6.82) kullanılarak kolektöre ulaşan beta parçacık akısı hesaplanmıştır ve Şekil 6.23'ün aynısı elde edilmiştir. Bu durumda parçacık akısının kolektöre ulaşan kesri, artan elektrot voltajı ile azalır. Bunun nedeni beta parçacıklarının artan kolektör voltajı nedeniyle geri itilmesidir. Belirli bir voltaj değerinden sonra karşı kolektöre çarpan beta akısı sıfır olur yani hiçbir beta parçacığı kolektöre ulaşamaz. Bu faktör dikkate alınarak denklem (6.48)'deki $\frac{V \cdot \eta_R(V)}{\varepsilon_{ort}(eV)}$ oranı artacağından toplam verim de (η) artacak ancak belirli bir voltaj değerinden sonra tekrar azalmaya başlayacaktır. Şekil 6.25'de görüldüğü gibi bu oran trityum pil için 0.45, Pm-147 için 0.6 civarında maksimum değerine ulaşır.



Şekil 6.25 $\eta_R(V)$ ve $\frac{V \cdot \eta_R(V)}{\varepsilon(eV)}$ biriken voltajlar (a) Pm-147 (b) H-3 pil

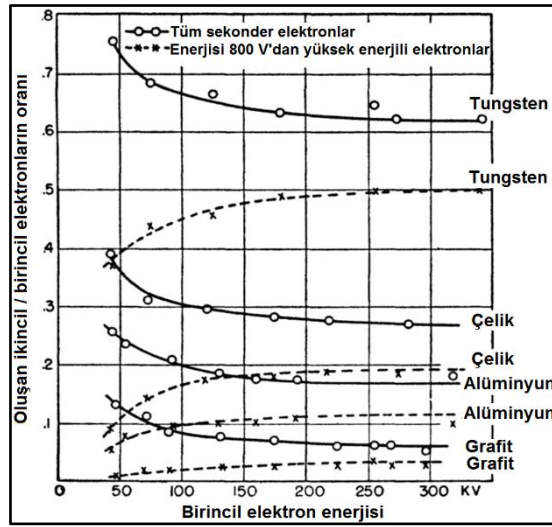
Kollektördeki biriken voltaja göre kısa devre akımının azalması, $I_{\text{şarj}} = I_{\text{sc}} \cdot \eta_R(U)$ eşitliği ile hesaba katılmalıdır. Bu durumda denklem (6.34) 'te verilen şarj denklemini,

$$\frac{dV(t)}{dt} + \frac{V(t)}{R_{kaçak} \cdot C} = \frac{I_{sc} \cdot \eta_R(V)}{C} \quad (6.83)$$

ile verilir.

d. Sekonder (İkincil) Elektron Emisyon Etkisi

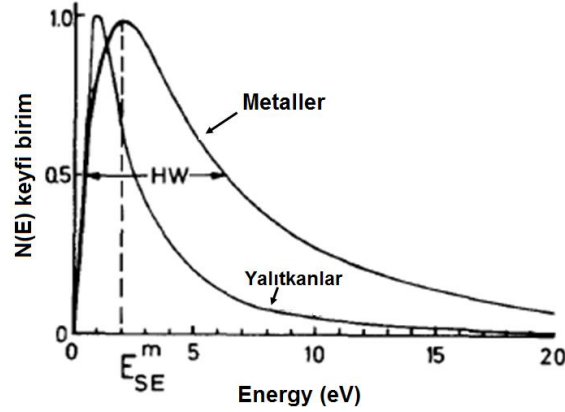
İkincil emisyon, metal yüzeye çarpan yeterli enerjiye sahip birincil elektronların (kaynaktan yayınlanan beta parçacıkları), yüzeyde ikincil parçacık oluşumuna sebep olması durumudur [188]. Birincil elektronların enerjisi azaldığında, oluşan ikincil elektronların sayısı da hızla azalır. İkincil elektron oluşma verimi, kullanılan kolektör malzemesine, yüksek enerjili birincil beta parçacığının enerjisine ve yüzeyin pürüzsüzlüğüne bağlıdır. Kolektör malzemesinin atom sayısı ne kadar düşük olursa, oluşan ikincil elektronların sayısı da o kadar düşük olur. Diğer bir ifadeyle atomik olarak hafif olan metallerde oluşan ikincil elektron sayısı, ağır olan metallere göre daha azdır. Bu durum şekil 6.26'da gösterilmiştir [189].



Şekil 6.26 Enerjisi 340 keV'e kadar olan betaların oluşturduğu SE oranı

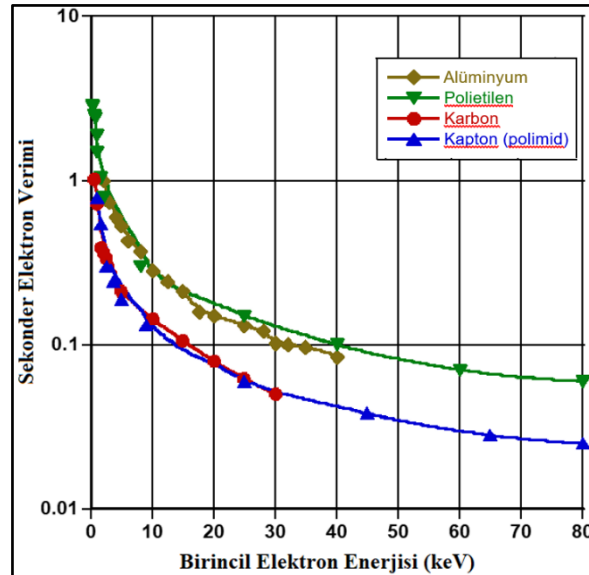
Kolektör üzerine yalıtkan kaplandığında, bu malzemelerde oluşan ikincil elektron verimi metallere göre oldukça düşüktür (Şekil 6.27) [190]. Bu durum, organik moleküllerdeki bağların, metal atomlarındaki elektronik bağlarla karşılaştırıldığında oldukça zayıf olmasından kaynaklanır. Nükleer pilde üretilen ikincil elektronlar, kolektörler arasındaki elektrik alana düşer ve asıl beta parçacık akımının tersi yönünde bir zıt akım oluşturur. Bu nedenle karşı kolektör

malzemesi en düşük sayıda ikincil elektron oluşmasını sağlayacak şekilde seçilmelidir veya metal kolektör uygun bir yalıtkan malzeme ile kaplanmalıdır.



Şekil 6.27 Metal ve yalıtkan yüzeydeki ikincil elektron enerji dağılımı

Birincil elektron sayısına bağlı olarak; alüminyum, polietilen, karbon ve kapton film için ikincil elektron verimi Şekil 6.28’de gösterilmiştir [191]. Grafikte görüldüğü gibi, alüminyum üzerine kaplanmış karbon veya polimid (kapton) film, 6 keV’lik trityum enerji bölgesindeki beta parçacıklarının oluşturduğu ikincil elektron verimini, 0.5’ten 0.17’ye kadar düşürmektedir.



Şekil 6.28 İkincil elektron sayısının beta enerjisine bağlılığı

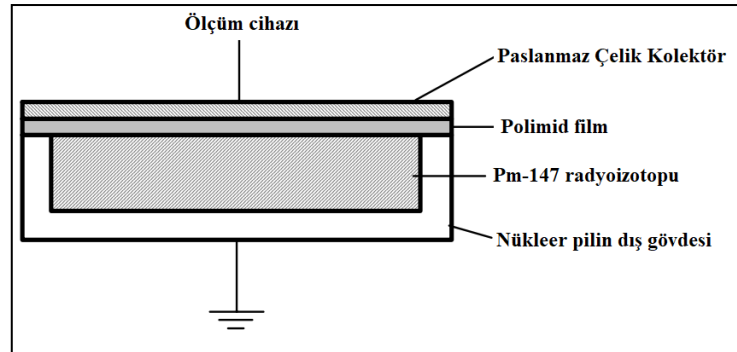
Benzer şekilde ortalama 60 keV’lik Pm-147 beta parçacıklarının oluşturduğu ikincil elektron verimini 0.06’dan 0.03’e kadar düşürmektedir. Kolektör olarak

alüminyum yerine bakır veya çelik kullanıldığında oluşan ikincil elektron sayısı da artar. Bu nedenle bu tür metaller ile yapılan kolektörlerin karbon veya polimid kaplanması büyük avantaj sağlar [192]. 5 keV'lik birincil elektron enerjisi için farklı polimer malzemelerin ikincil elektron oluşumuna etkisi Tablo 6.6'da verilmiştir [193].

Tablo 6.6 5 keV'lik birincil elektron enerjisi için, ikincil elektron oluşumunu azaltan en uygun polimer malzemeler

PET	Polistren	Naylon	PMMA	Polimid
0.3	0.3	0.6	0.7	0.15

Şekil 6.29'da polimid yalıtkan malzeme ile kaplı Pm-147 tabanlı DŞNP'nin bir plakasına ait tasarım gösterilmiştir. Bu hususlar dikkate alınarak Pm-147 tabanlı doğrudan şarjlı nükleer pilin kolektöründe oluşan ikincil elektron katsayısı $s=0.17$, trityum tabanlı nükleer pil için ise $s=0.03$ civarındadır.



Şekil 6.29 Polimid kaplı Pm-147 tabanlı nükleer pilin yapısı

Literatürde, ikincil elektron oluşumunu azaltmak için kolektöre kaplanan başka bir malzeme de boron nitrit'dir ve karbonla yaklaşık olarak aynı etkiye sahiptir [25].

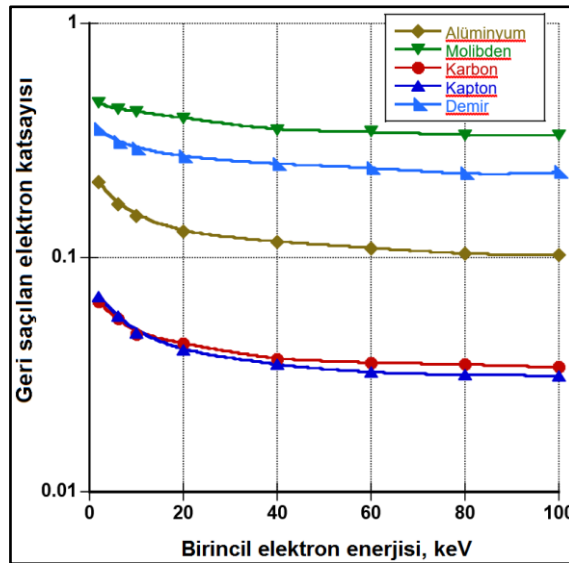
e. Geri Saçılma Etkisi

Geri saçılan elektronlar, beta parçacıklarının çarptığı malzemenin atomları ile yaptığı elastik saçılma ile geriye saçılan elektronlardır. Belirli atom numarasına sahip malzemeler ve birincil elektron enerjileri için birkaç farklı yarı ampirik (yarı deneysel) geri saçılma denklemi geliştirilmiştir [194],[195]. Yapılan bütün

yaklaşımlara göre, saçılmanın olduğu malzemenin etkin atom numarası arttığında (Z_{eff}) geri saçılma etkisi de artmaktadır. Geri saçılma etkisi aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [196].

$$b = \frac{\ln(Z_{efektif})}{6} - 0.2 \quad (6.84)$$

Bu sonuca göre açıkça, kolektör malzemesinin düşük atom numaralı ve beta kaynağının kaplandığı malzemenin ise yüksek atom numaralı seçilmesi gerekmektedir. Elektronların alüminyum, molibden, çelik, karbon, kapton malzemelerdeki geri saçılma katsayısını belirlemek için, Monte-Carlo tabanlı Casino programıyla yapılan modelleme sonuçları Şekil 6.30'da görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi karbon veya polimid kaplı kolektörler 6 keV'lik trityum beta parçacıklarının geri saçılma katsayısını 0.05' e düşürürken, 60 keV'lik Pm-147 beta parçacıklarınınkini 0.03'e düşürmektedir. Radyoaktif kaynak için yüksek atom numaralı metal plaka kullanılması, kolektöre giden trityum beta parçacık sayısını 0.5 oranında, Pm-147 beta parçacık sayısını ise 0.3 oranında artırmaktadır. Ancak geri saçılan betaların enerjileri, kaynaktan çıkan beta enerjilerine göre %10 daha düşük olmaktadır [197]. Sonuç olarak geri saçılma katsayısı trityum tabanlı DŞNP için 0.05, Pm-147 tabanlı DŞNP için ise 0.03 olarak alınmıştır.



Şekil 6.30 Geri saçılma katsayısının birincil elektron enerjisine bağlılığı

6.2.3 Doğrudan Şarjlı Nükleer Pil Veriminin Teorik Değeri

Doğrudan şarjlı nükleer pilin toplam verim ifadesini hesaplamak için, yukarıda verilen tüm verim parametre katsayıları Tablo 6.7'ye girilmiştir. Tablodaki değerler, denklem (6.48)'de verilen formülde yerine yazıldığında DŞNP'nin toplam teorik verimi, trityum tabanlı DŞNP için,

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{1}{2} \cdot \frac{V \cdot \eta_R(V)}{\varepsilon_{ort}} \cdot \eta_K \cdot k_g \cdot (1 - s) \cdot (1 - b) \\ &= \frac{1}{2} \cdot 0.45 \cdot 0.7 \cdot 0.95 \cdot 0.87 \cdot 0.95 = 0.1\end{aligned}\quad (6.85)$$

Pm-147 tabanlı DŞNP için,

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{1}{2} \cdot \frac{V \cdot \eta_R(V)}{\varepsilon_{ort}} \cdot \eta_K \cdot k_g \cdot (1 - s) \cdot (1 - b) \\ &= \frac{1}{2} \cdot 0.60 \cdot 0.8 \cdot 0.95 \cdot 0.97 \cdot 0.97 = 0.2\end{aligned}\quad (6.86)$$

olarak elde edilir.

Tablo 6.7 H-3 ve Pm-147 tabanlı DŞNP'nin verimini etkileyen faktörler

Verimi Etkileyen Faktörler	Trityum Tabanlı	Pm-147 Tabanlı
Kaynağın verimi (4π geometri), η_K	0.7	0.8
Geometrik faktor, k_g	0.95	0.95
Biriken voltaj etkisi, $\frac{V \cdot \eta_R(V)}{\varepsilon_{ort}}$	0.45	0.60
İkincil elektron verimi, s	0.17	0.03
Geri saçılma etkisi, b	0.05	0.03

NİKEL-63 TABANLI BETAVOLTAİK NÜKLEER PİL GELİŞTİRİLMESİ

7.1 GaN P-I-N Yarı İletken Aygıt Üretim Çalışmaları

Mevcut tez araştırmasında, farklı yapısal özelliklere sahip, GaN yarı iletken tabanlı betavoltaik nükleer pil prototipleri geliştirilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, üretilecek olan GaN yarı iletken p-i-n eklemlerinin tabaka kalınlıkları, katkılama yoğunlukları, kullanılacak kontaklar ve bunlar arasındaki izolasyon miktarı, şant direnci ve seri direncin etkisi, GaN malzemesinin radyasyon direnci ve rekombinasyon etkisi gibi nükleer pil verimini etkileyen birçok parametrenin belirlenmesi amacıyla çeşitli bilgisayar simülasyonları yapılmıştır. Simülasyonlarının birinci kısmı, radyoaktif kaynaktan çıkan beta parçacıklarının enerji spektrumunu, kaynağın kendini zırlama etkisini ve betaların yarı iletken içinde bıraktıkları enerji miktarını belirlemek için yapılmıştır. Simülasyonların ikinci kısmı, kullanılan radyoaktif kaynağın enerjisine göre üretilecek olan GaN yarı iletken örneklerle ait, 6. bölümde bahsedilen fiziksel ve elektriksel parametre değerlerinin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Yarı iletken özelliklerin modellenmesi için Silvaco ATLAS simülasyon programı kullanılırken, radyoaktif kaynaktan çıkan beta parçacıklarının modellenmesi için, MCNPX, Fluka ve Tracer Monte-Carlo simülasyon kodları uygulanmıştır. Yarı iletken simülasyon sonuçlarından elde edilen bilgiler ışığında MOCVD yöntemi kullanılarak istenilen özelliklerde GaN aygıt üretimleri gerçekleştirilmiştir. Kaynağın zırlama etkisi ve enerji spektrumları ile ilgili yapılan modelleme sonuçları kullanılarak Ni-63 ve Pm-147 radyoaktif ince film kaplama çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

a. Silvaco-ATLAS Yarı İletken Simülasyonu

Betavoltaik nükleer pilin yapısındaki yarı iletkende gerçekleşen fiziksel süreçlerin simülasyonu, Silvaco ATLAS Bilgisayar Destekli Tasarım (TCAD) simülasyon programı ile yapılmaktadır. Silvaco ATLAS, sonlu elemanlar analiz metodunu

kullanarak, yarı iletkenlerin elektriksel, optik ve termal davranışını simüle eder [198]. Temel elektrodinamik denklemler kullanılarak, üretilen yarı iletkenin tüm özellikleri türetilmiştir. Bu denklemler birleştirilmiş kısmi diferansiyel denklemler, Poisson denklemi ve süreklilik denklemidir. Bilindiği gibi, Poisson denklemi yerel yük yoğunluklarını ve elektrostatik potansiyeli birbirine bağlarken, süreklilik denklemi ise yük taşıyıcıları olan elektronların ve deşiklerin üretimini, taşıyıcı yoğunluklarını, iletimini ve rekombinasyon süreçlerini tanımlar.

Silvaco ATLAS programında çeşitli fizik modelleri kullanılarak yarı iletken aygıttaki tüm süreç simüle edilebilir. Program, kullandığı fizik modellerinde potansiyel ve akım yoğunluğunu türetmek için sayısal hesaplamalara ek değişkenler atar. Yarı iletkendeki yük taşıyıcı yaşam süresi, farklı birçok rekombinasyon parametresinden oluşur [199]. Modellemede, bu rekombinasyon süreçleri sırasıyla modele eklenerek, hangi rekombinasyon parametresinin pil performansını daha çok etkilediği tespit edilebilir. Nükleer pilin deneysel en yüksek verim değerine ulaşabilmesi için, simülasyon sonuçlarından elde edilen verilere göre yapılması gereken optimizasyonların öngörülebilmesi oldukça önem teşkil eder.

b. MCNPX, Fluka ve Tracer Monte-Carlo Simülasyonu

MCNPX, nötron, foton ve elektron iletimini modellemek için kullanılan genel amaçlı bir Monte Carlo kodudur [200]. Transport kodu, modellemede 32 tür parçacığı izleyebilir. Kodu içerisinde bulunan geniş parçacık kütüphanesinde, birçok parçacık reaksiyonunun tesir kesitine ait bilgiler bulunmakta olup, enerjileri 1 keV'den 100 MeV'e kadar olan parçacıkların malzeme içindeki hareketini simüle edebilir.

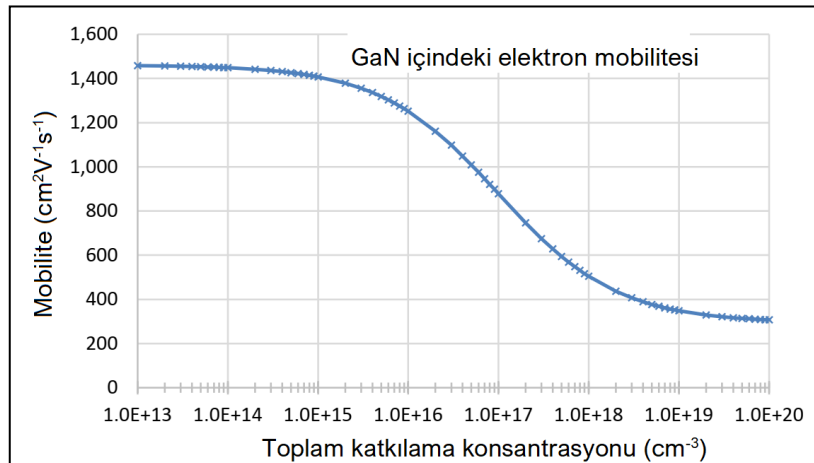
Bu tez çalışmasında GaN malzemesinin bazı elektriksel ve fiziksel parametreleri ile GaN yarı iletkeninin her bir tabakasında depolanan beta parçacık enerjisi ve bu parçacıkların menzili; MCNP, Fluka ve Tracer simülasyonları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasında geliştirilen GaN yarı iletken malzemesi için, kesim 6.1.1’de bahsedilen fiziksel parametrelerin simülasyon sonuçları aşağıda verilmiştir.

7.1.1 GaN Yarı İletken Malzeme Parametrelerinin Simülasyonu

7.1.1.1 GaN Yük Taşıyıcı Mobilitesi

GaN malzeme içerisindeki yük taşıyıcı hareketliliği, Farahmand Modified Caughey Thomas (FMCT) modeli kullanılarak modellenmiştir. Bu model, yarı iletken içindeki elektron hareketliliğini temsil eden Caughey Thomas modelinin, Farahmand tarafından Monte Carlo tekniğine uyarlanması ile elde edilmiştir [201]. Modele ait parametreler, deneysel verilere uygun fiziksel değişkenler kullanılarak elde edilmiştir. FMCT modeli, safsızlık konsantrasyonunu ve sıcaklığın fonksiyonu olan mobilitayı dikkate alır [202]. GaN malzemedeki elektron mobilitasının, katkılama konsantrasyonuna bağlılığı Şekil 7.1’ de verilmiştir.



Şekil 7.1 GaN malzemedeki elektron mobilitasının safsızlık katkılama konsantrasyonuna bağlı değişimi

7.1.1.2 GaN Derin Seviye Tuzakları

Bölüm 6.1.1’de bahsedildiği gibi yarı iletken üretim sürecinden veya radyasyondan kaynaklı olarak yarı iletken kristal yapı içerisinde birtakım kusurlar oluşmaktadır. GaN üretim sürecindeki teknolojik kısıtlamalardan dolayı, kristal yapı içerisinde oluşan kusurlar, tuzak durumları denen ayrı enerji düzeylerinin oluşmasına neden olur. Valans ve iletim bandı enerji seviyelerinden farklı enerji

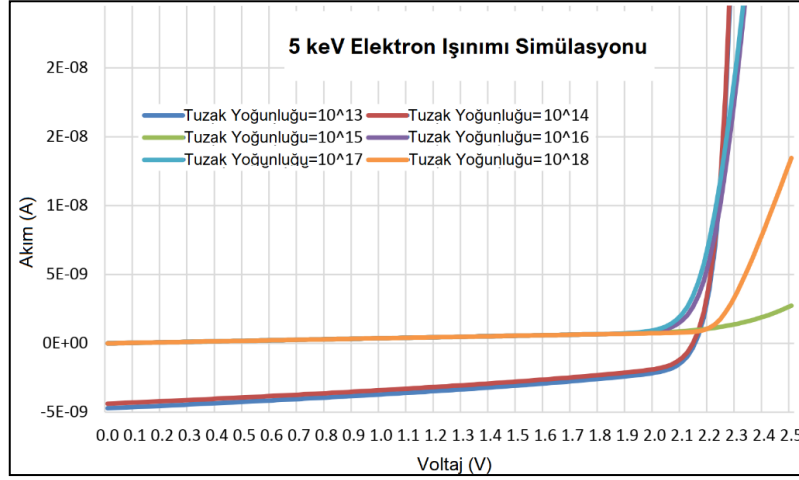
düzeylerine sahip olan bu tuzaklar, yük taşıyıcılarının yarı iletkende rekombinasyonuna da neden olurlar. Bu kusurlar, üretim sürecinin yanında, yarı iletken alt tabakasını oluşturan malzemenin türüne bağlı olarak da meydana gelmektedir. Günümüz teknolojisinde GaN fabrikasyonu için kullanılan alt tabaka malzemeleri, örgü boyutunda birbirlerine göre farklılık gösterir. Bu farklılığa bağlı olarak daha fazla kusur oluşur ve örgü uyumsuzluğu artar. Tez çalışmasında betavoltaik nükleer pil için üretimi yapılan GaN yarı iletken malzemede, safir (Al_2O_3) alt tabaka kullanılmıştır. Literatürde GaN için belirlenen genel tuzak enerji seviyeleri Tablo 7.1’de verilmiştir [203], [204].

Tablo 7.1 GaN tuzak enerji seviyeleri ve konsantrasyonları

Tuzak Tanımı	Tuzak Türü	Valans Bandına göre Enerjisi (eV)	Durum Konsantrasyon Yoğunluğu (cm^{-3})	Tuzak Kesit Alanı (cm^2)
H2	Verici	0.55	2.4×10^{14}	2.7×10^{-12}
H3	Verici	0.65	2.1×10^{14}	1.7×10^{-14}
H4	Verici	0.85	3.4×10^{14}	1.8×10^{-13}
H5	Verici	1.20	2.9×10^{15}	4.7×10^{-14}
E1	Alıcı	0.17	1.0×10^{14}	2.3×10^{-17}
E2	Alıcı	0.52	9.0×10^{14}	3.3×10^{-16}
E3	Alıcı	0.53	5.8×10^{14}	3.3×10^{-17}
E4	Alıcı	0.94	5.8×10^{15}	1.0×10^{-16}

Tablodaki durum yoğunluğu, cihaz boyunca meydana gelen tuzak yoğunluğunu ifade eder. Tuzak yoğunluğunun, betavoltaik pilin I-V eğrisi üzerindeki etkisini görmek için Silvaco ATLAS programı ile yapılan modelleme sonucu Şekil 7.2’de gösterilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi 10^{15} cm^{-3} ’ten düşük tuzak yoğunluklarının I-V eğrisi üzerindeki etkisi küçüktür. Ancak bundan daha yoğun tuzak durumları, istemsiz tabakanın (u-tipi) yoğunluğundan daha yüksek olduğundan dolayı, p-n

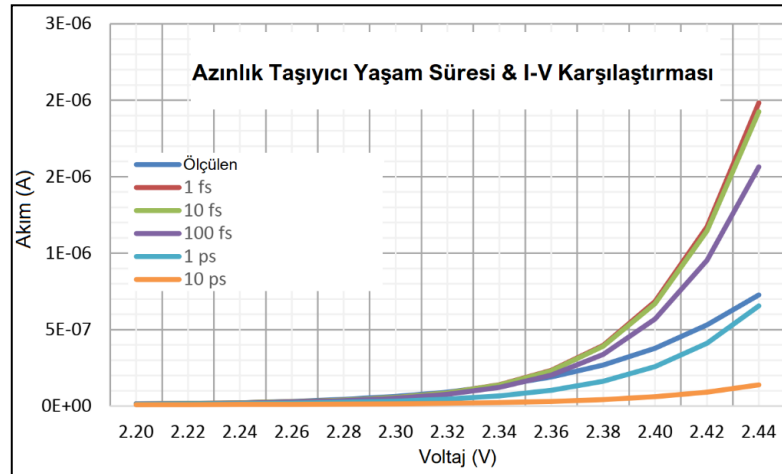
ekleminin n^+ ve u-tipi tabaka arasındaki durumu değiştirir. Diğer bir ifadeyle tuzak düzeyleri, yarı iletken katkı maddesi gibi etki göstermektedir.



Şekil 7.2 $10^{13} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ arası tuzak yoğunluğunun I-V eğrisine etkisi

7.1.1.3 GaN Azınlık Taşıyıcı Yaşam Süresi

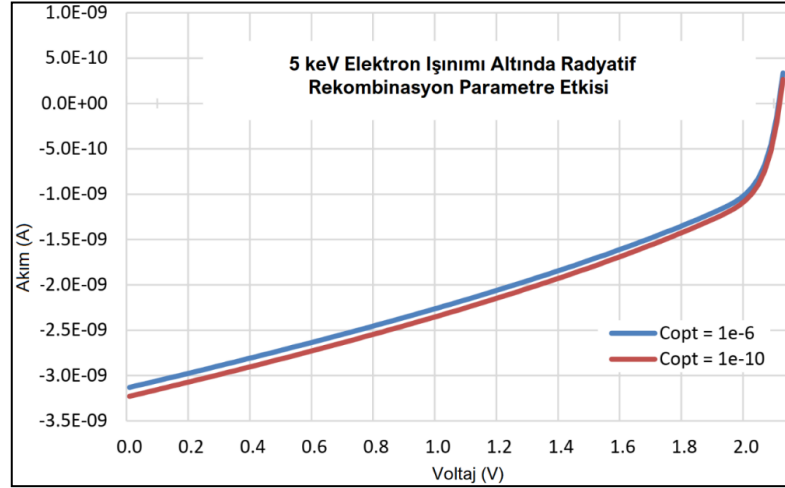
Denklem (6.1)'de verilen azınlık taşıyıcı yaşam süresinin, GaN yarı iletken eklemine ait I-V eğrisi üstündeki etkisini görebilmek amacıyla yapılan simülasyonun sonuçları, tez çalışmasında üretilen GaN eklemine ait I-V ölçüm değerleri ile karşılaştırılmıştır. Farklı taşıyıcı yaşam sürelerinin I-V eğrisi üzerindeki etkisi Şekil 7.3'de gösterilmiştir.



Şekil 7.3 1 fs-1s arasında azınlık taşıyıcı yaşam süresinin I-V eğrisine etkisi

7.1.1.4 GaN Radyatif Rekombinasyon Etkisi

5 keV elektron ışınlamı altında radyatif rekombinasyon parametresinin GaN I-V eğrisi üzerindeki etkisi modellenmiştir. Şekil 7.4'de verilen grafiğe göre bu tür bir rekombinasyonun, pil performansı üzerindeki etkisi oldukça düşüktür. Simülasyonda $10^{-10} \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ ve $10^{-6} \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ radyatif rekombinasyon parametre değerleri karşılaştırılmıştır.

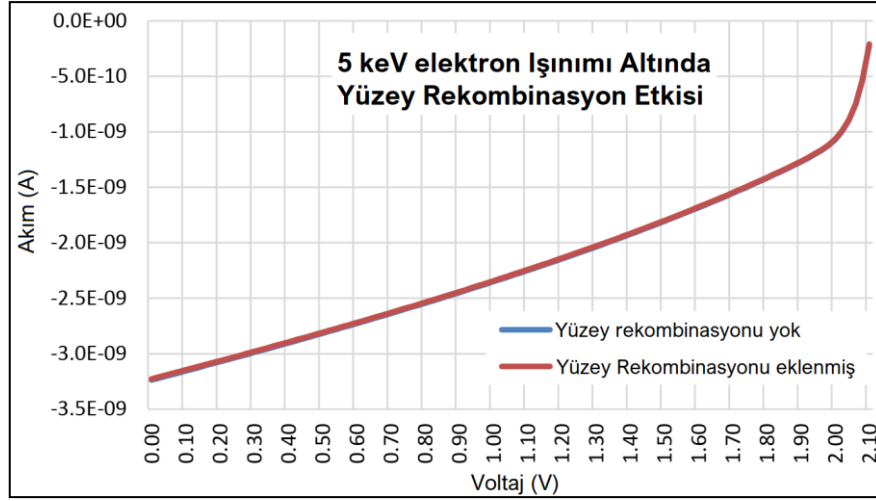


Şekil 7.4 5 keV elektron ışınlamı altında radyatif rekombinasyon etkisi

7.1.1.5 GaN Yüzey Rekombinasyon Etkisi

GaN yarı iletkeninde, azınlık taşıyıcı yaşam süresi yeteri kadar uzun olduğundan dolayı, difüzyon uzunluğu etkisi önemsizdir. Şekil 7.3'de verilen modelleme sonuçları için, GaN yarı iletkenindeki azınlık taşıyıcı yaşam süresi ortalama 1 ps'dir. Tablo 6.3'ten elektron difüzyon katsayısı $25 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ alınırsa [25], denklem (7.1)'e göre, GaN yarı iletkenindeki difüzyon uzunluğu 50 nm civarında elde edilir. Bu değer, difüzyondan dolayı oluşan rekombinasyon etkisinin oldukça düşük olduğunu göstermiştir. Elde edilen sonuç yüzey rekombinasyon modellemesi ile doğrulanmış ve 5 keV elektron ışınlamı altında Şekil 7.5'de verilen I-V eğrisi elde edilmiştir.

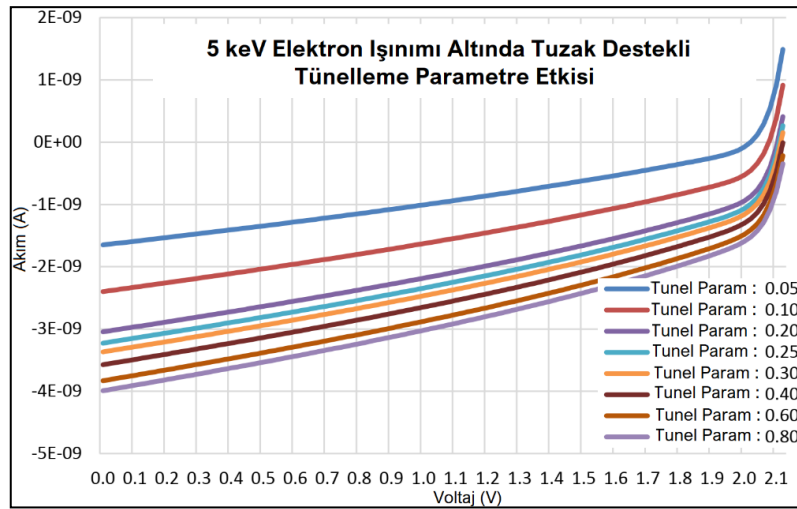
$$\sqrt{\tau D} = \sqrt{1 \text{ ps} \times 25 \text{ cm}^2/\text{s}} = 50 \text{ nm} \quad (7.1)$$



Şekil 7.5 5 keV'lik elektron ışınlamı altında yüzey rekombinasyon etkisi varken ve yokken elde edilen I-V eğrisi

7.1.1.6 GaN Tuzak Destekli Tünelleme Etkisi

Kesim 6.1.1.1'de bahsedilen tuzak destekli tünelleme parametresinin, GaN tabanlı betavoltaik nükleer pilin performansı üzerindeki etkisi yüksektir. Bunun nedeni, betavoltaik nükleer pilin düşük akım ve voltaj değerlerinde çalışmasıdır. Şekil 7.6'da, 5 keV elektron ışınlamı altında, tünelleme parametresinin I-V eğrisi üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, yüksek parametre değerlerinde, potansiyel bariyerden daha fazla akım geçmektedir.

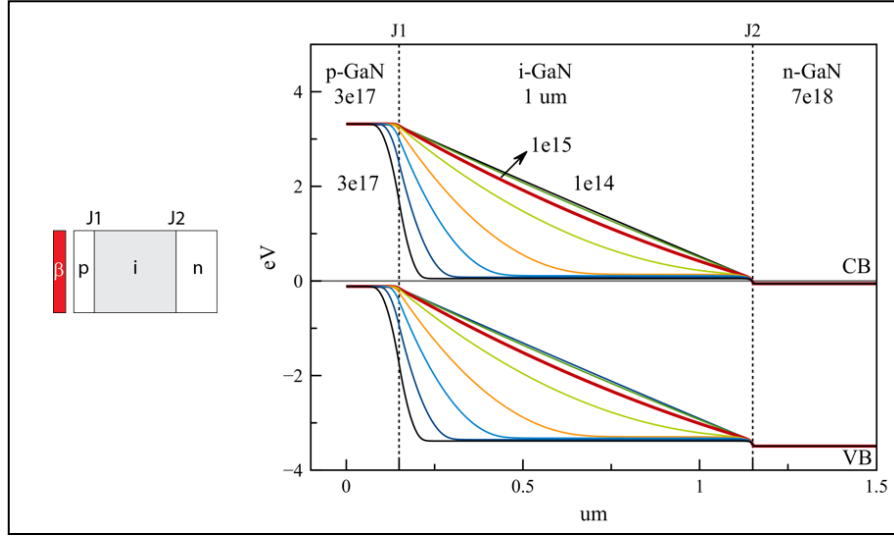


Şekil 7.6 Tünel parametresinin betavoltaik akım üzerindeki etkisi

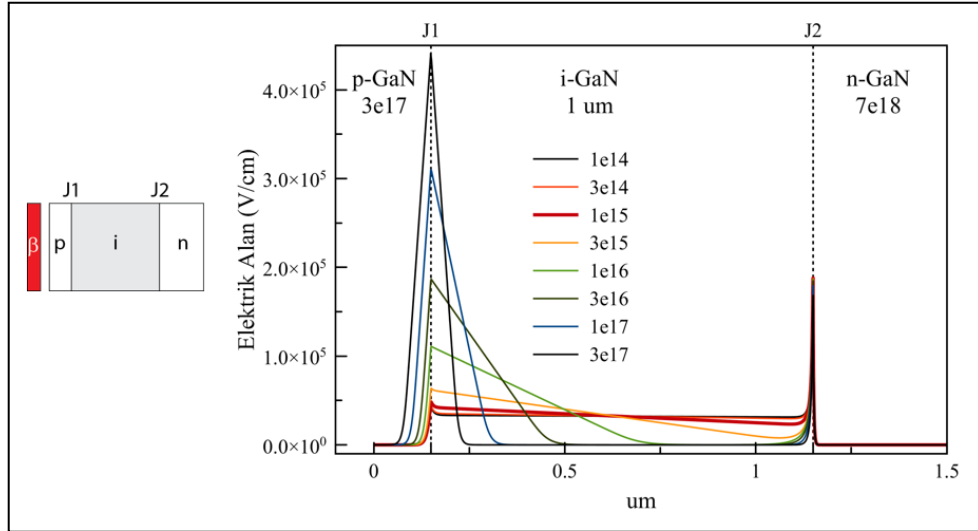
7.1.1.7 GaN Aktif Bölge Kalınlığı Simülasyonu

6. bölümde anlatıldığı gibi üretilcek GaN yarı iletkenin aktif bölgesi, Ni-63 kaynağından çıkan yüksek enerjili elektronların aygıt içerisindeki dağılımı düşünüldüğünde, olabildiğince çok çarpışma/saçılma noktası içerecek kadar uzun, tamamı elektrik alan içerecek kadar da kısa olmalıdır. Optimum aktif bölge kalınlığını belirlemek için de Silvaco simülasyon programı kullanılmıştır. Şekil 7.7’de, yüzey-alttaş doğrultusundaki intrinsik bölgenin farklı katkılama yoğunluklarına göre, GaN valans ve iletim bant yapısının değişimi gösterilmiştir. P-katman ve n-katman katkı konsantrasyonları, kristal yapıyı bozmayacak şekilde ve MOCVD sisteminde yapılabilecek en yüksek değerlerde seçilmiştir. Şekil 7.8’de, yine aynı konsantrasyon değerleri için Şekil 7.7’deki enerji dağılımının eksi türevi alınarak elde edilen elektrik alan dağılımı gösterilmiştir. GaN kristal büyütmenin doğasından kaynaklı olarak i-bölgesi n-tipi katkılı olmaktadır. Bunun sebebi, GaN malzeme büyütüldüğünde Ga/N oranı 1 olmadığı için, N (azot) eksikliği ile malzemenin efektif olarak n-tipi katkılı gibi davranmasıdır. $n(i) = 3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ için i bölge içinde elektrik alanının bulunduğu derinlik yaklaşık 90 nm’dir. Bu aktif alan, $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ için 350 nm’ye çıkmakta ve $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ için yaklaşık 1 μm ’ye uzamaktadır. Dolayısıyla betavoltaik nükleer pilde kullanılacak p-i-n eklem için 1 μm ’lik aktif alan yapılması düşünüldüğünde, i-tabaka katkı seviyesi $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ’e kadar düşülmelidir. GaN malzemenin kritik elektrik alanı (malzemenin kırıldığı alan) $E_c \sim 3\text{-}5 \times 10^6 \text{ V/cm}$ ’dir. Simülasyonda elde edilen maksimum alan bu değer altındadır. Dolayısıyla bu elektrik alanlarda malzemenin kırılmayacağı varsayılabilir. Diğer yandan, $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ve altı katkı düzeyinde, $3 \times 10^4 \text{ V/cm}$ gibi bir elektrik alanda, oluşan elektronları rekombinasyon olmadan, rahatlıkla kontaklara ulaştırabilecek seviyededir. Tipik $100 \text{ cm}^2/\text{V-s}$ mobilite için (μ), sürüklenme hızı (drift velocity) $v_d = 100 \times 3 \times 10^4 = 3 \times 10^6 \text{ cm/s}$ ve 1 μm için elektronların geçiş süresi, $t = (1 \times 10^{-4} \text{ cm}) / (3 \times 10^6 \text{ cm/s}) = 0.33 \times 10^{-10} \text{ s} = 3.3 \times 10^{-11} \text{ s} = 33 \text{ ps}$ ’dir. GaN malzemede tipik taşıyıcı ömürleri nanosaniye ve üzeri mertebededir. Dolayısıyla herhangi bir elektrik alan altında bütün taşıyıcıların rekombinasyon olmadan kontaklara ulaşabileceğini varsayabiliriz. Elektrik alan

olmadığı durumda difüzyon sabiti yaklaşık $D=20 \text{ cm}^2/\text{s}$ iken, n_s taşıyıcı ömrü için, difüzyon uzunluğunu $1 \mu\text{m}$ olarak kabul edebiliriz.



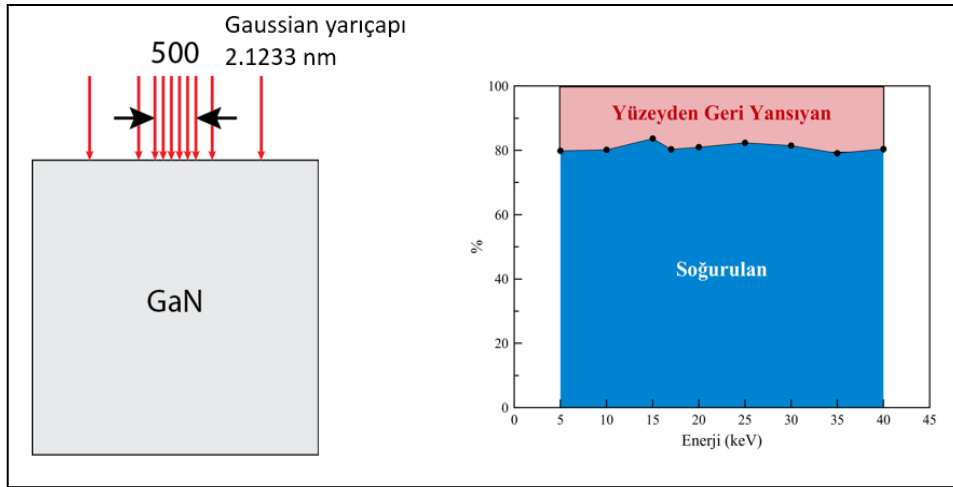
Şekil 7.7 p-i-n bant yapısının, intrinsik bölge katkılama miktarının fonksiyonu olarak değişimi



Şekil 7.8 p-i-n aygıt içerisinde, intrinsic bölge katkılama miktarının fonksiyonu olarak elektrik alanın dağılımı

Aktif alanın belirlenmesinde, diğer bir önemli parametre p-GaN kalınlığıdır, çünkü beta parçacıkları elektrik alanın olduğu bölge dışında da elektron-deşik çifti oluşturmaktadır. Yine Şekil 7.8'i incelediğimizde, $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ taşıyıcı yoğunluğu için, 150 nm'lik p-GaN tabakasının ilk 120 nm'sinde elektrik alan bulunmadığı

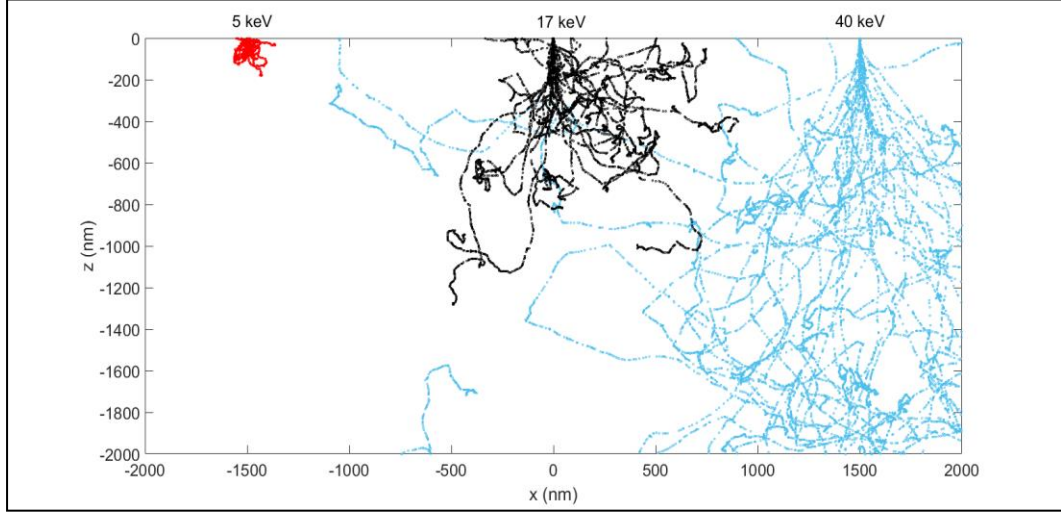
görülür. Bu bölgede üretilen taşıyıcılar sadece difüzyon ile hareket edebilmekte,deşikler p-kontağa doğru, elektronlar ise i-bölgesine doğru difüz edebilmektedir. Sonuç olarak minimum 30 nm'lik p-GaN kalınlığı, 1 μm elektrik alan için $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ve altı katkılama ile aktif bölge tasarımı optimum gözükmektedir. Taşıyıcıların oluşturulduğu derinliğin hesaplanması ve gerekli aktif bölge kalınlığının net olarak belirlenmesi için rastgele elektron saçınım dinamiklerinin hesaplanabildiği Tracer Monte-Carlo simülasyonu ile devam edilmiştir. Simülasyonlar öncelikle GaN malzemesi kullanılarak, 2.12 nm'lik bir yarıçap içerisinde 500 adet elektron gönderilerek gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.9'da simülasyon şematiği gösterilmiştir. Burada yüzeyden geri yansıyan ve GaN içerisinde soğurulan elektron yüzdeleri verilmiştir. Gönderilen elektronların 1/5'i yüzeyden geri yansımaktadır. Geri kalan 4/5'lik kısım ise, GaN içerisinde toplam enerjisinin bir fonksiyonu olarak (yüksek enerjili olanlar daha çok çarpışma ile, düşük enerjili olanlar daha az çarpışma ile) enerjisini kaybetmektedir.



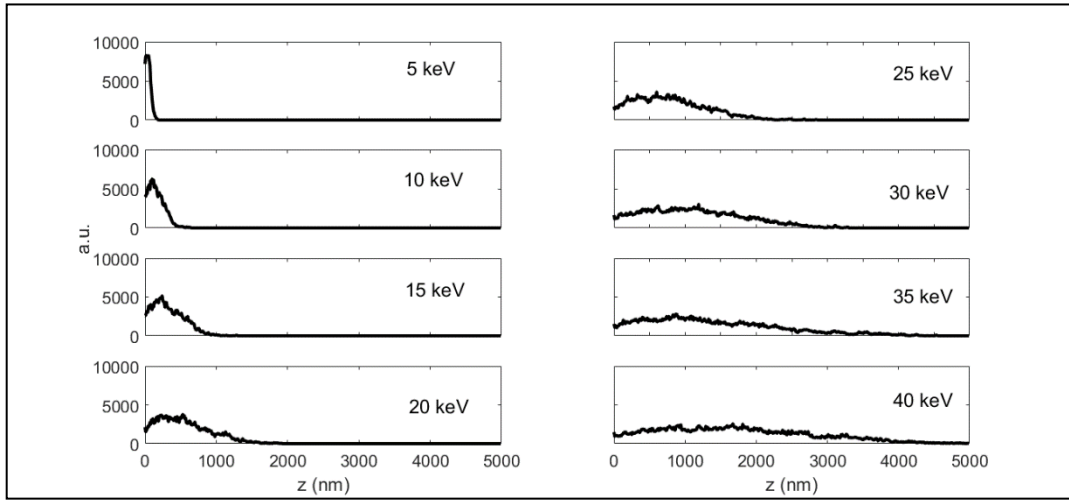
Şekil 7.9 Monte-Carlo simülasyonunda elektron sütununun özellikleri ve soğurulma/yüzeyden saçılma yüzdeleri

Şekil 7.10'da, 5, 17 ve 40 keV enerjiye sahip elektronların izlediği yollar görülmektedir. Kabaca bakıldığında, 5 keV'lik elektronlar yüzeye yakın 100 nm içerisinde soğurulmakta, 17 keV'lik elektronlar yaklaşık 1 μm 'lik derinlik içerisinde kalmakta, 40 keV'lik elektronlar ise 2 μm derinliğe kadar inmektedir.

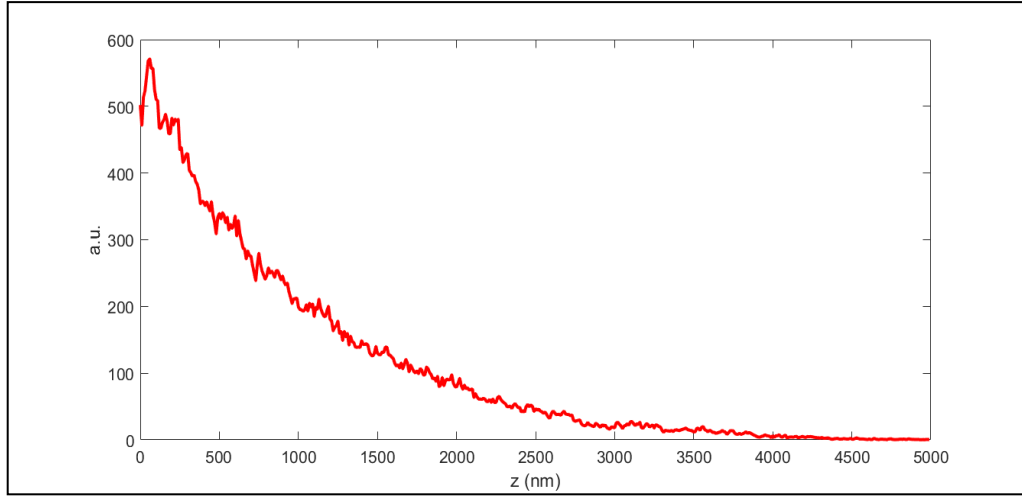
Yine farklı beta enerjisi seviyeleri için, çarpışmaların koordinat dağılımları Şekil 7.11’de verilmiştir. Şekil 7.11’deki enerji dağılımı ve Şekil 7.12’deki yapı içerisine bırakılan doz derinliği göz önüne alındığında, 17 keV’in ve çevresindeki enerjili elektronların enerjilerinin tamamına yakınının 1 μm içerisinde kaybettiği gözükmektedir. Bu sebeple 1 μm ’lik aktif bölge kalınlığının uygun olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 7.10 5, 17 ve 40 keV için yüzey altındaki saçınma görünümü

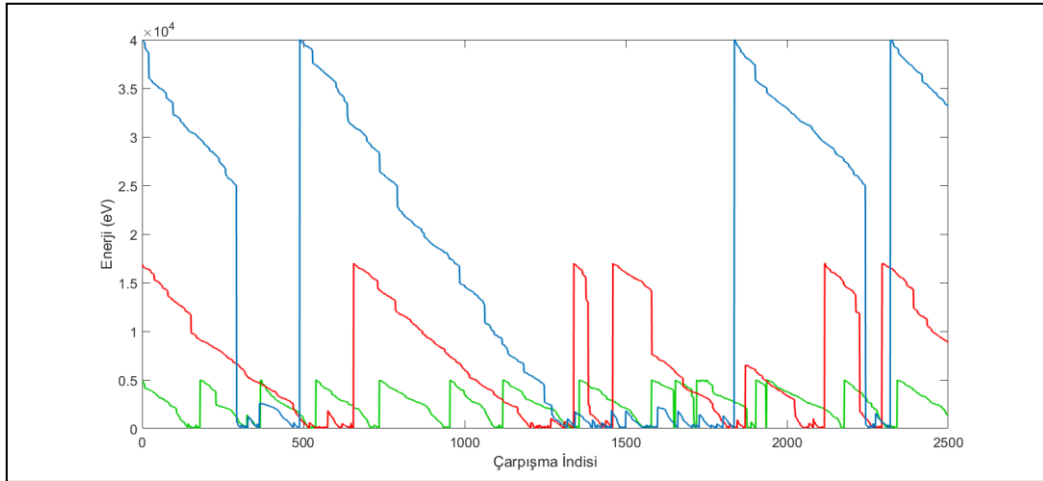


Şekil 7.11 Farklı enerjili betaların GaN ekleme bıraktığı enerji dağılımı

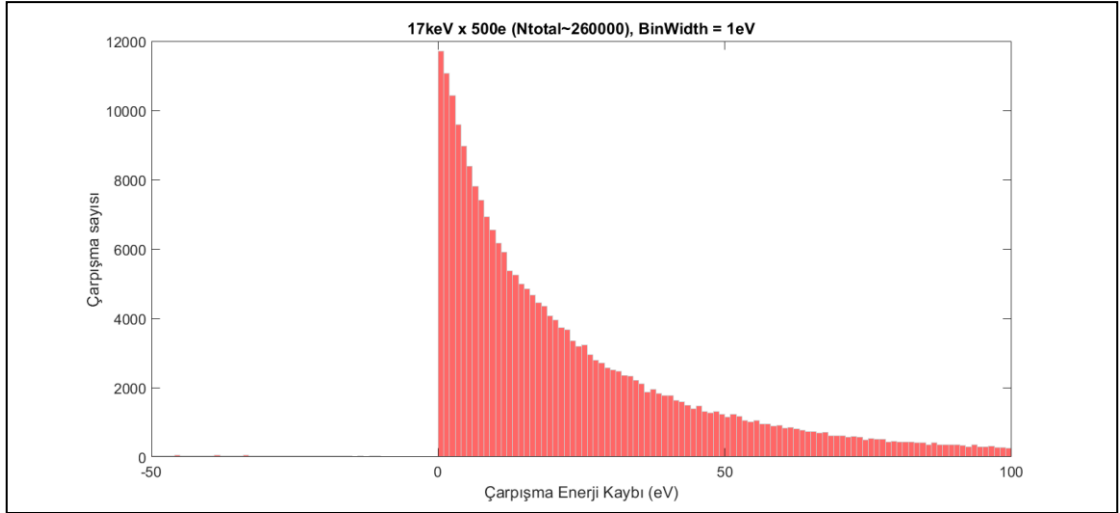


Şekil 7.12 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 keV enerjili saçınım istatistikleri kullanılarak hesaplanan doz dağılımı

Farklı başlangıç enerjili beta parçacıkları için, enerji kaybının çarpışma indisinin fonksiyonu olarak çizilmiş grafiği Şekil 7.13'de verilmiştir. Görüldüğü gibi, grafiklerin eğimi, üç durumda da birbirine yakındır, yani çarpışmada kaybedilen ortalama enerji, başlangıç enerjisinden bağımsızdır. Çarpışmalarda kaybedilen enerjinin histogramı Şekil 7.14'de gösterilmiştir. GaN için denklem (6.9)'da bahsedildiği gibi, yaklaşık 10 eV'lık bir efektif iyonizasyon enerjisi düşünüldüğünde, yalnızca enerjisi 10 eV değerinin üzerindeki elektronlar taşıyıcı üretebilecektir.

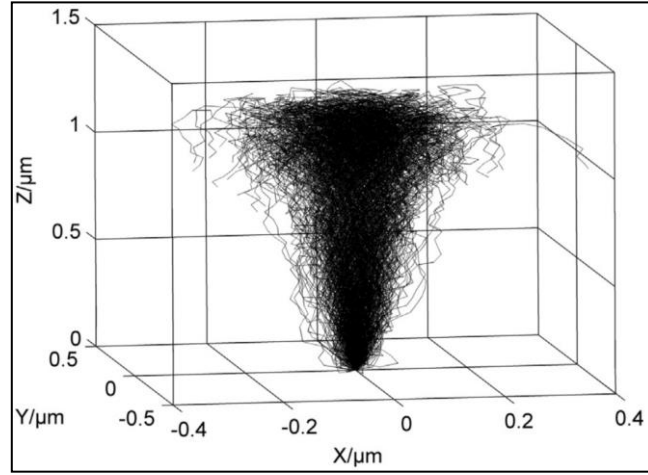


Şekil 7.13 5, 17 ve 40 keV enerjili beta parçacıkları için çarpışma indisinin fonksiyonu olan toplam parçacık enerjisi



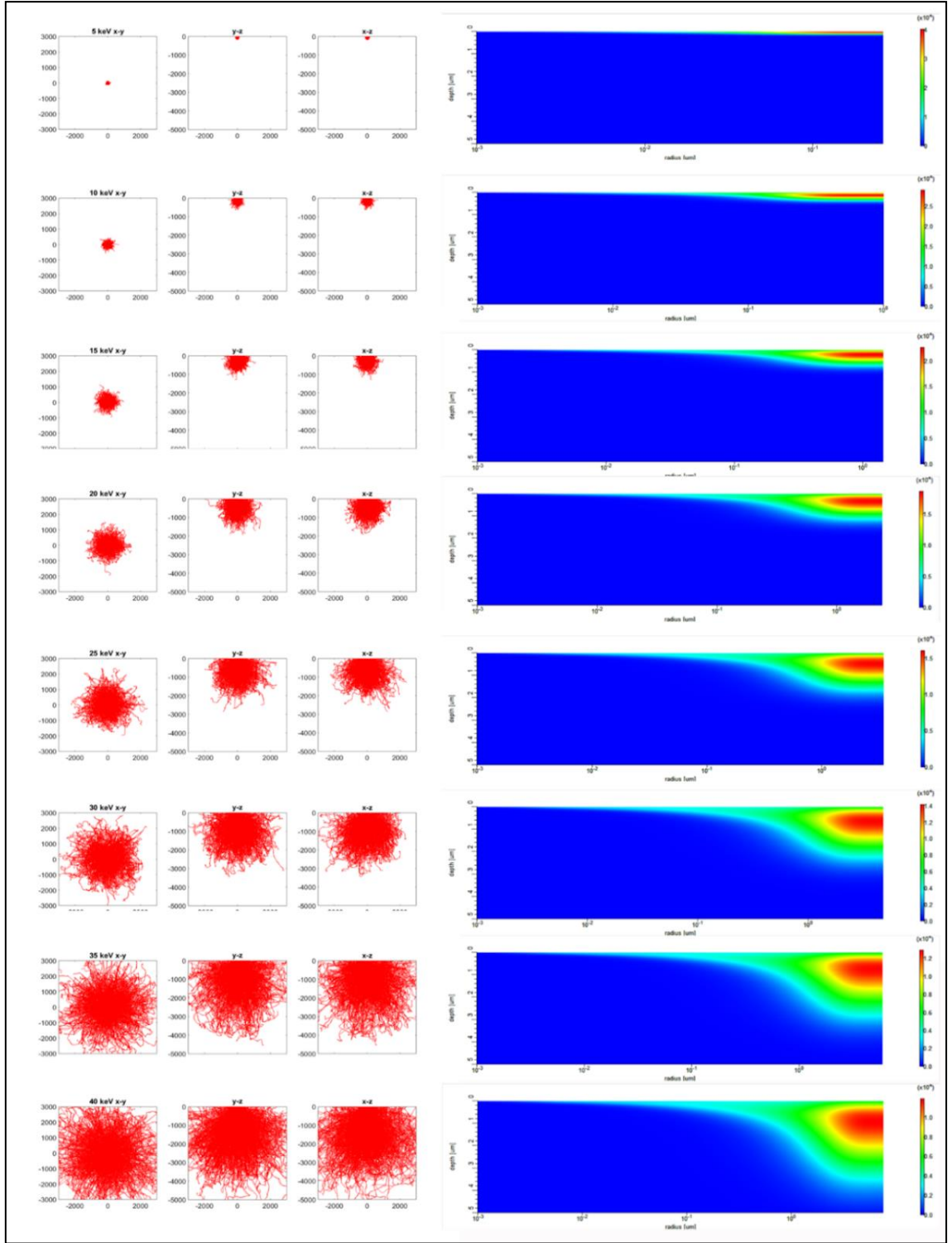
Şekil 7.14 Çarpışmalarda kaybedilen beta parçacık enerji histogramı

Ni-63 ortalama beta enerjisine denk gelen 17 keV için, GaN içerisindeki x-y düzleminde ve z doğrultusundaki beta parçacık yörüngesine ait modelleme sonucu Şekil 7.15 'da verilmiştir. Modelleme sonucuna göre, 1 μm 'lik aktif bölge kalınlığının uygun olduğu görülmektedir.



Şekil 7.15 GaN içerisinde 17 keV enerjili beta yörüngesinin simülasyonu

Benzer şekilde yapılan daha ayrıntılı bir modellemede sırasıyla 5-10-15-20-25-30-35-40 keV arasındaki parçacıkların x-y, x-z ve y-z düzlemlerindeki çarpışma pozisyonları modellenmiş ve bırakılan enerjinin lokasyon dağılım grafikleri Şekil 7.16'de verilmiştir. Verilen y-z ve x-z grafiklerindeki dikey derinlik 5 μm , yatay genişlik 5 μm olarak girilmiştir. Görüldüğü gibi her iki modelleme sonucu 1 μm için birbirini doğrulamaktadır.



Şekil 7.16 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 ve 40 keV enerjili parçacıkların, x-y, y-z, x-z düzlemlerindeki çarpışma pozisyonları ve enerji dağılımı

7.1.2 GaN Aygıt Üretimi

7.1.2.1 Yarı İletken Epitaksi Büyütmesi

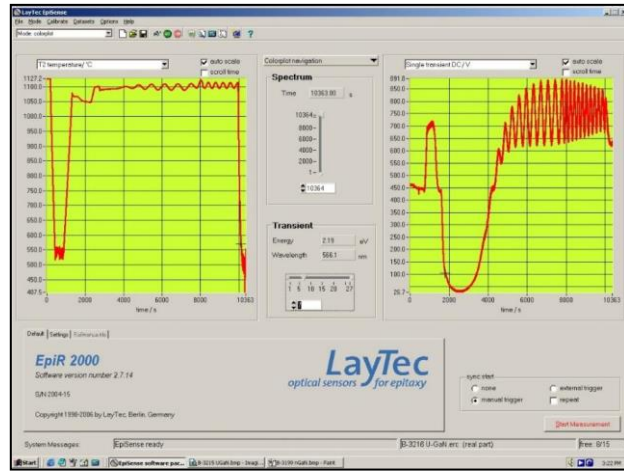
Tez araştırmasında yapılan diğer çalışma, beta ışınlarını absorbe edecek olan p-i-n yapısının geliştirilmesi üzerine yapılmıştır. GaN tabanlı p-i-n epitaksiyel yapısı wafer boyutu artırılarak 3 inç (~7,5 cm) safir alttaş üzerine optimize edilmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucu elde edilen bilgiler ışığında GaN p-i-n yapısının sırasıyla; p-tipi, absorbe edici özelliği yüksek olan i-tipi (katkısız-intrinsik), n-tipi ve tampon katmanlarının geliştirilmesi için epitaksiyel çalışmalar yapılmıştır.

a. Epitaksiyel Yapı 1: GaN Tampon

İlk olarak p-i-n yapısının üzerine oturacağı bir tampon tabaka geliştirme çalışması yapılmıştır. GaN-tampon tabakası MOCVD sisteminde safir alttaş kullanılarak büyütülmüştür. Tampon tabaka öncesi, GaN kristal yapısının düşük kusurlu olarak büyümesi için, örgü parametresi %16 farklı olan safir üzerine GaN çekirdeklenme tabakası kullanılmıştır. 550°C sıcaklıkta ve 200 mbar basınçta büyütülen bu tabakada sıcaklığın düşük tutulması ile Ga-atomunun difüzyon mesafesi bilinçli olarak düşürülerek GaN filmin, yüzeyde üç boyutlu olarak büyümesi sağlanmıştır.

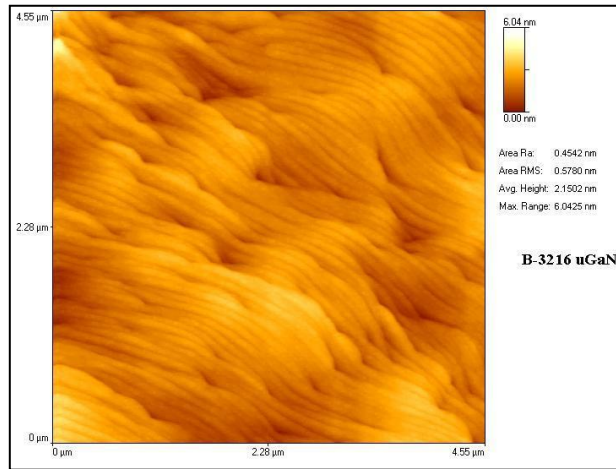
GaN tampon-1 katmanına geçiş için sıcaklık amonyak gazı altında yükseltilmiştir. Amonyak altındaki sıcaklığın yükseltilmesindeki amaç, oluşan üç boyutlu GaN filmdeki yapıdan kurtulan azot atomlarının oluşturdukları boşluklarının doldurulmasıdır. GaN çekirdeklenme katmanında oluşan üç boyutlu GaN filmin oluşturduğu yüzey üzerine, yüksek sıcaklığın etkisiyle difüzyon mesafesi artan Ga atomunun daha büyük boyutlarda kristal tanecik oluşturması ve bu taneciklerin yekvücut olması sağlanmıştır. Yekvücut olan GaN yapısı sonrasında, üç boyutlu büyüme modundan iki boyutlu büyüme moduna geçirilerek tek kristal büyütmesine uygun hale gelmesi sağlanmıştır. GaN tampon-2 katmanında yüksek kristal kalitesi ve yüksek büyüme hızı hedeflenmiştir. Böylece üç boyutlu büyüme modundan iki boyutlu büyüme moduna geçen filmin, hidrat/metal-organik kaynakların akış oranı artırılarak, büyüme esnasında istemsiz oluşan safsızlıklarının azaltılması sağlanmıştır. Ayrıca sıcaklığın ve büyüme hızının

artırılması sonucu, metal atomlarını taşıyan organik bileşiklerin priyoliz olması nedeni ile serbest kalan karbon atomlarının, yapıda safsızlık oluşturması azaltılmıştır. Son GaN tampon tabakası 1100 °C sıcaklık, 200 mbar reaktör basıncı altında 17 sccm TMGa akışı ve 1800 sccm NH₃ akışı verilerek yapılmıştır. Bu akışlarda V/III molar akış oranı 1305 olarak hesaplanmıştır. Büyütmeye ait Fabry-Perot reflektans osilasyonları ve büyüme boyunca yüzey sıcaklığı eğrileri Şekil 7.17'deki ekran görüntüsünde verilmiştir.



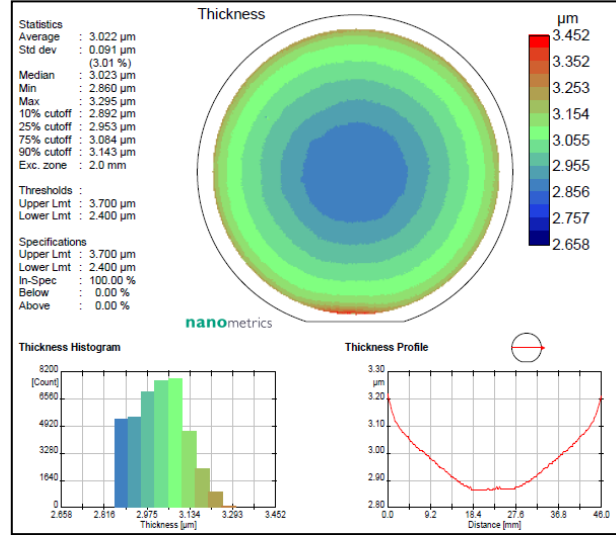
Şekil 7.17 Laytec reflektans grafiği (566.1 nm Fabry-Perot osilasyonları)

Büyütme'den sonra elde edilen GaN tampon örneği, Atomik Kuvvet Mikroskopisi (AFM) ile yüzey analizine ve 4 nokta Hall etkisi analizi ile taşıyıcı-background seviyesi belirleme analizine tabi tutulmuştur. AFM ile alınan yüzey görüntüsü Şekil 7.18'de verilmiştir.



Şekil 7.18 GaN Tampon katmanının AFM görüntüsü

GaN Tampon epitaksiyel yapısının 5 μm x 5 μm alanlı AFM ölçümünde yüzey pürüzlülüğü 0,57 nm olarak ölçülmüştür. Hall etkisi sisteminde elektron taşıyıcı yoğunluğu örnek üzerine 1 mA akım sürülerek $-7,21 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 7.19 GaN tampon kalınlık haritası (Photo Luminescence Mapper)

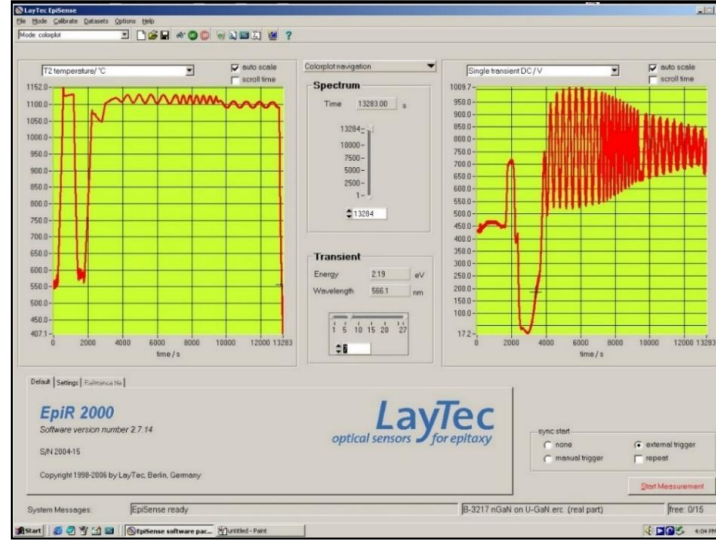
Ayrıca Nanometrics Marka RPM Blue model Photo-Luminescence sisteminde, beyaz ışık kaynağı kullanılarak büyütülen GaN filmin toplam kalınlık haritası çıkarılmıştır (Şekil 7.19). Bu ölçümle toplam ortalama kalınlığın 3022 nm ve kalınlık homojenitesinin %3.01 olduğu belirlenmiştir.

b. Epitaksiyel Yapı 2: n-Tipi GaN

Tampon çalışmasından sonra yaklaşık 3 μm 'luk katkısız GaN tampon tabakası üzerine 1 μm kalınlığından Silisyum katkılı n-tipi GaN tabaka büyötmek için, reaktör hazırlanmıştır. Burada n-tipi GaN altında kalan tampon kısımları epitaksiyel yapı 1 özellikleri ile tamamen aynıdır.

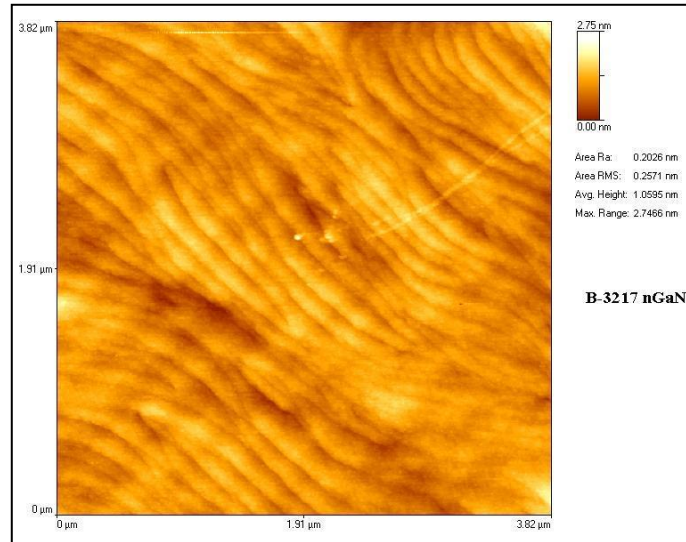
Bu katman, reaktör 1100 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta ve 200 mbar basınçta sabit tutularak büyötmüştür. N-tipi katkılama silan (SiH_4) kaynağı kullanarak yapılmıştır. Bu tabaka için katkılama seviyesi $>5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ hedeflenerek, katkılama / metal organik kaynak moleküler oranı $5,20 \times 10^{-5}$ değerinde ve TMGa kaynağı 10 sccm, SiH_4 kaynağı 20 sccm, NH_3 kaynağı 2000 sccm değerinde tutularak n-Tipi

katmanın büyütmesi yapılmıştır. Büyütmeye ait Leytac reflektans görüntüsü Şekil 7.20'de gösterilmiştir.



Şekil 7.20 Laytec reflektans grafiği (566.1 nm Fabry-Perot osilasyonları)

Büyütülen örneğin Hall etkisi ölçümü alınarak, katmanın elektronik özellikleri ölçülmüştür. Kalınlığı 1 μm olan n-tipi katmanın, bulk taşıyıcı yoğunluğu örneğe 5 mA akım sürülerek, $-7,38 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ olarak ölçülmüştür. Örneğin yüzey pürüz değerinin belirlenmesi için AFM ölçümü alınmıştır (Şekil 7.21). AFM ölçümü sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğü RMS: 0,25 nm olarak hesaplanmıştır.

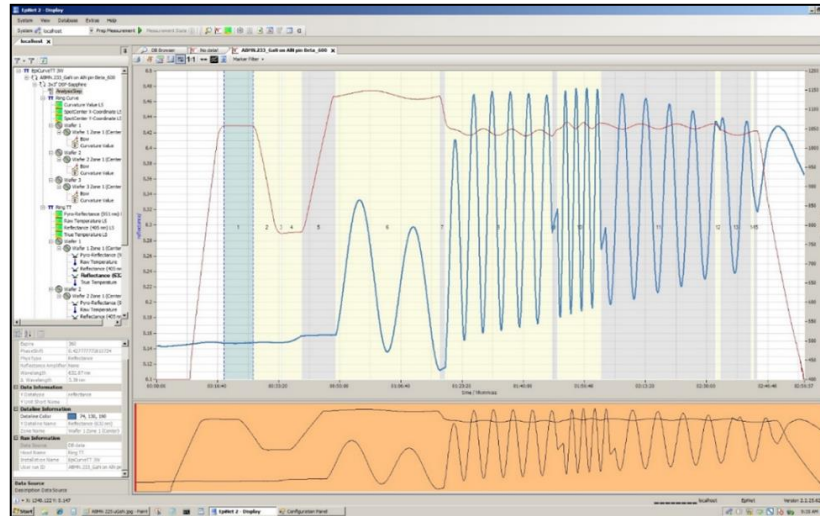


Şekil 7.21 N-Tipi GaN katmanının AFM görüntüsü

c. Epitaksiyel Yapı 3: i-Tipi GaN

Çalışmanın devamında yapılan üçüncü büyütmede, i tipi epitaksiyel tasarım elde edilmiştir. Bu büyütmede katkısız GaN tampon ve n-tipi katkılı GaN kontak tabaka kısımları önceki Epitaksiyel Yapı 1 ve Epitaksiyel Yapı 2'den alınmıştır. Bu yapılardaki katmanlar tekrar büyütülerek en üste yaklaşık ~600 nm kalınlığında i-GaN eklenmiştir.

n-tipi silisyum katkılı GaN kontak tabakasından sonra, beta ışınmasını absorbe edecek aktif tabaka olan katkısız i-GaN katmanı büyütülmüştür. i-GaN tabakası 1060 °C sıcaklık, 200 mbar reaktör basıncı altında 50 sccm TMGa akışı ve 8220 sccm NH₃ akışı verilerek 600 nm kalınlığında büyütülmüştür. Taşıyıcı elektron yoğunluğu $< 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ olarak hedeflenmiş ve bu akışlarda V/III molar akış oranı 2460 olarak hesaplanmıştır. Büyütmeye ait Fabry-Perot reflektans osilasyonları ve büyütme boyunca yüzey sıcaklık eğrileri Şekil 7.22'deki ekran görüntüsünde verilmiştir.



Şekil 7.22 Laytec reflektans grafiği (632 nm Fabry-Perot osilasyonları)

Büyütülen katmanın 4 Nokta Hall etkisi analizi ile taşıyıcı background seviyesi belirleme analizine tabi tutulmuş ve elektronik özellikleri ölçülmüştür. İ-tipi katmanın, bulk taşıyıcı yoğunluğu örneğe 10 µA akım sürülerek $1,032 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ olarak ölçülmüştür (Şekil 7.23). Elde edilen sonuçlar hedeflenen değerler ile uyumludur.

ECOPIA HALL EFFECT MEASUREMENT SYSTEM (HPMS-3000 VER 3.51.5)

HALL EFFECT MEASUREMENT SYSTEM

INPUT VALUE

DATE: _____ USER NAME: _____

SAMPLE NAME: i-GaN COM PORT: COM5 TEMP: 300K

I = 10.00 uA DELAY = 0.100 [S]

D = 1.0 [um] B = 0.570 [T]

Measurement Number = 1000 [Times]

MEASUREMENT DATA

AB [mV]	BC [mV]	AC [mV]	MAC [mV]	-MAC [mV]
-92.355	-110.524	13.502	9.782	10.926
93.074	108.976	-15.004	-11.196	-12.403
CD [mV]	DA [mV]	BD [mV]	MBD [mV]	-MBD [mV]
-102.500	-120.844	22.052	20.477	17.305
100.160	120.464	-24.159	-24.353	-21.046

RESULT

Bulk concentration = -1.032E+16 [$/\text{cm}^3$]

Sheet Concentration = -3.224E+12 [$/\text{cm}^2$]

Mobility = 4.037E+1 [cm^2/Vs]

Conductivity = 6.671E-2 [$1/\Omega\text{ cm}$]

Resistivity = 1.499E+1 [$\Omega\text{ cm}$]

Average Hall Coefficient = -6.051E+2 [cm^3/C]

A-C Cross Hall Coefficient = -3.223E+2 [cm^3/C]

B-D Cross Hall Coefficient = -8.880E+2 [cm^3/C]

Magneto-Resistance = 2.792E+2 [Ω]

Ratio of Vertical / Horizontal = 8.423E-1

OPERATING DESCRIPTION: _____

PROGRESS [%]: _____

[GoTo I/V CURVE](#)

COMTEST

MEASURE

STOP

CLEAR

CALCUL

LOAD

SAVE

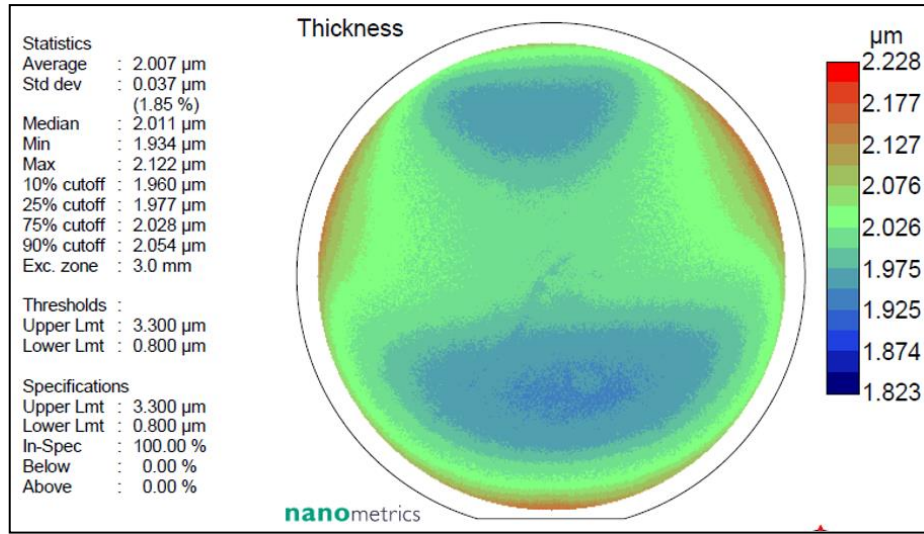
PRINT

CLOSE

HELP

Şekil 7.23 İ-Tipi GaN katmanının Hall Etkisi ölçümü

Ölçümler alındıktan sonra üretilen wafer'ın Photo Luminescence Mapper sisteminde kalınlık ölçümü alınmıştır. Ölçüm sonuçlarında 3 inç'lik wafer için 3 mm “edge-exclusion” bölgesi çıkarıldığında kalınlık homojenitesinin %1,85 olduğu görülmüştür. Ölçüm sonucu Şekil 7.24'te gösterilmiştir.

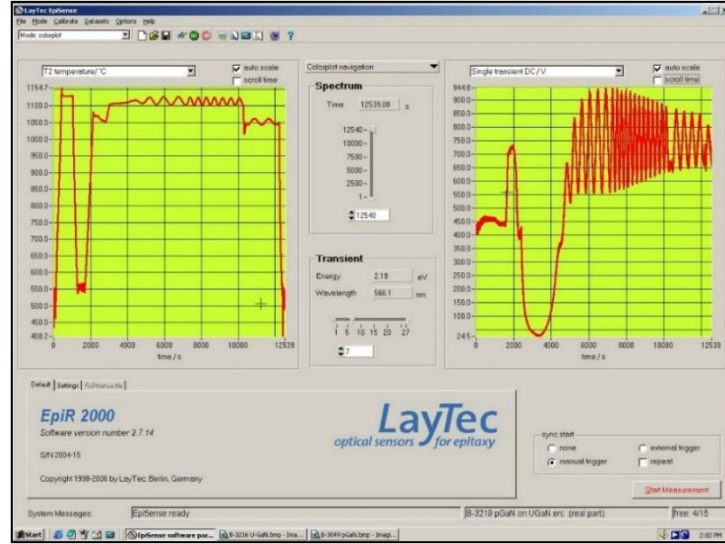


Şekil 7.24 600 nm i-GaN GaN-PIN epitaksiyel yapısının kalınlık ölçümü

d. Epitaksiyel Yapı 4: p-Tipi GaN

Epitaksiyel GaN p-i-n yapısının oluşturulması için, n-tipi katkı i-GaN tabakasının büyütülmesinden sonra p-tipi taşıyıcı yoğunluğunun optimizasyonunu yapmak için p- tipi bölge tasarlanmıştır. Burada standart 3 μm kalınlıktaki katkısız GaN

tampon üzerine yaklaşık 150 nm kalınlığında Mg katkılı p-GaN tabakası büyütülmüştür. Büyütülen Mg katkılı GaN tabakasına ait büyütme reflektans osilasyonları ve yüzey sıcaklığı eğrisi Şekil 7.25'te gösterilmiştir.



Şekil 7.25 Laytec reflektans grafiği (566.1 nm Fabry-Perot osilasyonları)

Bu katman reaktör sıcaklığı 1050 °C ve reaktör basıncı 200 mbar'da sabit tutularak büyütülmüştür. Büyütmede, taşıyıcı deşik yoğunluğu $>1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ hedeflenerek, katkılama / metal organik kaynak molar akış oranı $3,33 \times 10^{-3}$ değerinde, TMGa kaynağı 8 sccm, Cp_2Mg kaynağı 100 sccm ve NH_3 kaynağı 1300 sccm değerinde tutulmuştur. Büyütülen örneğin Hall etkisi ölçümü alınmadan önce Mg:GaN katmanında katkılamanın yapıldığı Mg atomlarının hidrojen atomları ile bağlarını koparıp iletkenlik bandına deşik vermesini sağlamak için yatay tüp fırınında 8300 °C sıcaklıkta, 15 dakika azot ve hava karışımı akıtılarak magnezyum aktivasyonu yapılmıştır. Daha sonra Hall etkisi ölçümü alınarak, büyütülen katmanın elektronik özellikleri ölçülmüştür. Kalınlığı 0,5 μm olan p-tipi katmanın bulk taşıyıcı yoğunluğu, örneğe 200 μA akım sürülerek $3,063 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ olarak ölçülmüştür. Beta ışınmasını absorbe edecek aktif tabaka olan GaN p-i-n yapısının, Magnezyum (Mg) katkılanmış olan p-tipi katmanının geliştirilmesi ile tüm GaN p-i-n tabakalarının ayrı ayrı optimizasyonları tamamlanmıştır [205].

e. Epitaksiyel Yapı 5: p-i-n GaN

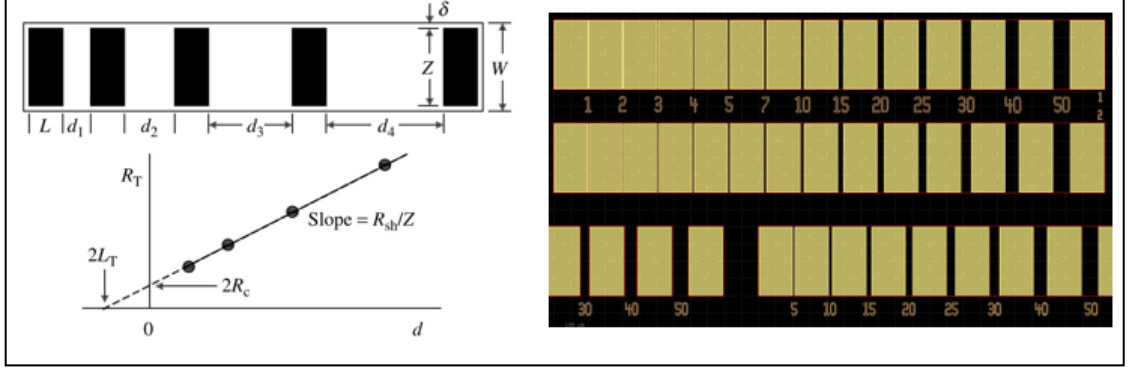
Son aşamada, betavoltaik GaN p-i-n yapısını oluşturmak üzere, tüm tabakaların tek bir yapıda bir araya geldiği epitaksiyel yapı 5 büyütülmüştür. GaN p-i-n yapısı her bir tabakanın büyütülmesi esnasında kullanılan ve yukarıda belirtilen büyütme koşulları aynen korunarak gerçekleştirilmiştir. Tüm GaN p-i-n yapısı büyütüldükten sonra yine 830 °C'de ve 15 dk'da Azot-Hava karışımı bulunan tüp fırın ortamında Mg aktivasyonu gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan GaN p-i-n yapısının şematiği Tablo 7.2'de verilmiştir.

Tablo 7.2 Tasarlanan GaN tampon epitaksiyel yapısı

P-GaN Tabakası	Kalınlık: 150 nm Nb: + 4,5 E +17 cm ⁻³
i-GaN Tabakası	Kalınlık: 600 nm Nb: - 2,5 E +15 cm ⁻³
N-GaN Tabakası Si:GaN	Kalınlık: 500 nm Nb: - 5,0 E +18 cm ⁻³
İstemsiz Karbon Katkılı GaN tampon	Kalınlık: 800 nm
AlN tampon	Kalınlık: 250 nm
AlN Çekirdeklenme	Kalınlık: 40 nm
Safir (Al₂O₃)	Polytype : Wurzite Type: Insulating Resistivity >1E5 Çap: 3 inch, 76.2 mm±0.1 mm Orientation: 0.2 miss cut <0001> +/-0.1 deg Kalınlık : 430+/-15 um MPD: epi-ready with CMP/C face polished 0.2nm Roughness TTV -8 < Bow <0 Warp < 10µm

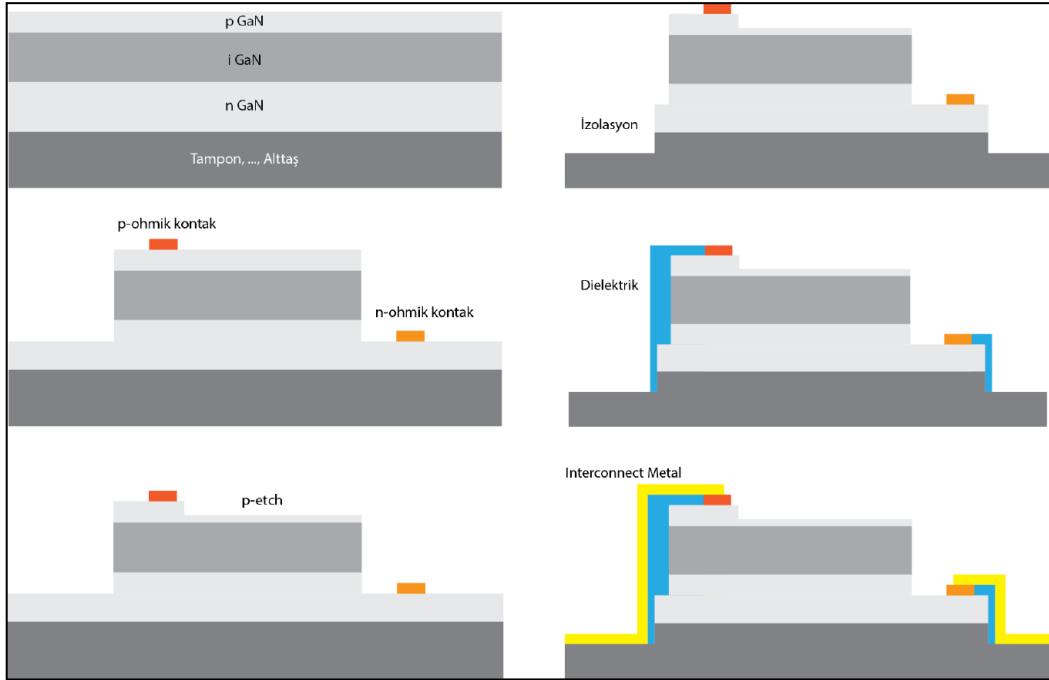
7.1.2.2 Fotomaske Tasarımı ve Üretimi

Prosesin ilk aşamasında, omik kontakların iyileştirilmesi için çalışılmıştır. Bu bağlamda, transfer uzunluğu metodu (Transfer Length Method, TLM) kullanılarak, spesifik kontak ve tabaka (shunt; arakesit) direnç değerleri ölçülmüştür. Kullanılan fotomaske görüntüsü Şekil 7.26'da verilmiştir.



Şekil 7.26 Kontak direncini ölçmek için kullanılan model ve fotomaske

Omik kontak sonrası planlanan proses aşamaları ise Şekil 7.27'de verilmiştir.

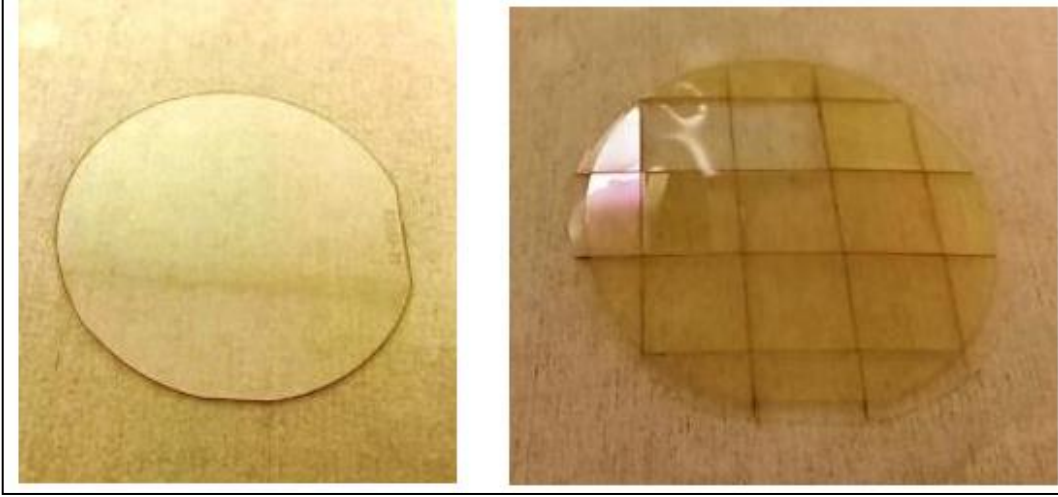


Şekil 7.27 Betavoltaik pil aygıt proses aşamaları

Yapılacak prosese ait adımların teknik ayrıntıları aşağıda sıralanmıştır.

7.1.2.3 Wafer Kesim Adımı

2" lik p-GaN epitaksiyel wafer, Dicer cihazında $12 \times 12 \text{ mm}^2$ boyutunda kesilerek maske boyutuna uygun hale getirilmiştir. Bu kesim sırasında büyütülen yüzey, fotoresist ile korunmuştur. Şekil 7.28'de kesim öncesi ve sonrası 2" p-GaN epitaksiyel wafer görüntüsü görülmektedir.



Şekil 7.28 2 inch çapındaki p-GaN epitaksiyel yapısı ve Dicer cihazı ile kesildikten sonraki görüntüsü

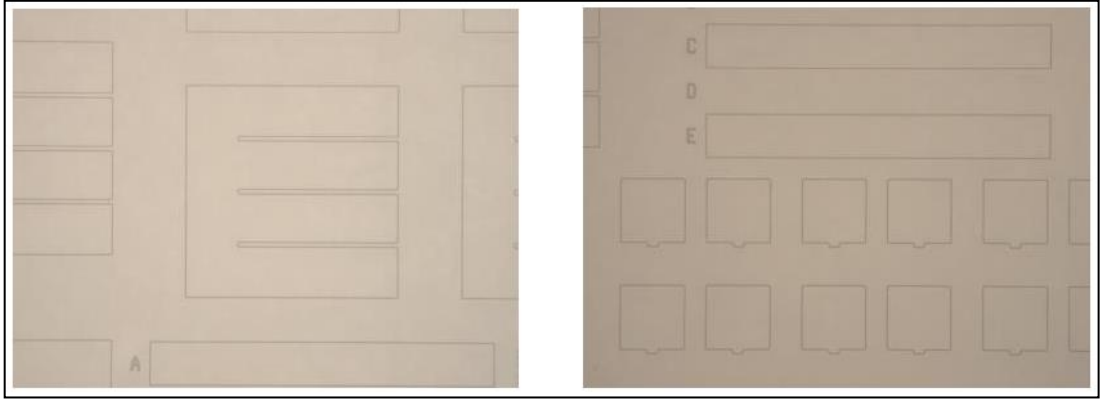
7.1.2.4 Örnek Temizlik Adımı

Kesim işleminden sonra bu waferdan dört adet $12 \times 12 \text{ mm}^2$ boyutunda örnek alınmıştır. Örnekler F1, F2, F3 ve F4 olmak üzere isimlendirilmiştir. Örneklerin fabrikasyona hazır hale gelebilmeleri için örnekler; aseton, isopropanol alkol ve deiyonize su ile temizlenmiştir. Bu temizlik işleminden sonra fotolitografi işlemi için örnekler fotoresist kaplanarak omik metal adımına geçilmiştir.

7.1.2.5 N-Mesa Aşındırma

N tabakasına kadar aşındırmadır. Bu aşındırma İndüktif Eşleşmiş Plazma-Reaktif İyon Aşındırma (Inductively Coupled Plasma-Reactive Ion Etching – ICP-RIE) cihazı kullanılarak, kuru aşındırma yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. N-tipi kontakların kaplanması için öncelikle aygıtlar n^+ tabakasına kadar aşındırılmıştır. Bunun için öncelikle numune yüzeyinin korunması amacıyla TI35ESX fotoresist, örnekler üzerine spin-coater cihazı ile $2,5\text{-}3,5 \mu\text{m}$ kalınlık arasında kaplanmış ve

125 °C'de 120s tavlammıştır. Daha sonra maske hizalama ekipmanı ile fotomaske kullanılarak pozlama yapılmış ve AZ400K:Su developer solüsyonu içerisinde develop (banyo) edilmiştir. Son olarak n-mesa adacıklarında fotorezist bırakılmış ve diğer yerler aşındırılmaya müsait bir şekilde litografi tamamlanmıştır. Yapılan işlemten sonra çözünürlük, kritik boyut, hizalama kayması ve yüzey kontrolü gerçekleştirilmiştir. Yapılan kuru aşındırma, BCl_3 (20 sccm) + Cl_2 (25 sccm) + Ar (10 sccm) gaz akışlarında, 800 W ICP gücünde, 0,4 Pa basınçta gerçekleştirilmiştir. Aşındırma sonrası, örnek yüzeyleri koruyan yanmış-yapışmış fotorezist kalıntıları aseton propanol ve deiyonize su ile temizlenmiştir. Film temizliği sonrası aşındırma kalınlıkları 1500-1600 nm arasında ölçülmüştür.

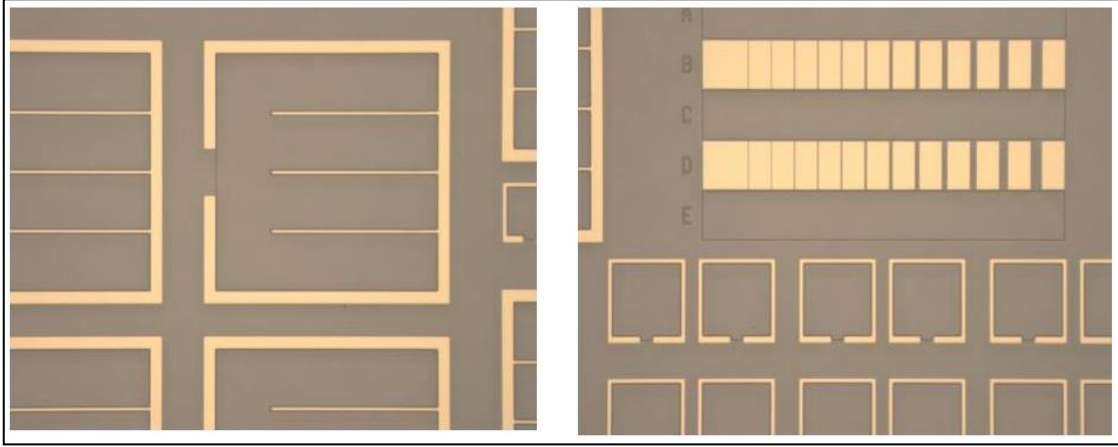


Şekil 7.29 N-mesa aşındırma sonrası optik mikroskop görüntüleri

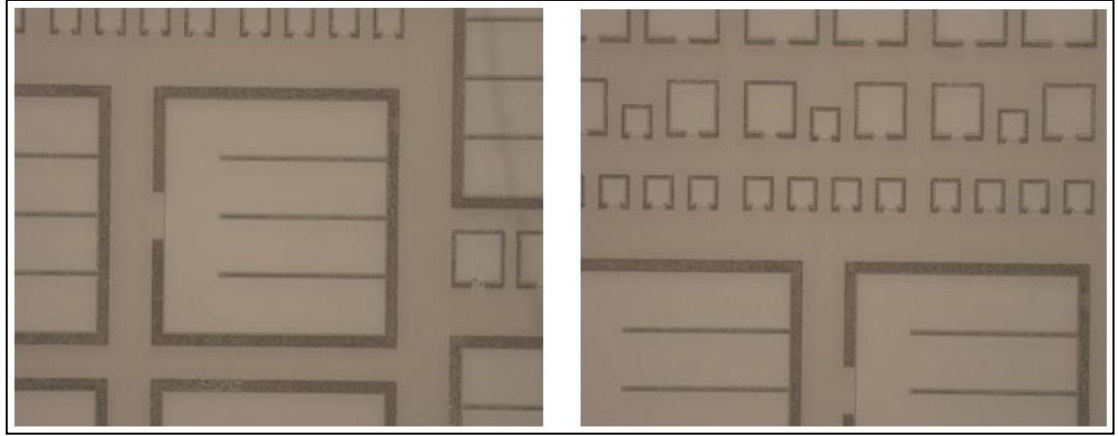
7.1.2.6 N-Kontak Metalizasyonu

Bu adımda, n-omik kontak metali kaplanmıştır. Bu amaçla AZ5214E fotorezist'i 2000 rpm'de spin-coater cihazı ile örnekler üzerine kaplanmış, fotomaske ve maske hizalayıcı ile pozlama yapılmış ve develop (banyo) edilen örnekler metal kaplamaya hazır hale getirilmiştir. Bu yöntemde metaller buharlaştırılarak kaplama yapılmaktadır. Yapılan çalışmada kontak metali olarak Ti/Al/Ni/Au metalleri seçilmiş ve elektron demeti ile metal buharlaştırma yöntemi (E-Beam Evaporator) kullanılarak [206] sırasıyla, 12/120/35/65 nm kalınlıklarında kaplanmıştır. Aseton ve alkol ile yapılan metal kaldırma (lift-off) sonrası alınan optik mikroskop görüntüleri Şekil 7.30'da verilmiştir. İkinci olarak, kaplanan metal-GaN yüzeyinin direncini düşürmek ve omik yapmak için 700-900 °C arasında hızlı termal tavlama (Rapid Thermal Processing – RTP) cihazı ile tavlama

yapılmıştır. Şekil 7.31 'de 830 °C'de ohmik kontak direncini azaltmak amacıyla yapılan tavlama sonrası görüntüler verilmiştir.



Şekil 7.30 N-metal kaplama ve liftoff sonrası optik mikroskop görüntüsü



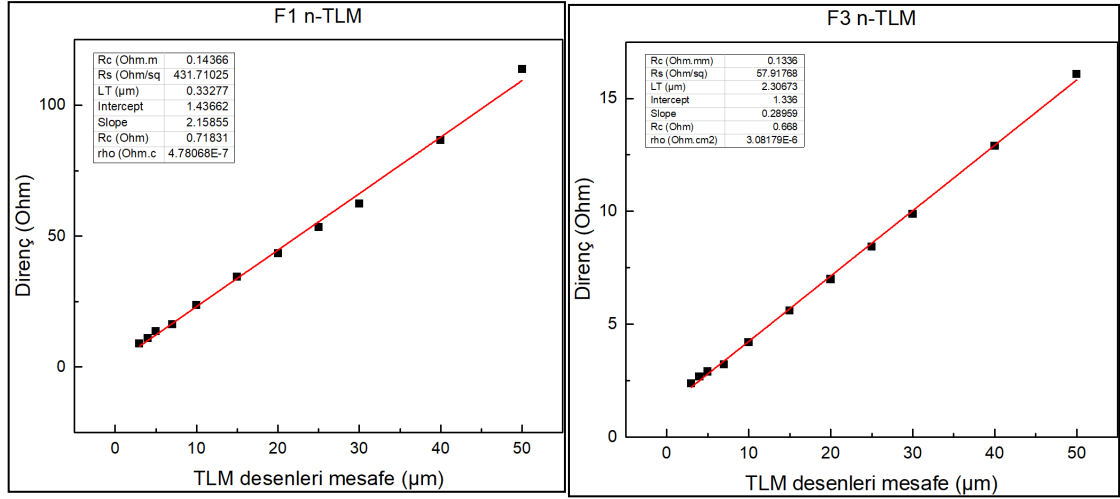
Şekil 7.31 N-metal RTA sonrası görüntü

- **TLM Ölçümleri**

Maskedeki omik kontak deseni adımındaki bulunan TLM desenleri, örnek yüzeyine geçirilmiştir. Örneklerdeki TLM desenleri üzerinden 4-prob yöntemi ile [207], TLM ölçümleri alınarak kontak direnç değerleri hesaplanmış ve çizdirilmiştir. Tablo 7.3' de n-kontak adımı ve daha sonra gerçekleştirilen p-kontak metalizasyonu adımı sonrasında ölçülen “kesit alanı direnci (R_{sh})” ve “kontak direnci (R_c)” değerleri görülmektedir. Şekil 7.32’de sırasıyla n-kontak RTP tavlama sonrası yapılan ölçümlere göre çizdirilen, F1 ve F3 örneğine ait TLM grafikleri yer almaktadır.

Tablo 7.3 Örneklere ait TLM ölçümleri

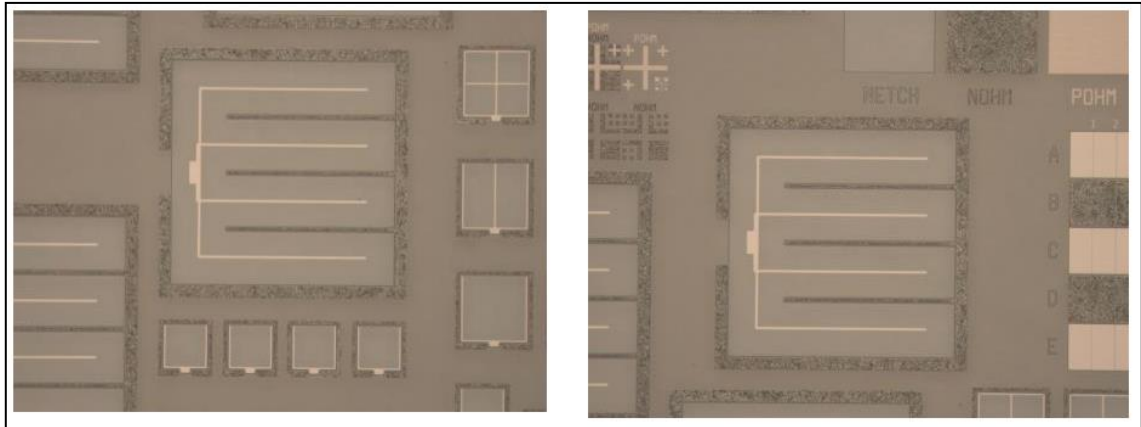
Mesafe (μm)	F1 p- TLM	F1 n- TLM	F2 p- TLM	F2 n- TLM	F3 p- TLM	F3 n- TLM	F4 p- TLM	F4 n- TLM
3	34610	9	38582	9,36	201976	2,38	130734	1,49
4	35394	10,91	40244	11,44	202596	2,68	139340	1,84
5	36854	13,61	41200	12,89	203134	2,9	138180	2,21
7	37596	16,28	41882	14,94	202994	3,21	137738	2,5
10		23,54	44932	21,32	203548	4,19	137704	3,84
15	42664	34,38	49654	29,99	205926	5,6	141728	5,48
20	44984	43,33	55448	38,5	211392	6,99	144822	7,17
25	48818	53,3	62526	47,15	219712	8,43	147198	8,88
30	56274	62,29	71440	60,39	236844	9,88	153094	10,64
40	71776	86,58				12,89	181920	14,32
50	78614	113,72				16,07	188496	18,04
R_c (Ωmm)	3009,90	0,14	3438,15	0,32	19550,3	0,13	12770,6	0,03
R_{sh} ($\Omega/\square$)	187532	432	229369	365	216129	58	226011	70
LT (μm)	16,05	0,33	14,99	0,88	90,46	2,31	56,50	0,41
Intercept	30098,9	1,44	34381,5	3,22	195503	1,34	127706	0,29
Slope	937,66	2,16	1146,84	1,82	1080,65	0,29	1130,05	0,35
R_c (Ω)	15049,5	0,72	17190,7	1,61	97751,4	0,67	63853,3	0,14
ρ (ohm.cm^2)	0,48309	0,0000	0,51537	0,0000	17,6844	0,0000	7,21602	0,000



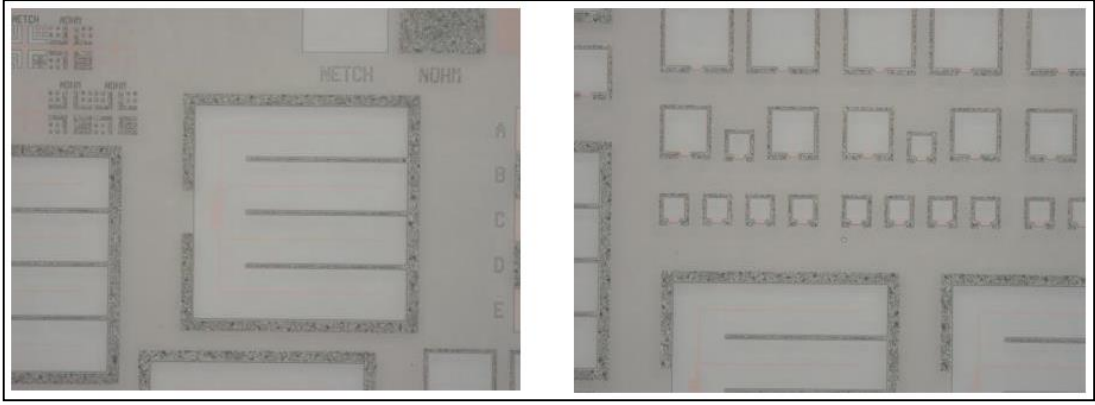
Şekil 7.32 N-kontak metalizasyon sonrası F1 (wafer 1) ve F3 (wafer 2) TLM desenleri arasındaki mesafeye bağlı direnç değişim grafiği

7.1.2.7 P-Kontak Metalizasyonu

Bu aşamada p-omik kontak metali kaplanmıştır. Yapılan incelemeler neticesinde, metal olarak Ni/Au metallerinin uygun olduğu görülmüştür [208]. N-Metal aşaması ile aynı litografi aşamaları yapılmış ve yine e-beam evaporator cihazında Ni/Au=8/10 nm kalınlıklarında kaplanmıştır. Kaplama sonrası numune aseton, propanol ve deiyonize su ile temizlenerek, kontaktarı dielektrik malzeme kaplanmasından koruyan fotodirenç temizlenmiştir. Ayrıca p-omik kontak metal direncini düşürmek için yine RTP cihazıyla, N₂:O₂ (1:1) gaz ortamında 500 °C’de 5 dakika tavlama gerçekleştirilmiştir. Tavlama öncesi ve tavlama sonrası mikroskop görüntüleri Şekil 7.33 ve Şekil 7.34’de verilmiştir.

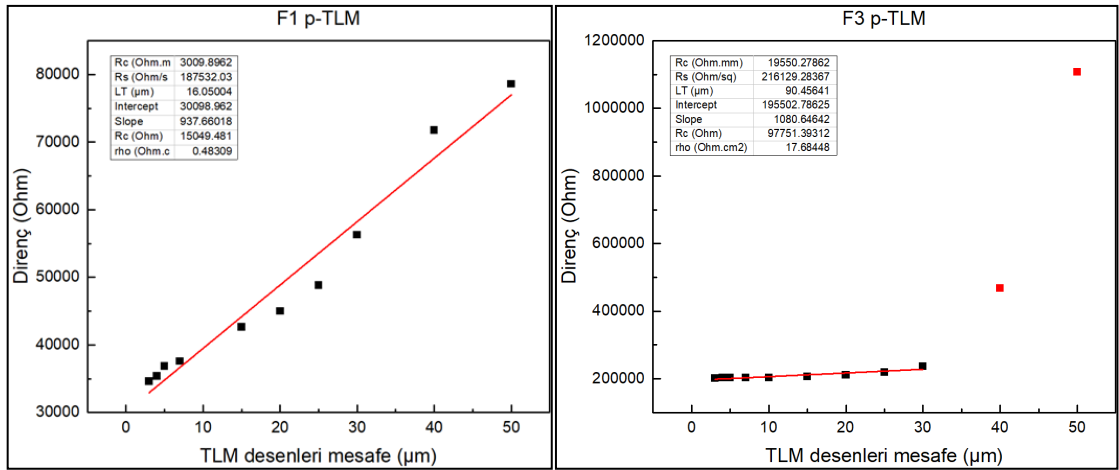


Şekil 7.33 P-kontak metalizasyon sonrası optik mikroskop görüntüsü



Şekil 7.34 P-kontak RTP tavlama sonrası optik mikroskop görüntüsü

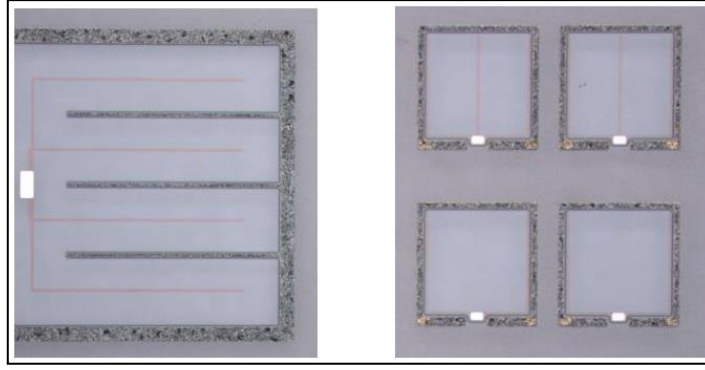
Şekil 7.35'de sırasıyla p-kontak RTP tavlama sonrası yapılan ölçümlere göre çizdirilen, F1 p ve F3 p - TLM grafikleri yer almaktadır.



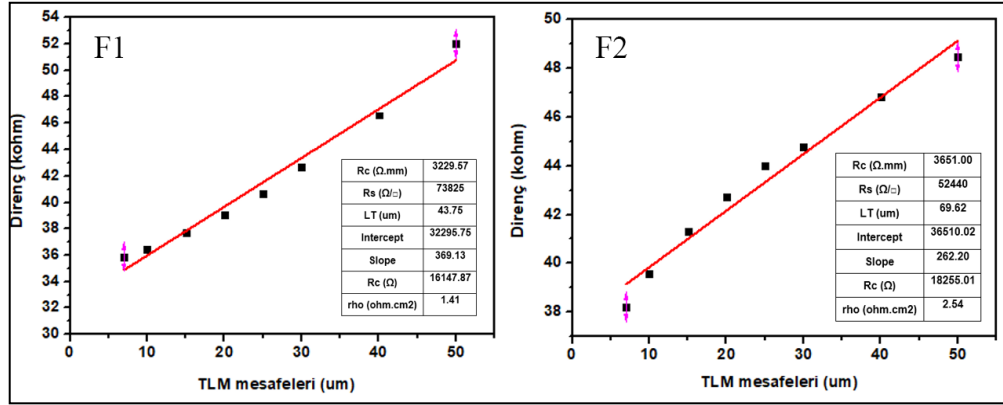
Şekil 7.35 P-Kontak metali tavlama sonrası F1 (wafer 1) ve F3 (wafer 3) TLM desenleri arasındaki mesafeye bağlı direnç değişim grafiği

7.1.2.8 Touch Metalizasyon

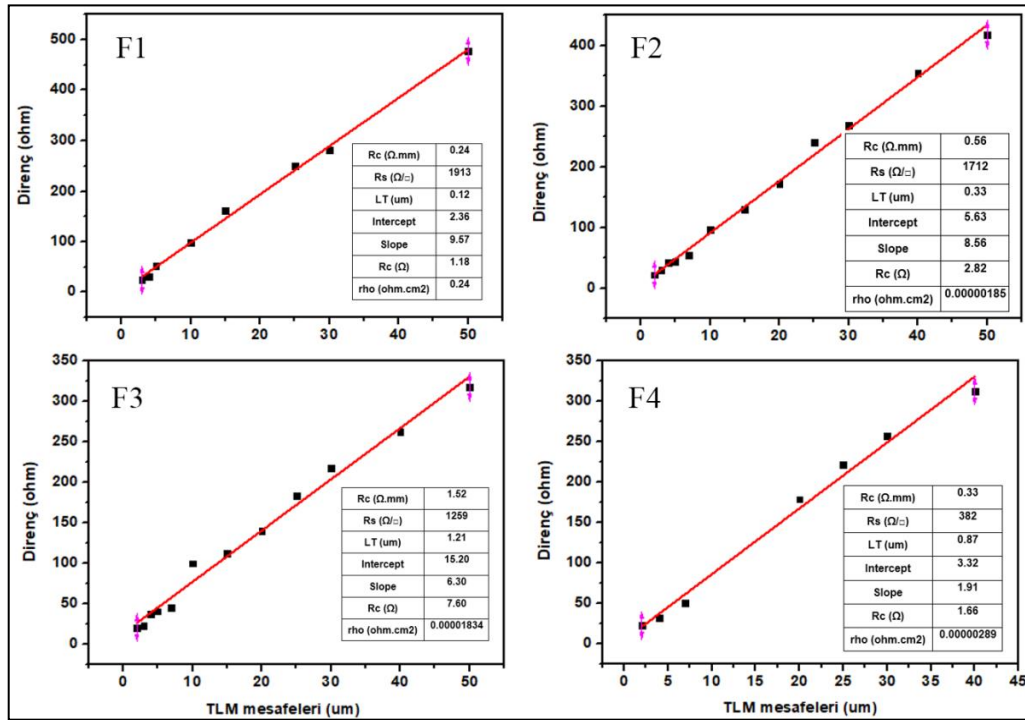
P-metali ince olduğundan dolayı, elektriksel ölçümler esnasında iğne problemlerle doğrudan ölçüm yapılabilmesine olanak sağlamamaktadır. Bu nedenle daha kalın bir metal olan touch metali kaplaması gerçekleştirilmiştir. Yine metalizasyon aşamalarındaki litografi adımları tekrarlanmış, Ti/Au metalleri 50/350 nm kalınlıklarında kaplanmıştır (Şekil 7.36). Ardından TLM kontak ölçümleri ile diyot akım-gerilim ölçümleri yapılmıştır. Şekil 7.37 ve Şekil 7.38'de, metal kontak sonrası, F1, F2, F3 ve F4 aygıtlarının, n-kontak ve p-kontak direnç ölçümlerine ait grafikler verilmiştir.



Şekil 7.36 Touch metalizasyon sonrası mikroskop görüntüsü



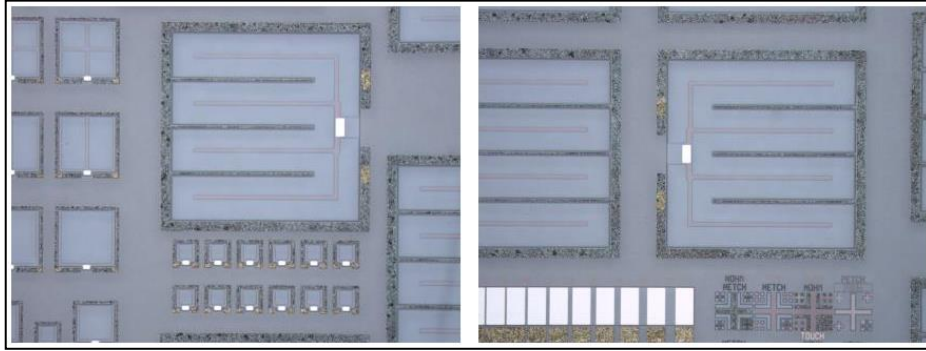
Şekil 7.37 P kontak dirençleri



Şekil 7.38 N-kontak dirençleri

7.1.2.9 P-Katman Aşındırma

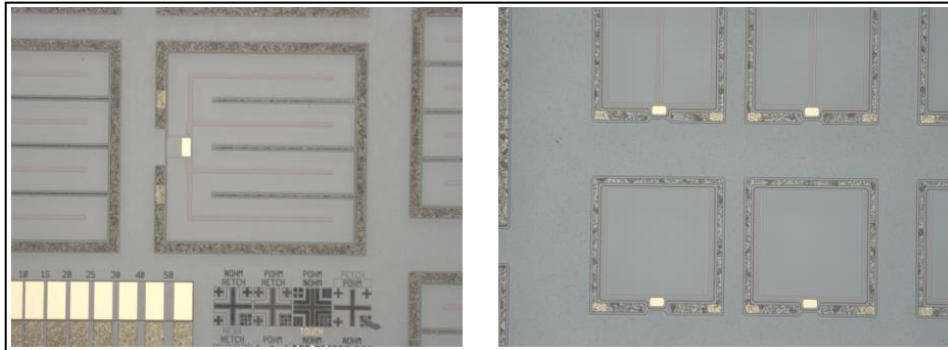
Yüzeye yakın, aktif bölgeye uzak olan bölgelerde beta parçacığı soğurulması verim düşüklüğü ile sonuçlanır. Bunu önlemek için p-GaN katman kalınlığını azaltmak gerekirse, p-aşındırması yapılması gerekir. Bu yüzden 150 nm kalınlığındaki p-tabakası bu aşamada inceltirilmiştir. Yine AZ5214E fotorezisti 4000 rpm’de kaplanmış ve fotomaske ile litografi gerçekleştirilmiştir. GaN aşındırma reçetesi ile 100-110 nm derinliğinde aşındırma yapılmıştır. Aşındırma sonrası aygıt görüntüleri Şekil 7.39’da verilmiştir.



Şekil 7.39 Aşındırma sonrası mikroskop görüntüsü

7.1.2.10 Mesa Aşındırma

Örnek üzerinde üretilecek aygıtları birbirinden izole etmek için, n^+ katmanını da tamamen aşındırılacak şekilde izolasyon aşındırması yapılmıştır. AZ5214E fotorezisti ile litografi yapılmış, GaN kuru aşındırma reçetesi kullanılarak 600-620 nm aralığında aşındırma yapılmıştır. Mesa aşındırma sonrası aygıt görüntüleri Şekil 7.40’da verilmiştir.



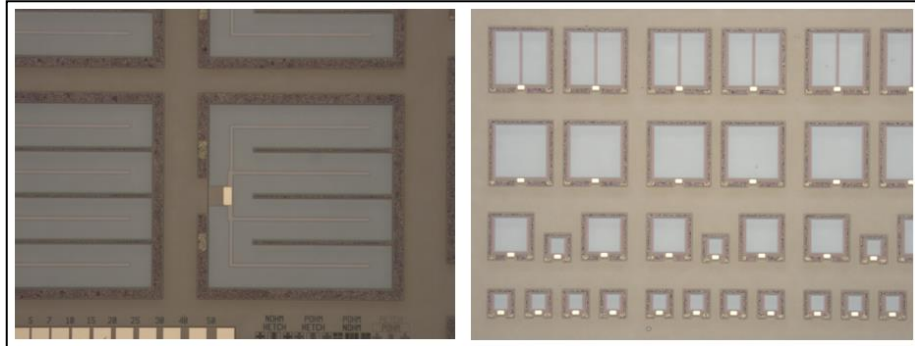
Şekil 7.40 Mesa aşındırma sonrası optik mikroskop görüntüsü

7.1.2.11 Dielektrik Kaplama, Pasivasyon

Metal kontakların, aygıtların aşındırılan yan duvarları üzerinden geçmesi sebebiyle, bu bölgelerin akım kaçağına sebep olmayacak bir dielektrik ile kaplanması gerekmektedir. Bütün yüzey dielektrik ile kaplandıktan sonra, elektriksel kontakların yapılacağı bölgeler ve aygıtın p bölgesinde gerekli açıklıklar aşındırılarak oluşturulmuştur.

Dielektrik film olarak Silisyum Dioksit (SiO_2) ya da Silisyum Nitrat (SiN) en yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Aralarında film özelliği olarak bazı farklar olmasına rağmen pasivasyon filmi olarak ikisi de kullanılabilir. Mevcut üretimde SiO_2 'nin kaplanmasına karar verilmiştir. SiO_2 , Plazma ile Artırılmış Kimyasal Buhar Kaplama (PECVD) cihazı ile 250 nm kalınlığında kaplanmış, elipsometre kullanılarak kalınlık teyid edilmiş ve kırıcılık indisi $n=1,46$ olarak ölçülmüştür.

AZ5214E rezisti kullanılarak spin-kaplama, fotomaske ve maske hizalayıcı ile pozlama ve develop adımları yapılmış fotolitografi adımı bitirilmiştir. Ardından ICP-RIE cihazında kuru aşındırma ile SiN filminin gerekli yerleri ölçüm ve tel bağlama işlemlerinde kullanılmak amacıyla aşındırılmıştır. Aşındırılan bölgelerin kenarlarında, film kalınlığı profilometreyle ölçülüp elipsometre ile sonucu teyid edilmiştir. Üretim sonrası optik mikroskop görüntüleri Şekil 7.41'de verilmiştir.



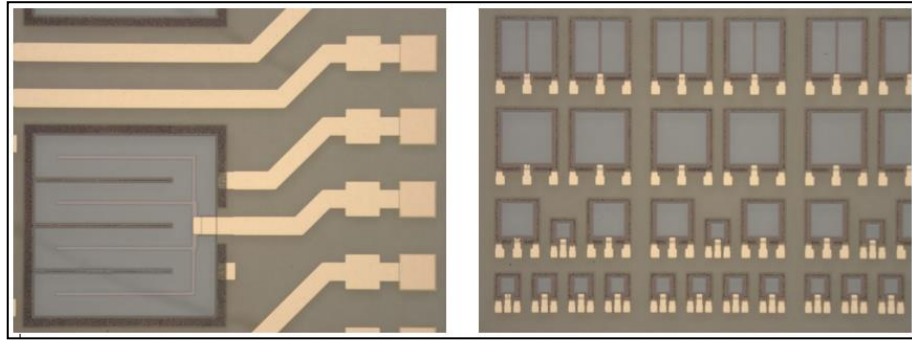
Şekil 7.41 SiO_2 dielektrik aşındırma sonrası aygıt görüntüleri

7.1.2.12 Bağlantı (Interconnect) Metalizasyonu

Fabrikasyonun son aşamasında, elektrik akımını toplamak amacıyla, aygıtlar birbirine seri ya da paralel olarak bağlanmalıdır. Bunu yapabilmek için, bağlantı metali kaplama adımı gerçekleştirilmiştir. İlk olarak yarı iletken aygıtın p ve n

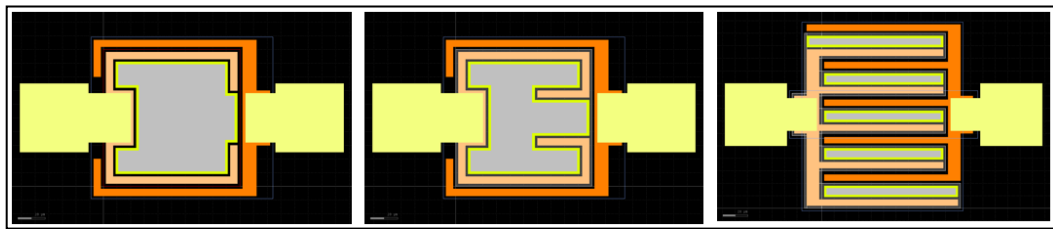
kontaklarının, 12 mm x 12 mm örneğin kenarlarına yakın bir noktaya elektriksel bağlantılarının yapılabilmesi için bağlantı metalizasyonu gerçekleştirilmiştir. Ek olarak bu metal üzerine termal/ultrasonik yöntemle tel bağlantısı (bonding) yapılacağından 2 μm kalınlığında bir metal kullanılması söz konusudur. Bu kalınlık için AZnLOF 2070 fotorezisti kullanılmış, 6000 rpm'de 60 sn boyunca spin-coating yapılmıştır. Pozlama sonrası MIF 826 ile develop edilmiş, metal kaplanacak bölgelerde fotorezist kaldırılmıştır. 200 ve 2000 nm kalınlıklarında Ti ve Au metalleri kaplanmış ve aseton ile kaldırma (lift-off) yapılmıştır.

Proses sonrası aygıt görüntüleri Şekil 7.42'de verilmiştir.



Şekil 7.42 Bağlantı metali sonrası aygıtların optik mikroskop görüntüleri

3 farklı geometriye sahip aygıtların fotomaske görüntüsü Şekil 7.43'de verilmiştir. Fotovoltaik aygıtlarda olduğu gibi, parmaklı yapılarda, efektif tabaka direncini (R_{sh}) azaltmak için parmak mesafelerinin değeri de optimize edilmesi gerekir.



Şekil 7.43 Çeşitli aygıtların fotomaske görüntüsü

Büyük boyutlu aygıtlarda birden fazla aralık çeşidi denenmiştir. Bu amaçla, Şekil 7.44'de verilen aygıt ve bunun yan kesit görüntüsü verilmiştir. Son olarak, beta-bozunması sonrası, elementin atom numarası 1 artmasına rağmen, yüksek enerjili elektron atomda kalmadığı için, oluşan atom +1 yüklenmektedir. Bu nedenle gerçekleştirilecek betavoltaik pil tasarımında, beta kaynağının bir akım kaynağı

1 mm x 1 mm

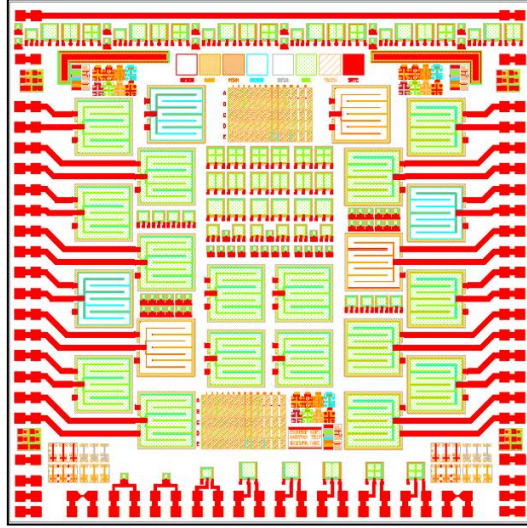
Diagram illustrating a 1 mm x 1 mm chip layout. The layout shows a central circuit block (yellow/grey) with internal connections (red lines). A red horizontal line is positioned below the central block. Below the red line, there are five grey rectangular components, each with a red top and a yellow bottom, arranged in a row. The entire layout is enclosed in a black frame.

7.1.2.13 Yarı İletken Aygıt Paketleme

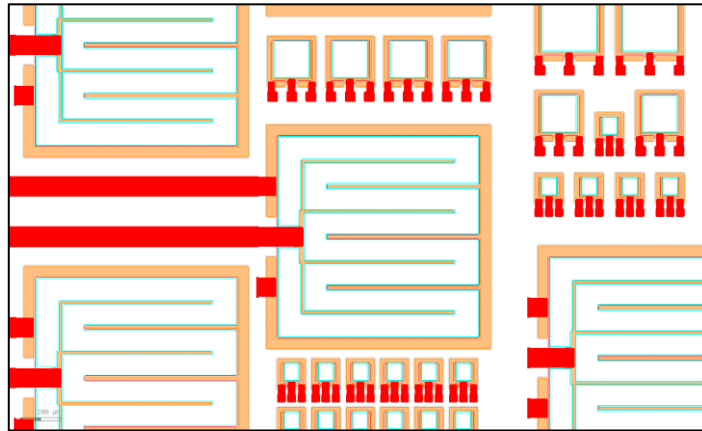
A cross-sectional diagram of a multi-layer printed circuit board (PCB). The diagram shows a central stack of layers: a top white layer labeled 'p', a grey layer labeled 'i', and a white layer labeled 'n'. These are sandwiched between two orange layers. Below the orange layers is a thick green layer labeled 'PCB'. The entire assembly is mounted on a light green base. The word 'Alttaş' is written in the center of the diagram. On the right side, the word 'Bond' is written next to a wavy orange line representing a bonding or soldering interface. The diagram is enclosed in a black rectangular frame.

Şekil 7.45'de verilen yapının oluşturulması için, yukarıdaki üretim sürecinde anlatıldığı gibi, temel olarak metal kaplama, aşındırma, dielektrik izolasyon filmi kaplama ve bonding (tel bağlantı) adımları belirli bir sırada gerçekleştirilerek

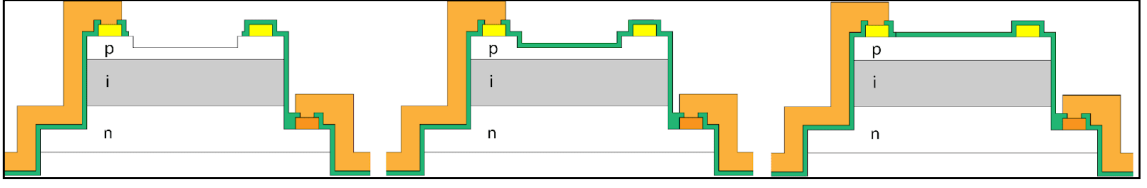
fonksiyonel aygıt elde edilmiştir. Tek bir p-i-n aygıtının üretimi tamamlandıktan sonra toplam fotomaske görüntüsü Şekil 7.46'da verilmiştir. Şekildeki p-i-n aygıtların herbiri farklı isimlendirilmiş, anot (+, p) ve katot (-, n) kontak pozisyonları da gösterilmiştir. Fotomaske 1 mm x 1 mm boyutunda toplam 22 aygıt içermektedir, bu aygıtlardan 16'sının bond metalleri ile dışarıdan ölçüm almaya uygun olarak metal bağlantıları yapılmıştır (Şekil 7.47). 16 aygıtın 12'sinde p-aşındırma ve dielektrik aşındırma yapılan i-katman üzerinden olabildiğince az malzeme bırakılmıştır. Bu sayede, betavoltaik akıma yol açmayacak soğurma bölgeleri minimize edilmiştir. Karşılaştırmak için kalan 4 aygıtta p-aşındırma yapılmayan ve dielektrik katman bırakılan aygıtlar konulmuştur (Şekil 7.48).



Şekil 7.46 Fotomaskenin görünümü

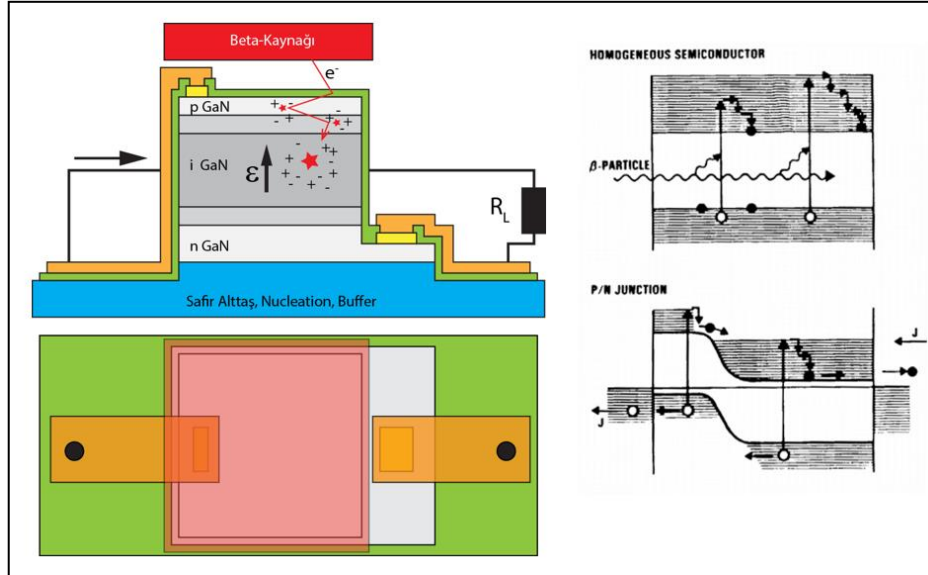


Şekil 7.47 Fotomaskenin yakından görünümü



Şekil 7.48 P-Katman'ın farklı proses çeşitleri

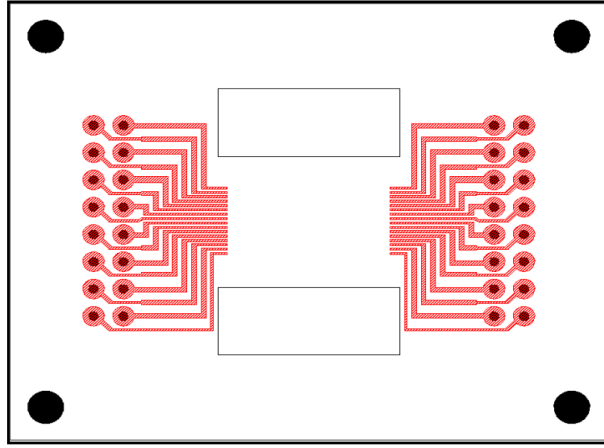
Şekil 7.49'da, geliştirilmesi planlanan betavoltaik p-i-n aygıtının yandan ve üstten görünüşü şematik olarak gösterilmiştir. GaN epitaksi malzemesi genellikle Safir (Al_2O_3) ya da Silisyum-Karbür (SiC) alttaş üzerine büyütülmektedir [209]. Kristal örgülerindeki farklardan dolayı aktif p-i-n bölgelerine gelmeden, çekirdeklenme (nucleation) ve tampon (buffer) gibi ara katmanlar yapılmaktadır.



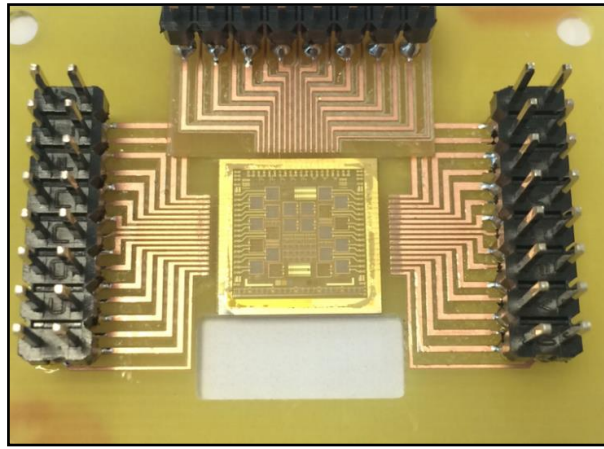
Şekil 7.49 Betavoltaik aygıtın şematik olarak yandan ve üstten görünümü

7.1.2.14 Vakum Kutusu ve PCB Tasarımı

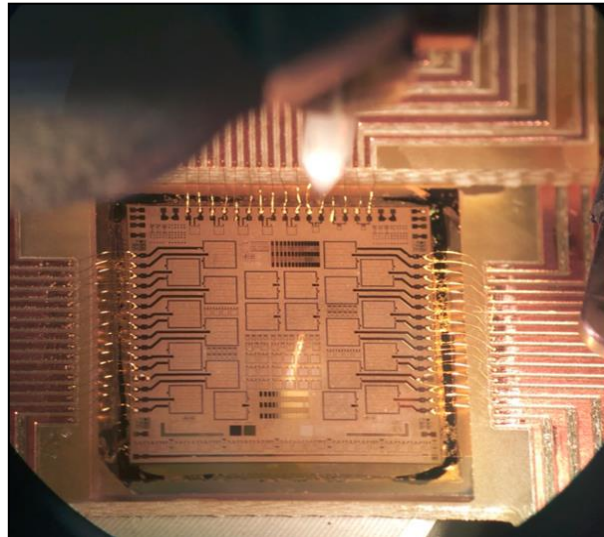
Yarı iletken aygıtların üretim süreci bittikten sonra, karanlık ve betavoltaik akım ölçümlerini yapabilmek için PCB ve vakum hücresi tasarımları gerçekleştirilmiştir. İlk aşama olarak, yapılan örneğin yapıştırılacağı ve ince teller yardımıyla vakum kutusuna elektriksel kontakların aktarılacağı PCB tasarımı yapılmıştır (Şekil 7.50). Tasarım ve üretim süreci bittikten sonra, geliştirilen ilk örneğin PCB'ye yapıştırılmış hali Şekil 7.51'de gösterilmiştir. Aygıtın PCB yerleşimi yapıldıktan sonra, kontaklar ile ölçüm noktalarını birbirine bağlayan altın tel bağlantıları yapılırken alınmış görüntüsü 7.52'de verilmiştir.



Şekil 7.50 Örnek tutucu PCB tasarımı

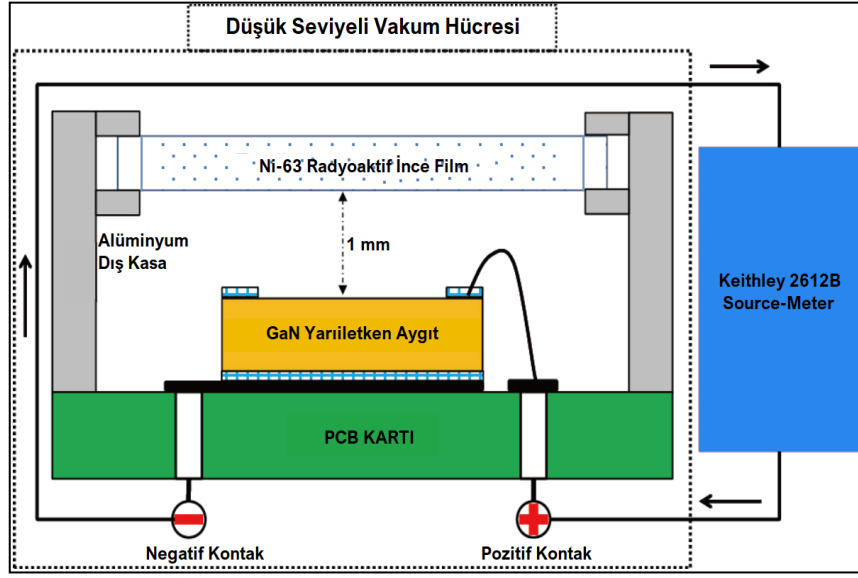


Şekil 7.51 Örnek ve PCB

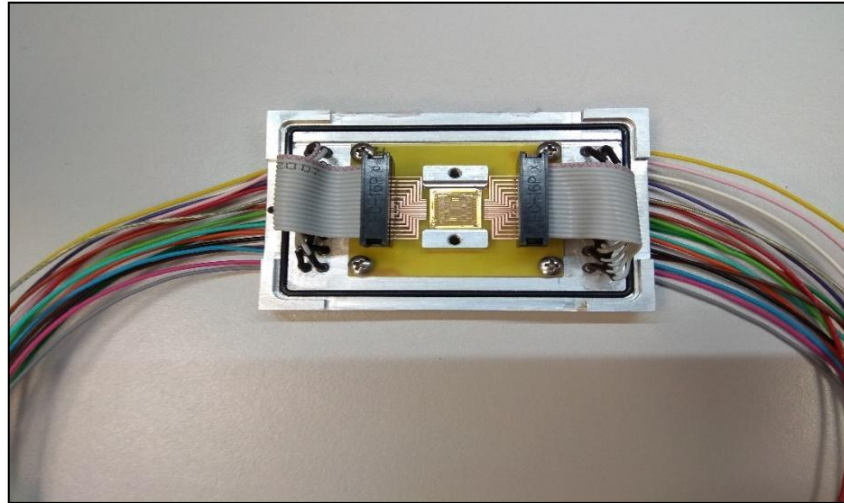


Şekil 7.52 Örnek ve tel bağlantıları

İkinci aşama olarak, yarı iletken aygıt ve radyoaktif ince filmin örtüştürülmesi ve gerekli ölçümlerin vakum altında yapılabilmesi için vakum hücresi tasarımı yapılmıştır (Şekil 7.53). Yapılan tasarıma uygun şekilde Şekil 7.54'de gösterildiği gibi, düşük vakum hücresi üretilmiş ve elektriksel ölçüm kabloları hücrenin dışına taşınmıştır. Her bir yarı iletken örneğe ait kablo çıkışları yine Şekil 7.53'de gösterilen Keithley 2612B akım-voltaj ölçüm sistemine bağlanarak gerekli elektriksel ölçümler alınmıştır. Vakum hücresinin dış görünüşü Şekil 7.55'de verilmiştir.



Şekil 7.53 Betavoltaik nükleer pil akım-voltaj ölçüm düzeneği



Şekil 7.54 Geliştirilen betavoltaik nükleer pil prototipi



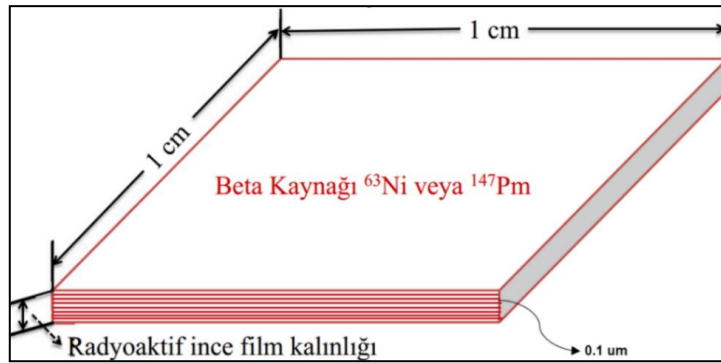
Şekil 7.55 Vakum hücresi ve PCB'nin yerleşimi

7.2 Radyoaktif İnce Film Üretim Aşamaları

7.2.1 Kaynak Parametrelerinin Simülasyonu

İnce metal bir plaka üzerine kaplanan beta radyoaktif ince filmin kalınlığı belirli bir değerin üstüne çıktığında, film kendini zırhlamaya başlar. Bu durumda düşük enerjili beta parçacıkları ince filmin içerisine hapsolürken, yüksek enerjili beta parçacıkları dışarı çıkabilir. Böyle bir durumda hem radyoaktif ince filmin dışarıdan ölçülen aktivitesi (görünür aktivite) düşer, hem de enerji spektrumu yüksek enerji değerlerine doğru kayar. Bu nedenle her bir kaynağa ait ideal kalınlığın bulunması gerekir.

Radyoaktif kaynaktan çıkan beta parçacıklarının simülasyonu; kaynağın kendini zırhlama etkisi, enerji spektrum kayması ve yarı iletkende bıraktığı enerji miktarının belirlenmesi için yapılmıştır.

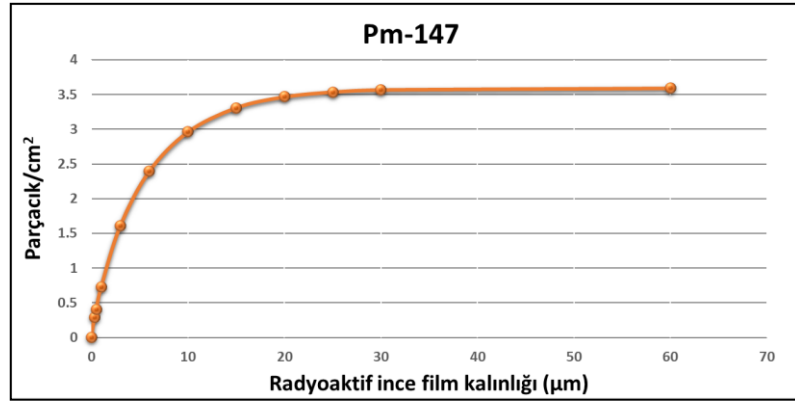


Şekil 7.56 Radyoaktif ince film simülasyonu için kullanılan geometri

7.2.1.1 Optimum İnce Film Kalınlığı Simülasyonu

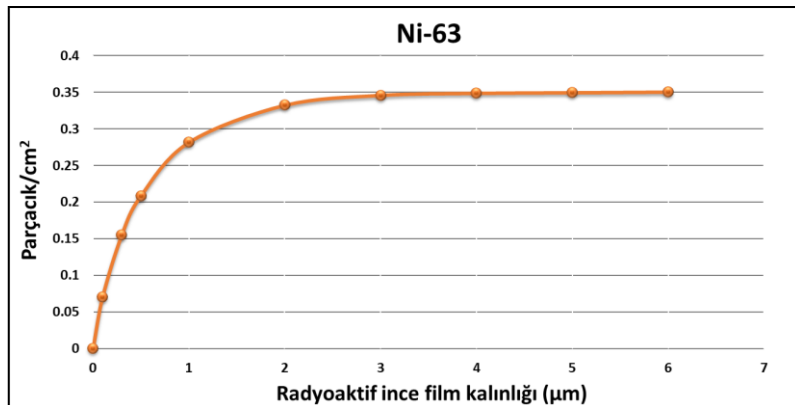
Tez çalışması kapsamında ince film haline getirilecek olan sıvı formdaki Pm-147 ve Ni-63 radyoizotopların, kaynağın kendini zırlama etkisi gözönüne alınarak, optimum film kalınlıklarının belirlenmesi amacıyla MCNPX simülasyonları yapılmıştır. Yapılan modellemelerde radyoaktif ince film 0.1 μm 'lik ince dilimlere bölünmüştür. Tek bir diliminden çıkan parçacık sayısı n , film kalınlığı arttıkça artacağı için, modellemeye eklenen her bir dilimde, kalınlıkla parçacık sayısı çarpılarak normalize edilmiştir. Her iki kaynak için elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 7.57 ve Şekil 7.58'de verilmiştir.

a. Prometyum (Pm-147):



Şekil 7.57 Pm-147 için optimum inci film kalınlığının belirlenmesi

b. Nikel (Ni-63):

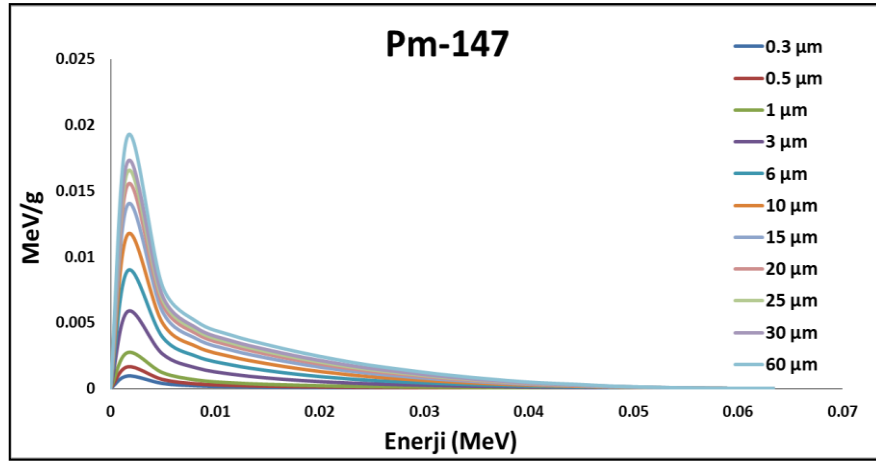


Şekil 7.58 Ni-63 için optimum ince film kalınlığının belirlenmesi

7.2.1.2 Beta Spektrum Değişimi Simülasyonu

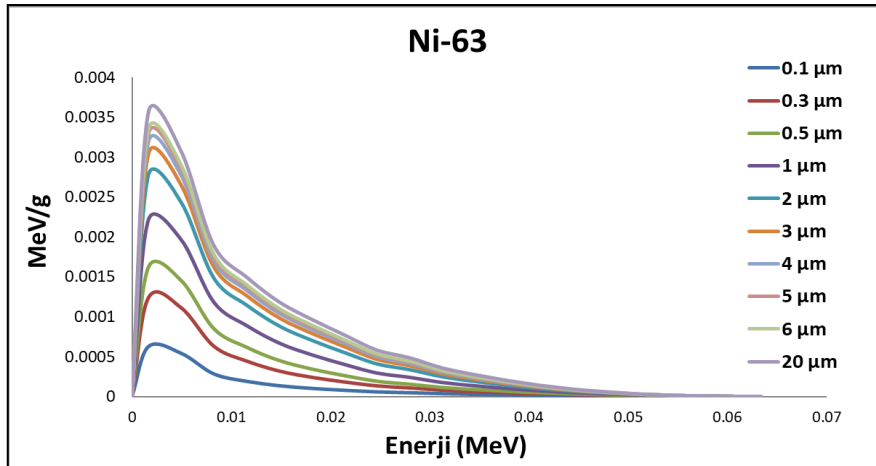
Herbiri radyoaktif kaynaktan farklı enerjilerde yayınlanan beta parçacıklarının enerji spektrumunun ince film kalınlığı arttıkça nasıl değiştiğini görmek için MCNPX modellemesi yapılmıştır. Yapılan modellemede farklı enerjilerde salınan beta parçacıklarının, farklı tabaka kalınlıklarında bıraktığı enerji, her bir kalınlık için çarpılarak normalize edilmiştir.

a. Prometyum (Pm-147):



Şekil 7.59 Farklı Pm-147 ince film kalınlıklarında beta enerji spektrumunun değişimi

b. Nikel (Ni-63):

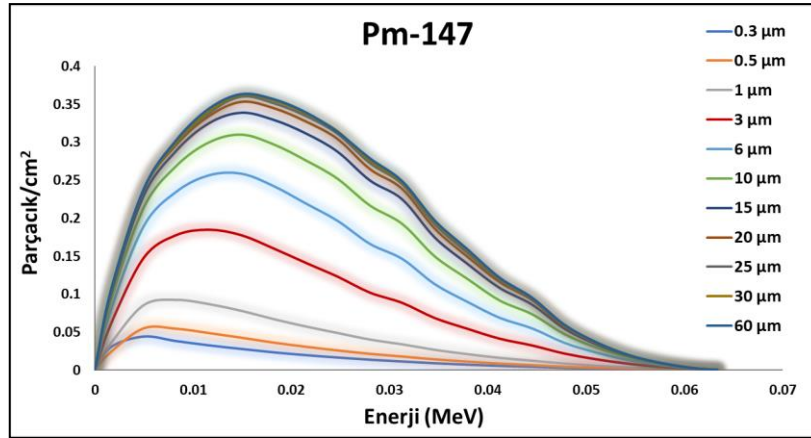


Şekil 7.60 Farklı Ni-63 ince film kalınlıklarında beta enerji spektrumunun değişimi

7.2.1.3 Kaynağın Akı Değişim Simülasyonu

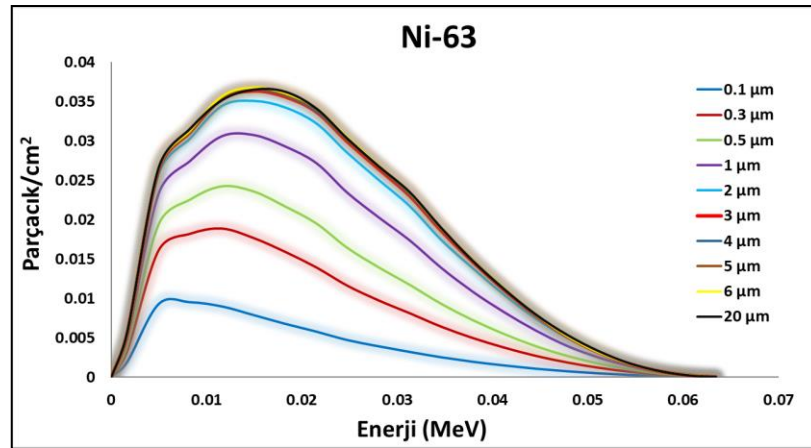
Radyoaktif ince film kalınlığı arttıkça düşük enerjili beta parçacıkları, filmin içerisinde soğurulacağından dolayı kaynağın görünür yüzey aktivitesi gerçek aktivitesinden düşük olacaktır. Farklı film kalınlıklarında, 70 keV'e kadar bu değişimi belirlemek amacıyla MCNPX modellemeleri yapılmış ve sonuçları Şekil 7.61 ve Şekil 7.62'de verilmiştir.

a. Prometyum (Pm-147):



Şekil 7.61 Enerjinin fonksiyonu olarak Pm-147 yüzey akısının-kalınlığa bağlı değişimi

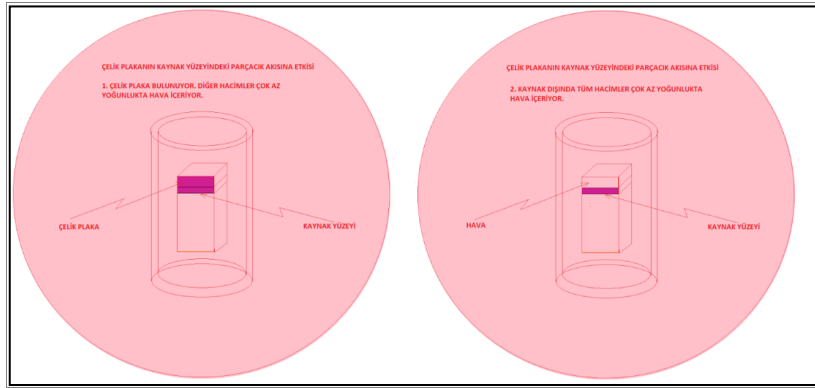
b. Nikel (Ni-63):



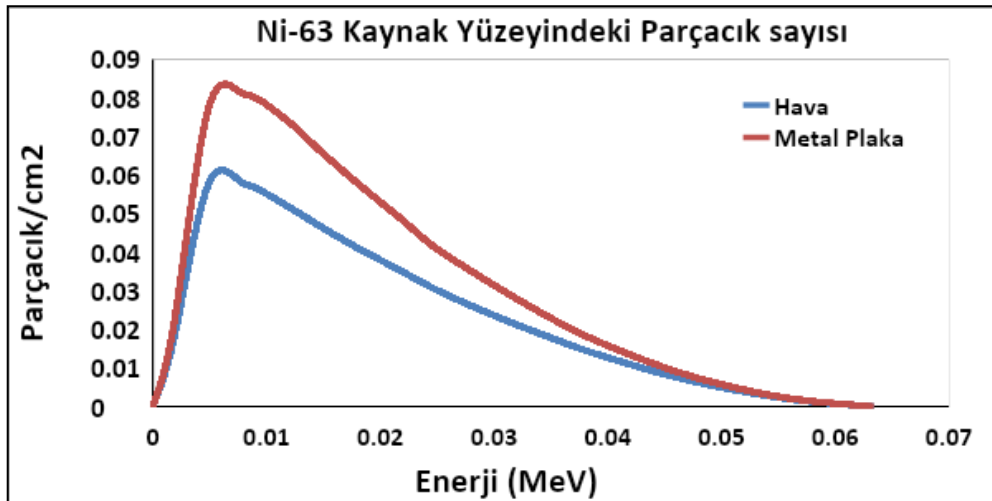
Şekil 7.62 Enerjinin fonksiyonu olarak, Ni-63 yüzey akısının-kalınlığa bağlı değişimi

7.2.1.4 Beta Parçacık Saçılım Simülasyonu

Şekil 7.63'de, bakır plaka üzerine kaplanan Ni-63 ince filmden yayınlanan beta parçacıklarından, plakaya çarparak GaN yarı iletkenine gelen kısmın, doğrudan yarı iletkenine gelen beta akısını ne kadar artırdığı modellenmiştir. Ayrıca metale çarparak geri dönen beta parçacıklarının enerji değişimleri de, yapılan MCNPX modellemesi ile belirlenmiştir. Yapılan modellemede ilk olarak, Şekil 7.63 soldaki resimde görüldüğü gibi radyoaktif ince filmin arka yüzeyine metal yerleştirilmiş, daha sonra sağdaki resimde görüldüğü gibi kaynak yüzeyinin arka kısmı hava olarak tanımlanarak aradaki fark hesaplanmıştır. Her iki modellemeden elde edilen akı-enerji grafiği Şekil 7.64'de verilmiştir.



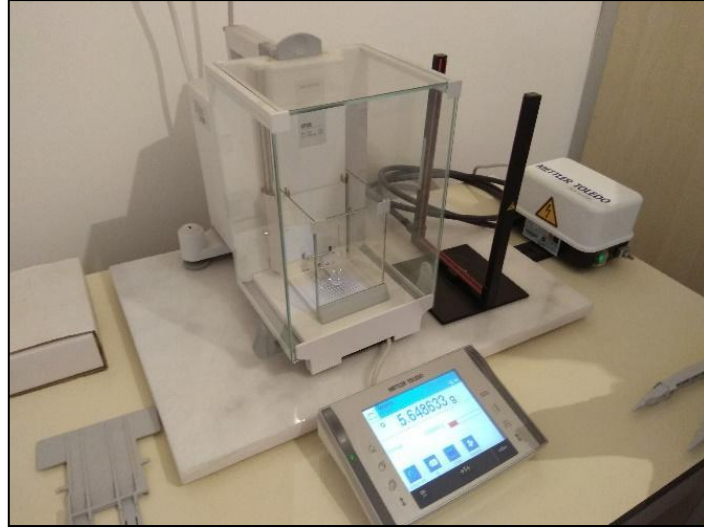
Şekil 7.63 Ni-63 beta akısının metalden yarı iletkenine saçılan kesrinin modellenmesi



Şekil 7.64 Plakadan saçılan betaların, toplam beta spektrumuna etkisi

Şekilde görüldüğü gibi, Ni-63 ince filmin arkasında metal plaka olduğu durumda parçacık akısı görünür bir şekilde artmaktadır. Bunun nedeni radyoaktif kaynaktan metale doğru yayınlanan beta parçacıklarının yüksek enerjiye (keV mertebesinde) sahip olmalarıdır. Buradan saçılarak yarı iletkene gelen beta parçacıkları da, kaynağın görünür aktivitesinin artmasına ve beta spektrumunun bir miktar değişmesine neden olmaktadır.

7.2.2 Prometyum-147 İnce Film Kaplanması



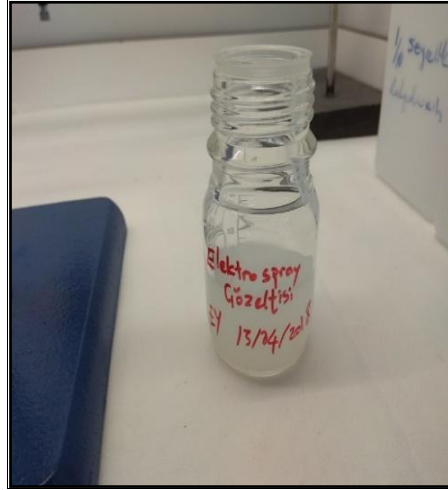
Şekil 7.65 Hassas elektronik terazi yardımıyla sıvı Pm-147 kaynağının alınması ve aktivitesinin belirlenmesi

İlk beta radyoaktif kaynak kaplama çalışması, sıvı formdaki Prometyum-147 (Pm-147) ile yapılmıştır [210]. İlk olarak, üzerlerine radyoaktif ince film kaplama denemelerinin yapılacağı nikel ve paslanmaz çelik alt tabakalara, GaN yarı iletkenin aktif bölgesi olarak tasarlanan 1 cm²'lik alana birebir örtüşecek şekilde, lazer kesim yapılmıştır. Metal plakaların kenarlarında 0.25 cm maskeleme için boşluk bırakılmıştır. İkinci olarak, plakaların üzerine damlatma yöntemiyle kaplanacak olan sıvı formdaki Pm-147 radyoaktif kaynağının içerisinde, deneyde kullanılacak miktarda alınmış ve Şekil 7.65'de görüldüğü gibi hassas elektronik terazi ile tartılmıştır. İnce filmin metal plakaların sadece orta kısmına kaplanması ve kenarlarda eşit ölçüde boşluk kalması için, Şekil 7.66 'da görüldüğü gibi maskeleme işlemi yapılmıştır.



Şekil 7.66 Radyoaktif ince film kaplama – maskeleme

Sıvı Pm-147 radyoaktif kaynağının metal yüzeye tutunabilmesi ve yüzeyde homojen bir şekilde dağılabilmesi amacıyla, Şekil 7.67’de verilen sıvı elektro spray çözeltisi kullanılmıştır.



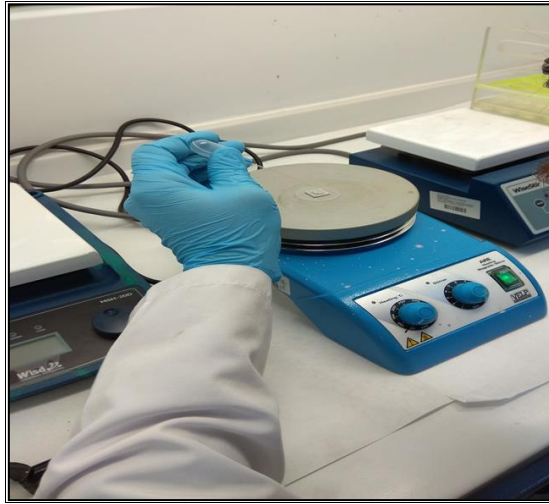
Şekil 7.67 Mikro kürecikler içeren elektro spray çözeltisi

Üçüncü adımda, bu çözelti içerisinde bulunan mikro kürecikler, Şekil 7.68’de gösterilen sistem ile metal plakalar üzerine püskürtülerek, metal yüzeylere homojen bir şekilde dağılması sağlanmıştır. Kurulan sistemde, 3 adet metal plaka şekilde gösterilen yuvalara yerleştirilerek sabit hızda yavaşça kaydırılırken nitrojen tüpüne bağlanmış olan püskürtme sistemi düşük hızda açılmıştır. Böylece mikro küreciklerin tüm plakalara eşit miktarda püskürtülmesi sağlanmıştır.



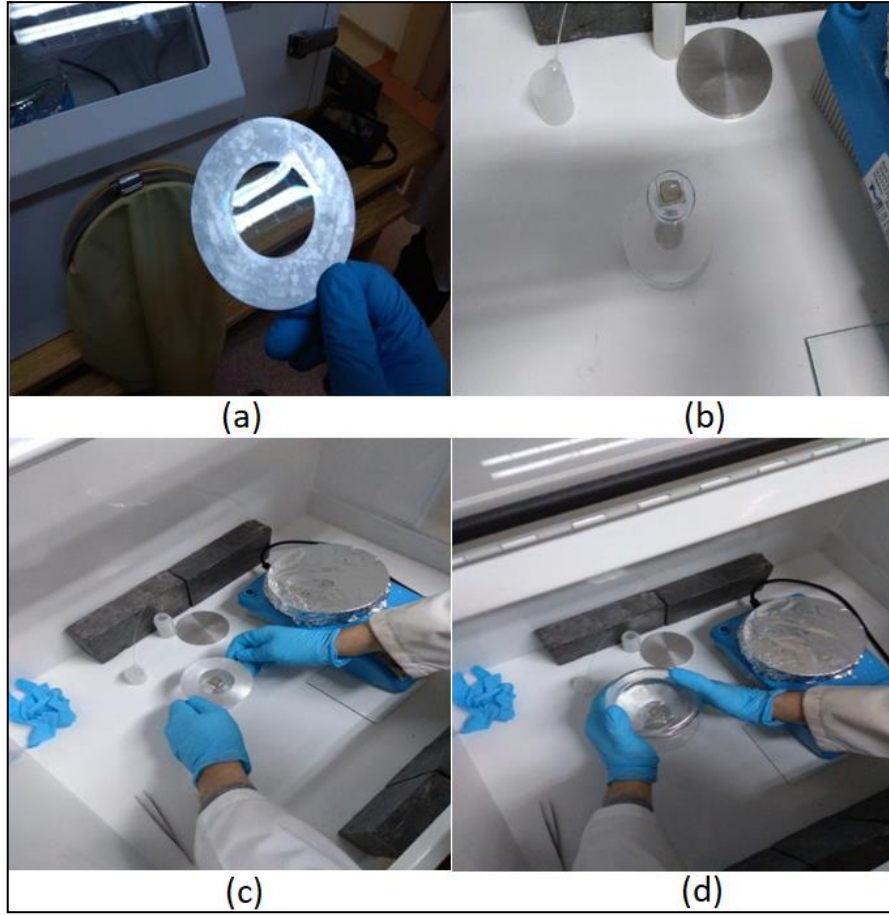
Şekil 7.68 Mikro küreciklerin metal yüzeye homojen olarak dağıtılması

Deneyin dördüncü aşamasında, istenilen aktivite elde edilinceye kadar radyoaktif kaynak seyreltilmiştir. Sıvı mikro küreciklerin homojen olarak kaplandığı metal yüzey manyetik ısıtıcı üzerine konulmuş ve ısıtıcı 50 °C'ye ayarlanmıştır. Daha sonra seyreltilmiş olan Pm-147 radyoaktif kaynaktan istenilen aktivite miktarı kadar hassas elektronik pipet yardımıyla alınmış ve plaka üzerine damlatılmıştır. Son olarak yüzeye iyice tutunması için 30 dakika boyunca ısıtılmıştır (Şekil 7.69).



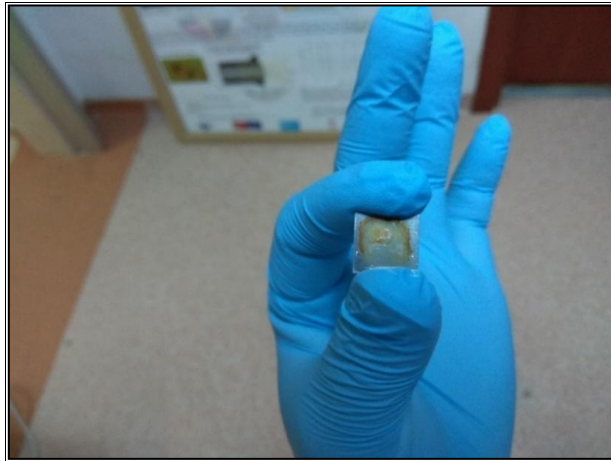
Şekil 7.69 Radyoaktif Pm-147 beta kaynağının metal yüzeye kaplanması

Çalışılan yarı iletkenin kontamine olmaması için radyoaktif ince film, kapalı sıcak hücre içerisine alınmış ve yüzeyi vinyl malzeme ile kaplanmıştır. Şekil 7.70'de, kapalı cam kap ve aseton yardımıyla yapılan vinyl kaplama işlemi gösterilmiştir.



Şekil 7.70 Vynil kaplama işlemi (a) Vinyl malzeme (b) Kaplanacak metal yüzey (c) Vynil-metal birleşimi (d) Kapalı cam kap ve aseton işlemi

Radyoaktif kaynak ile kaplanmış olan metalin son durumu Şekil 7.71’de gösterilmiştir.



Şekil 7.71 Pm-147 beta kaynağı kaplanmış metal yüzeyin görünümü

Hazırlanan radyoaktif ince film kalınlığı, yapılan Monte-Carlo modellemeleri sonucunda belirlenmiştir. Şekil 7.57'deki grafikte bahsedildiği gibi Pm-147 ince filmin yüzey aktivitesi, belirli bir film kalınlığından sonra kendini zırlamakta ve düşük enerjili betaların metal yüzeyden çıkışına izin vermemektedir. Grafiğe göre, kaplanan Pm-147 kaynak kalınlığı yaklaşık 20 μm 'ye ulaştığında yüzey aktivitesi (beta akısı) sabit kalır. Bu nedenle filmin kalınlığı, yüzey aktivite doyum kalınlığı olan 20 μm 'den düşük olmalıdır. Mevcut tez araştırmasında 10 mCi Pm-147 kullanılmıştır. Bu aktivitenin 1 cm^2 'lik bir metal plakaya kaplandığında, ne kadar film kalınlığına denk geleceği aşağıda verilen Tablo 7.4'te hesaplanmıştır. Buna göre bu alan üzerindeki 10 mCi'lik Pm-147 ince film kalınlığı yaklaşık olarak 1.49 μm 'ye denk gelmektedir. Şekil 7.57'deki grafikte görüldüğü gibi bu kalınlıktaki radyoaktif ince filmin kendini zırlama etkisi ihmal edilebilecek kadar düşük düzeydedir.

Tablo 7.4 Pm-147 radyoaktif ince film aktivite-kalınlık dönüşümü

Pm-147	
Atomik Ağırlık	147 g
Yoğunluk	7,26 g/cm ³
Aktivite	10 mCi = 3,70x10 ² MBq
Yarı-Ömür	2,6234 yıl
Parçacık Sayısı (N)	4,42 x10 ¹⁶ atom = 1,08x10 ⁻⁵ g
Hacim	1,49 x10 ⁻⁶ cm ³
Toplam alan	1 cm ²
Hesaplanan Kalınlık	1,49 μm

7.2.3 Nikel-63 İnce Film Kaplanması

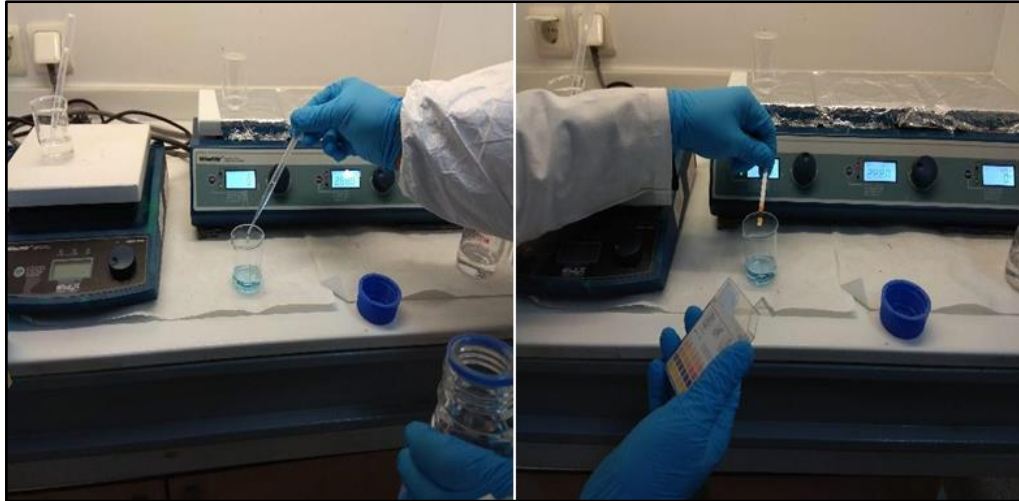
İkinci radyoaktif kaynak kaplama çalışması, sıvı formdaki Ni-63 beta kaynağı ile gerçekleştirilmiştir. Pm-147 film üretim sürecine benzer şekilde ilk olarak, GaN yarı iletkenin 1 cm^2 'lik aktif bölgesi olarak tasarlanan alana birebir örtülecek şekilde, bakır plakalara lazer kesim yapılmıştır. Ni-63 için metal plaka olarak bakır seçilmesinin nedeni elektroliz veriminin yüksek olmasıdır. İkinci olarak, plakaların üzerine elektrolizle kaplanacak olan sıvı Ni-63 beta kaynağından, 155 mCi aktivite

elde edilecek şekilde sıvı alınmış ve Şekil 7.72’de görüldüğü gibi hassas elektronik terazi ile tartılmıştır.



Şekil 7.72 Ayrılan Ni-63 radyoaktif sıvının tartıldığı hassas elektronik tartı sistemi

Yapılan bir sonraki işlemde, 155 mCi aktiviteye sahip sıvı Nikel Klorür’den (NiCl_2), klor bileşimini uzaklaştırmak ve saf radyoaktif nikel elde etmek için, radyoaktif sıvı Şekil 7.73’te gösterilen elektronik ısıtıcı ile yaklaşık 100 $^{\circ}\text{C}$ ’ye kadar ısıtılmıştır.



(a)

(b)

Şekil 7.73 (a) NiSO_4 çözeltisine amonyum sülfat $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ eklenmesi (b) pH ölçümü

Saf Ni-63 radyoaktif sıvı elde edildikten sonra, bu sıvıyı metal plaka üzerine kaplamak için, kaynağın içerisine sülfirik asit (H_2SO_4) eklenmiş ve NiSO_4 çözeltisi

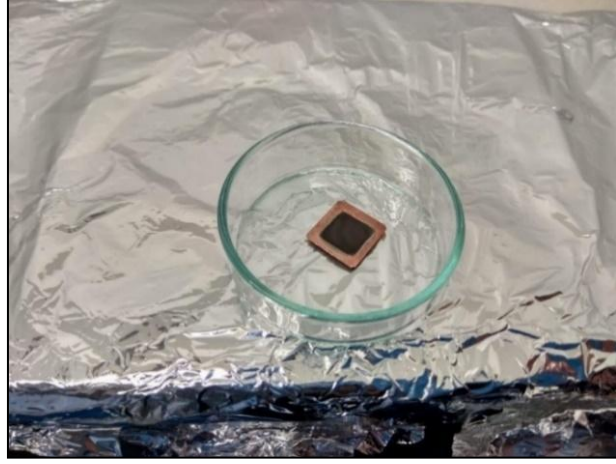
elde edilmiştir. Ayrıca elektrolizin pH dengesinin sağlanması amacıyla çözeltiye ilk olarak amonyum sülfat $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ve 3 ml civarında su eklenmiştir. Bu durumdaki asidik halde bulunan çözeltiyi bazik hale getirmek için, çözeltiye elektronik pipetle 16 damla amonyak eklenmiştir. Elektroliz veriminin yüksek olması için pH değerinin doğru ayarlanması oldukça önemlidir. Bundan dolayı, Şekil 7.73'te görüldüğü gibi istenilen pH değeri elde edilene kadar, çözeltiye amonyak eklenir ve pH ölçümü tekrarlanır [211].

Deneyin son adımında hazırlanan radyoaktif sıvı, Şekil 7.74'de görülen elektroliz hücresi içerisine konulmuştur. Daha sonra üzerine Ni-63 kaplanacak olan 1 cm² 'lik kare şeklindeki bakır plaka, anot ucunda hazırlanmış olan yuvaya yerleştirilmiştir.



Şekil 7.74 Ni-63 Radyoaktif ince film elektroliz kaplama çalışmaları

Deney kurulumu bittikten sonra, elektroliz hücresinin anot ve katod uçları arasında, 2 saat boyunca, 0.3 A'lık düşük akım verilerek tüm Ni-63 kaynağının metal plakada kaplanması sağlanmıştır. Kontaminasyonu önlemek için kaplanan kaynak düşük derecede son bir ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Metal üzerine kaplanan Ni-63 radyoaktif ince filmin görüntüsü Şekil 7.75'de gösterilmiştir.



Şekil 7.75 1 cm² bakır plaka üzerine kaplanmış Ni-63 radyoaktif ince film

Şekil 7.58'deki grafikte bahsedildiği gibi Ni-63 ince filmin yüzey aktivite doyum kalınlığı 3 μm civarındadır ve bu kalınlıktan sonra kaynak kendini zırhlamaya başlar. Mevcut tez araştırmasında kullanılan 155 mCi aktiviteli Ni-63 1 cm²'lik bakır plakaya kaplandığında oluşan filmin kalınlığı Tablo 7.5'de hesaplanmıştır.

Tablo 7.5 Ni-63 radyoaktif ince film aktivite-kalınlık dönüşümü

Ni-63	
Atomik Ağırlık	63g
Yoğunluk	8,91g/cm ³
Aktivite	155mCi = 5,74x10 ³ MBq
Yarı-Ömür	98,7yıl
Parçacık Sayısı (N)	2,58x10 ¹⁹ atom = 2,70x10 ⁻³ g
Hacim	3,03x10 ⁻⁴ cm ³
Toplam alan	1cm ²
Hesaplanan Kalınlık	3,03 μm

Buna göre kaplanılan Ni-63 filmin kalınlığı yaklaşık 3.03 μm civarındadır. Bu kalınlıkta kaynak kendini yaklaşık % 4 oranında zırhlar. Ayrıca Şekil 7.60'da verilen beta enerji spektrum değişim grafiğine göre, Ni-63'ün enerji spektrumunda, ortalama beta enerjisi olan 17.4 keV'e çok az miktarda yüksek enerjiye doğru kayma mevcuttur.

7.3 Nükleer Pil Akım Voltaj Ölçüm Sisteminin Kurulması

Mevcut tez araştırması döneminde geliştirilen betavoltaik ve doğrudan şarjlı nükleer pillerin kesim 6.1.2 ve 6.2’de verilen elektriksel parametre değerlerinin ölçülmesi için, TAEK bünyesinde Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarı kurulmuştur (Şekil 7.76). Karanlık ve beta akım ölçümleri için Keithley 2612-B kaynak ölçer temin edilmiş ve Şekil 7.77’de verilen hassas ölçüm problemlerine sahip faraday ölçüm düzeneği yaptırılmıştır. Beta akım değerleri oldukça düşük olduğundan dolayı ölçümler için, triax kablo ve konektör bağlantısı seçilmiştir.



Şekil 7.76 Betavoltaik nükleer pil karakterizasyon sistemi



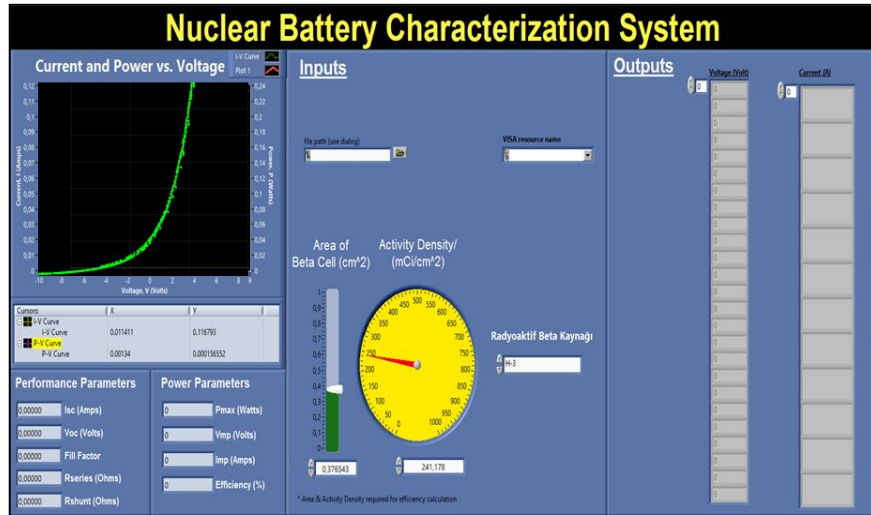
Şekil 7.77 Betavoltaik nükleer pil karakterizasyon sistemi

Üçüncü aşamada, ölçüm sistemini test etmek için örnek bir fotovoltak pil temin edilmiştir. Fotovoltak pil, faraday ölçüm kutusu üzerinden Keithley akım-voltaj

ölçüm sistemine Şekil 7.77’de gösterildiği gibi bağlanarak karanlık ve foto akım ölçümleri alınmıştır.

İkinci aşamada, alınan parametre ölçümlerinin bilgisayar kontrollü olarak yapılması, güç, verim, açık devre voltajı, kısa devre akımı gibi pilin karakteristik değerlerinin otomatik olarak hesaplanması için Labview görsel programlama dili kullanılarak [212], nükleer pil karakterizasyon yazılımı geliştirilmiştir. Geliştirilen otomasyon yazılımının arayüzü Şekil 7.78’de gösterilmiştir. Şekilde görülen Labview tabanlı yazılımda, betavoltaik nükleer pilde oluşan maksimum akım ve açık devre voltajının bulunması için, Keithley Source-Meter ile seçilen voltaj aralığında pilin oluşturduğu akımın tersi yönünde akım uygulanır. Milivolt mertebesindeki adımlarla kademeli olarak artırılan bu voltaj değerleri betavoltaik pilin ürettiği voltaja eşit olduğunda, devrenin ürettiği yük akışı ve dolayısıyla akım durmuş olur. Bu şekilde betavoltaik pilin ürettiği maksimum akım değeri bulunmuş olur.

Son aşamada, Şekil 7.75’teki hazırlanmış olan radyoaktif kaynak, Şekil 7.54’de verilen GaN yarı iletken aygıtı içeren hücrenin içerisine yerleştirilmiş ve geliştirilen betavoltaik pile ait I-V karakteristik ölçümleri alınmıştır. Elde edilen ölçüm değerlerinden verim ve güç hesaplamaları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar 9. bölümde verilmiştir.



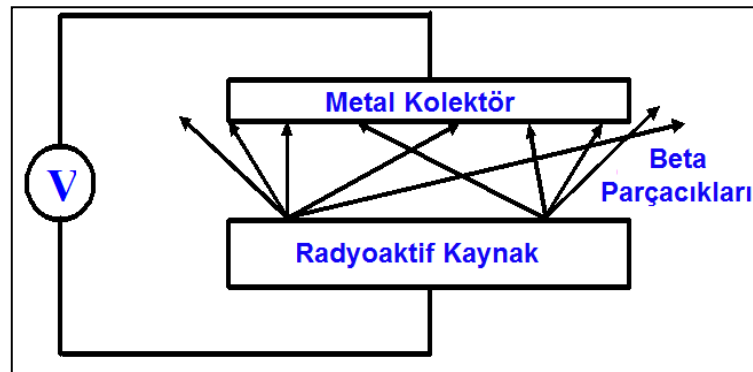
Şekil 7.78 Betavoltaik nükleer pil ölçümleri için geliştirilen yazılım

PROMETYUM-147 TABANLI DOĞRUDAN ŞARJLI NÜKLEER PİL GELİŞTİRİLMESİ

8.1 Prometyum Tabanlı Doğrudan Şarjlı Nükleer PİL Tasarımı

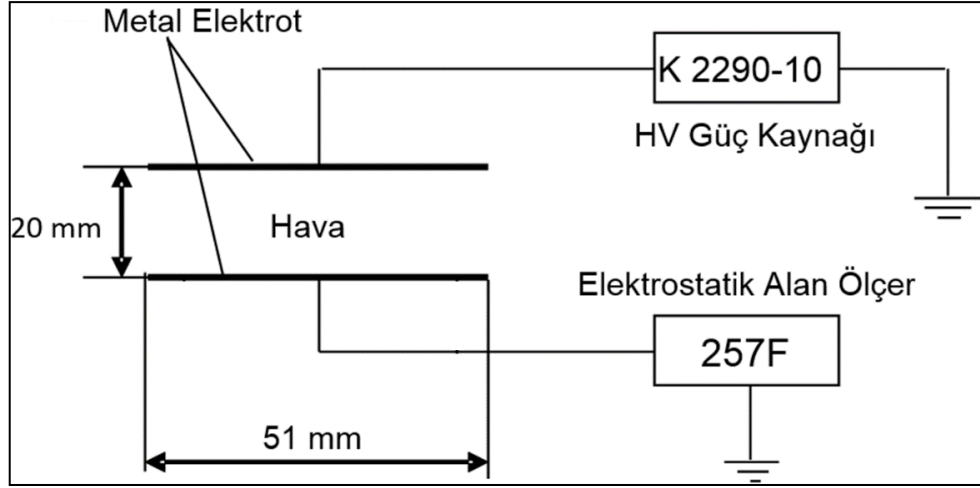
Doğrudan şarjlı nükleer pillerin çalışma prensibi, verimlilik denklemi ve verimi etkileyen faktörler Bölüm 6.2’de ayrıntılı olarak anlatılmıştı. Mevcut tez araştırması döneminde temin edilebilen Pm-147 radyoizotop ile doğrudan şarjlı nükleer pil deney sistemi hazırlanmış, devrede oluşan düşük akım ve kapasitans değerleri ölçülmüştür.

Tez araştırmasında geliştirilen doğrudan şarjlı nükleer pil deney sistemi, Şekil 8.1’de görüldüğü gibi, radyoaktif ince bir filminden yayınlanan yüksek enerjili beta parçacıklarının metal kolektöre çarpması ve burada oluşan ikincil elektronların harici bir devrede toplanması prensibine göre kurulmuştur

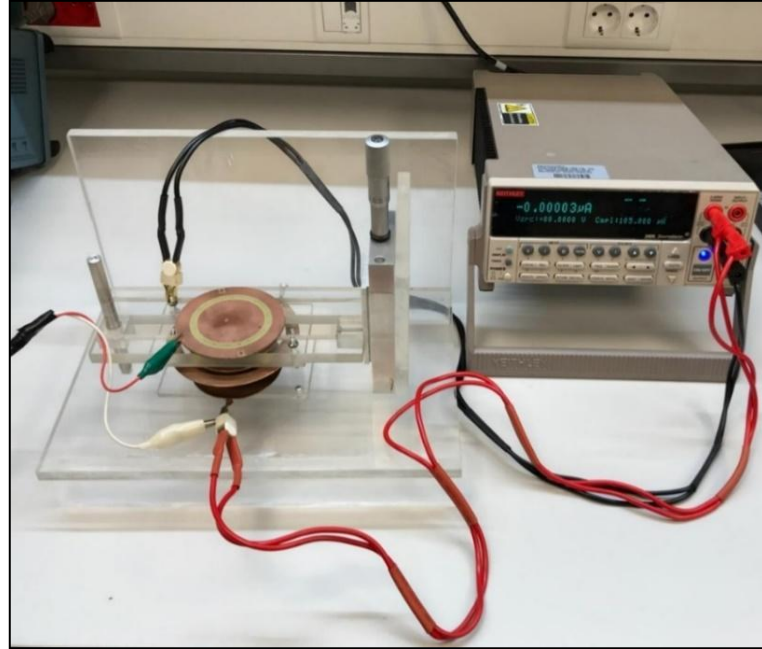


Şekil 8.1 Betavoltaik nükleer pil ölçümleri için geliştirilen yazılım arayüzü

Nükleer pil sistemi hazırlanmadan önce, Şekil 8.2’de verilen iki plakalı bir ölçüm düzeneği kurulmuştur. Yapılan ön çalışmanın amacı, alttaki metal plaka üzerine radyoaktif kaynak konulmadan önce, temassız yüksek gerilim ölçüm sisteminin kalibrasyonunun yapılmasıdır. Bu amaçla Keithley 2290-10 yüksek voltaj kaynağı ile iki plaka arasına kademeli olarak voltaj uygulanmıştır. Kolektörde biriken voltaj ölçümü, 1036F problu 257F elektrostatik alan/voltaj ölçer ile alınmıştır. Hazırlanan ölçüm düzeneği Şekil 8.3’de gösterilmiştir.

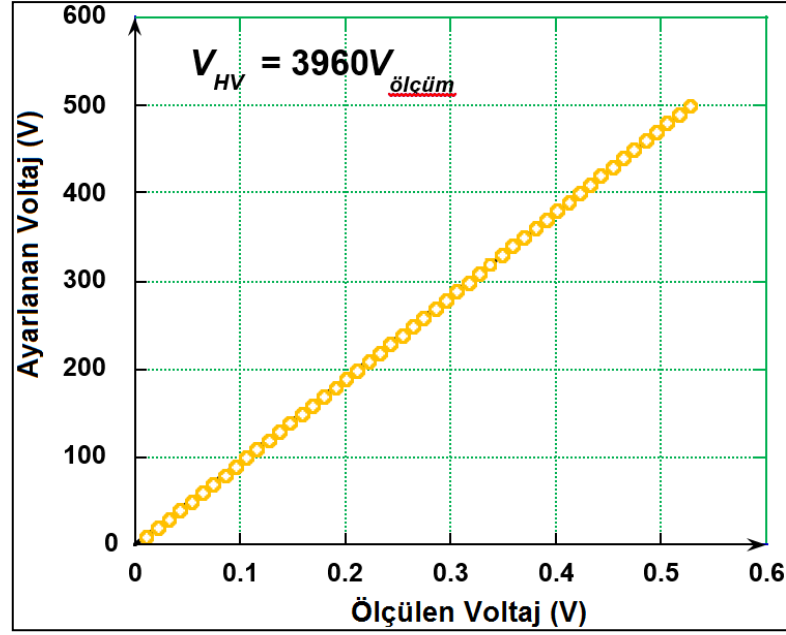


Şekil 8.2 Uygulanan plaka voltajına göre kolektör voltajının ölçülmesi



Şekil 8.3 Ayarlanan ve akümüle edilen voltajın ölçüldüğü deney sistemi

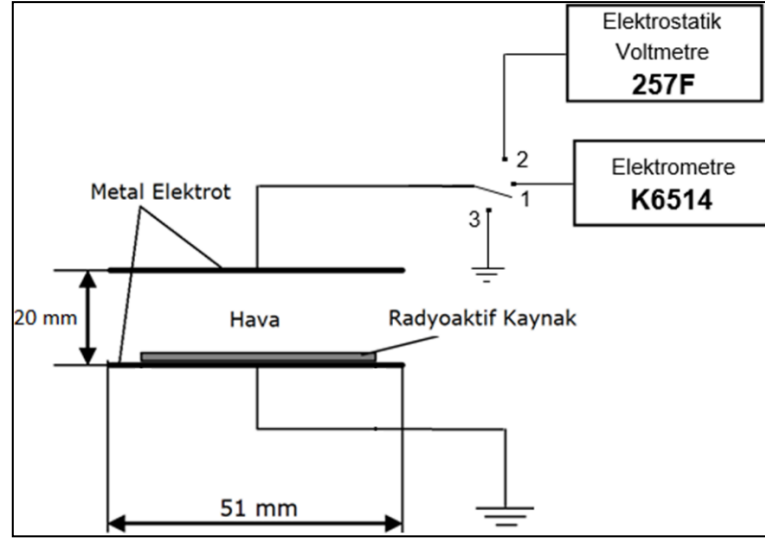
Şekilde görüldüğü gibi, üst ve alttaki elektrotlar için, 2" çaplı dairesel bakır plaka kullanılan bir sistem tasarlanmıştır. Radyoaktif kaynağın konulacağı alttaki plaka sabit, üstteki metal plaka ise sabitlendiği hareketli düzenek yardımıyla yukarı-aşağı yönde hareket edebilmektedir. Ölçümlerde ayarlanan her bir voltaj değerine göre (V_{HV}) elektrostatik alan ölçer'in okumaları ($V_{ölçüm}$) kalibre edilmiştir. Farklı kolektör aralıklarında, uygulanan ve ölçülen voltaj değerlerine göre elde edilen eğri Şekil 8.4'de verilmiştir.



Şekil 8.4 Elektrostatik alan ölçer kalibrasyon eğrisi

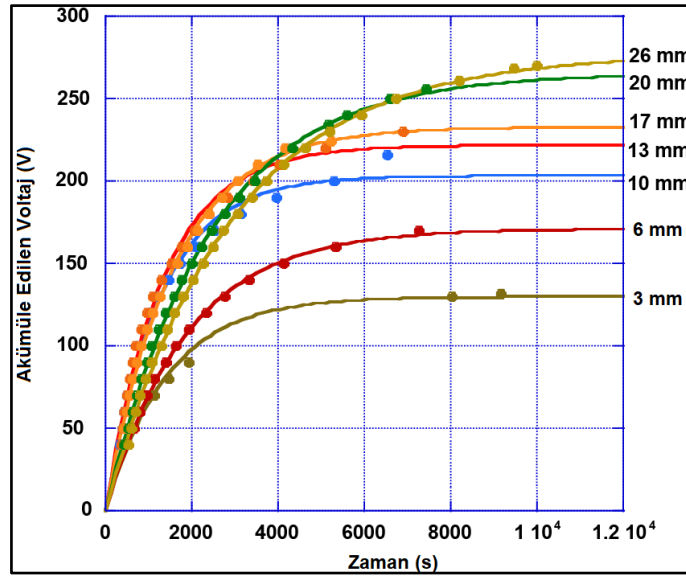
Grafikte görüldüğü gibi ayarlanan ve elektrostatik alan ölçer ile okunan voltaj değerleri orijinden geçmektedir ve birbirine lineer olarak bağlıdır. Bu bağımlılık $V_{HV} = 3960 \cdot V_{ölçüm}$ olarak bulunmuştur.

Doğrudan şarjlı nükleer pil sistemini hazırlamadan önce alınan ikinci bir ölçüm, metal elektrotlar arasındaki optimum mesafenin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Ölçümler Şekil 8.3'de verilen sistem ile alınmıştır. Ancak bu defa, alttaki metal plaka üzerine 10 mCi Pm-147 beta kaynağı yerleştirilmiş ve plaka topraklanmıştır. Kaynakla yapılan ölçüm düzeneği şeması Şekil 8.5'de gösterilmiştir. Plakanın topraklanmasının nedeni, yüksek enerjili beta yayınından dolayı kaynağın olduğu plakada meydana gelen yükün sıfırlanmasıdır. Şekildeki sistemde anahtar 2 konumunda iken, Pm-147 radyoaktif kaynağından yayınlanan beta parçacıkları üstteki kolektör plakaya çarptıkça burada zamana göre artan bir yük ve voltaj akümüülasyonu meydana gelecektir. Şekildeki sistemde yaklaşık 3 saat gibi uzun bir süre beklendikten sonra metal kolektörde biriken voltaj elektrostatik voltmetre ile ölçülmüştür. Anahtar 1 konumuna alındığında sistem elektrometre üzerinden topraklanır. Kolektörle arasındaki potansiyel farktan dolayı sistemde indüklenen yük toprağa doğru hareket eder ve elektrometre üzerinden ölçülür.



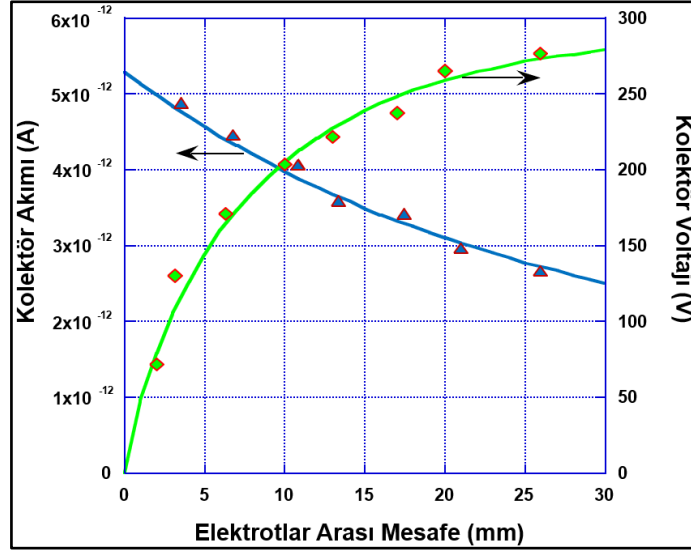
Şekil 8.5 Elektrotlar arası optimum mesafenin belirlenmesi

Ayarlanan farklı elektrot mesafelerine bağlı elektrostatik voltmetre ile alınan ölçümler Şekil 8.6 'daki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 8.6 Farklı elektrot aralığında zamana göre kolektörde biriken voltaj

İkinci olarak, Şekil 8.5 sisteminde, ayarlanan her bir kolektör mesafesi için, anahtar 1 ve 2 konumuna alınarak kısa devre akımı ve kolektör voltajı ölçülmüştür. Alınan ölçümlerden, Şekil 8.7'de noktalı olarak verilen grafik değerleri elde edilmiştir.



Şekil 8.7 Farklı elektrot mesafelerinde oluşan kolektör akım-voltaj grafiği

Şekil 8.7'den görüldüğü gibi elektrotlar arası mesafe arttıkça kolektör voltajı artarken, kısa devre akımı azalmaktadır. Bunun nedeni, elektrotlar arası mesafe arttıkça kaynaktan çıkan beta parçacıklarının yayılma açısı (katı aç) artacağından, bir kısım parçacıkların, üstteki toplayıcı plakanın kenarlarından dışarı doğru gitmesi ve yük kaybına sebep olmasıdır.

Sistemin şarj akımı, 6. bölümde verilen denklem (6.47) kullanılarak elde edilmiş ve Şekil 8.7'de ölçülen kolektör akımları teorik olarak doğrulanmıştır. Grafikte ölçülen kısa devre akımı bu denklemde yerine yazılırsa kolektör akımı,

$$I_{şarj} = 5 \cdot 10^{-12} \cdot k_g(0.02, d/1000) \quad (8.1)$$

bulunur. Burada, $k_g(0.02, d/1000)$, denklem (6.60)'da verildiği gibi, geometrik faktör olarak adlandırılır ve beta parçacık akısının kolektöre ulaşan kesrini ifade eder. Benzer şekilde grafikte yeşil noktalarla verilen voltaj değerleri denklem (6.83) kullanılarak teorik olarak da elde edilmiş ve grafikteki sürekli eğri çizilerek deneysel sonuçlar doğrulanmıştır. Her bir elektrot mesafesi için denklem (8.1) ile hesaplanan kolektör akımı, denklem (6.34)'te yerine konularak sistemin doyum voltajı bulunabilir.

$$V_{Doyum} = I_{şarj} R_{kaçak} \eta_R \quad (8.2)$$

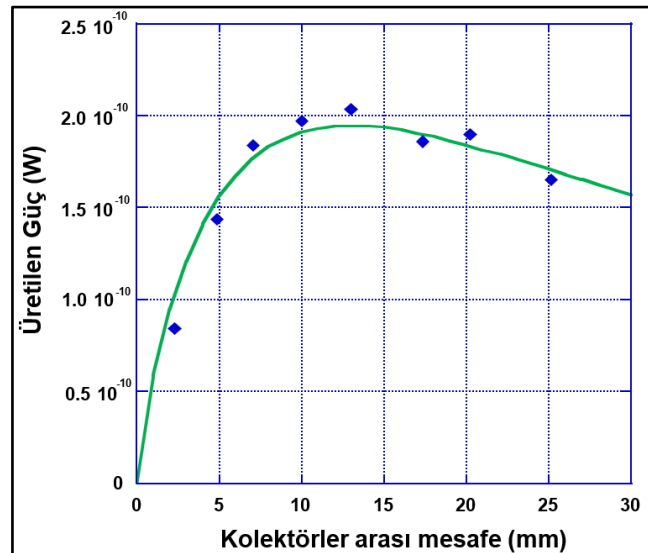
Burada η_R kolektöre ulaşan beta parçacık akısını ifade eder. Doyum voltajının bulunması için, sistemin kaçak direnci ($R_{\text{kaçak}}$), denklem (6.38)'deki gibi hesaplanmıştır. Denklem (6.38)'de verilen $R_{\text{yük}}$, harici direnci ifade eder ve yüksek voltaj ölçümleri için voltaj bölücü olarak kullanılır. Kurulan sistemde, doyum voltajı ölçümü için 10 TOhm'luk harici direnç seçilmiştir. Pilin ürettiği güç, denklem (6.40) kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$P_{\text{pil}} = V_{\text{Doyum}} \cdot I_{\text{yük}} = I_{\text{şarj}} \frac{R_{\text{pil}} \cdot R_{\text{yük}}}{R_{\text{pil}} + R_{\text{yük}}} \quad (8.3)$$

Denklem (8.2) ve (8.3)'te $R_{\text{pil}} \gg R_{\text{yük}}$ olduğu kabul edilerek üretilen güç ve doyum voltajı hesaplanmıştır. Benzer şekilde Şekil 8.7'deki akım değerleri ölçülürken, denklem (6.45) ifadesinde $R_{\text{yük}} = 0$ alınmıştır ($I_{\text{sc}} = I_{\text{şarj}}$, kısa devre durumu).

Pilin ürettiği gücün deneysel olarak bulunması için, Şekil 8.7'deki akım-voltaj değerleri birbiri ile çarpılarak kolektörler arası mesafeye bağlı güç grafiği çizilmiştir. Elde edilen grafik Şekil 8.8'de gösterilmiştir. Denklem (6.42)'de verildiği gibi, $R_{\text{yük}} = R_{\text{pil}}$ durumunda pilin ürettiği güç maksimum değerine ulaşmaktadır.

$$P_{\text{Pil,max}} = 0,25 \cdot V_{\text{oc}} \cdot I_{\text{sc}} \quad (8.4)$$



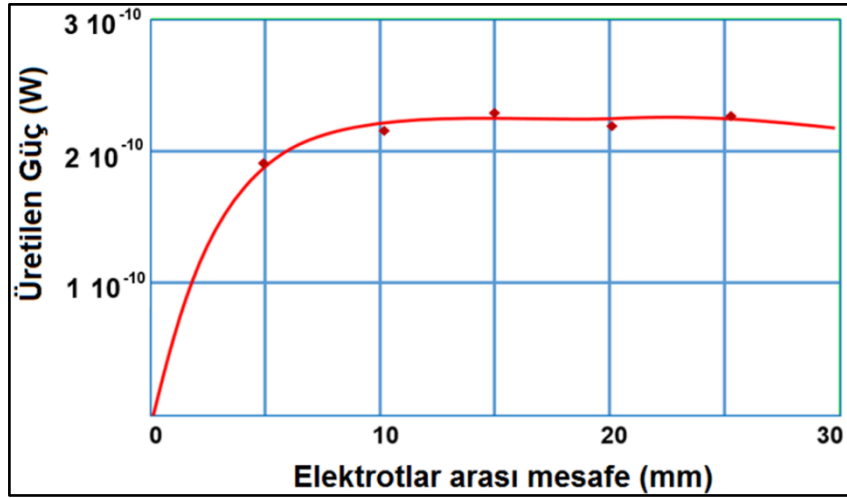
Şekil 8.8 2" çaplı elektrotlar arasında üretilen gücün mesafeye bağlılığı

Şekil 8.8’den görüldüğü gibi 2” (inç) çaplı dairesel elektrot için, yaklaşık 15 mm kolektör mesafesi civarında üretilen güç maksimum değerine ulaşmaktadır.

Elektriksel parametre ölçüm sonuçları kesim 9.2’de verilmiştir.

8.2 Doğrudan Şarjlı Nükleer Pil Çoklu Plaka Sistemi

Farklı elektrot mesafelerinde aynı ölçümler, nükleer pilde kullanılacak olan 3” çaplı, yüzeyi nikel ile kaplanmış paslanmaz çelik plaka sistemi ile yapılmış ve Şekil 8.9’ da verilen güç eğrisi elde edilmiştir.



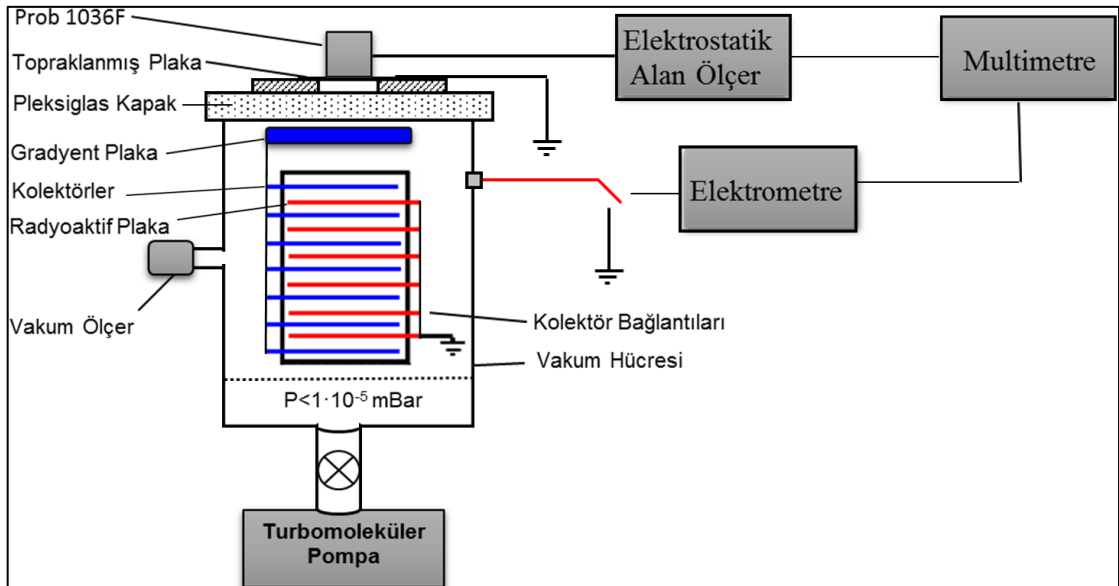
Şekil 8.9 3” çaplı elektrotlar arasında üretilen gücün mesafeye bağılılığı

Şekilden görüldüğü gibi maksimum güç 20 mm plaka aralığında oluşur. Grafik incelendiğinde 5 mm ve 20 mm kolektör mesafesi arasında ancak % 14 gibi düşük bir güç farkı olduğu görülmektedir. Bu nedenle, doğrudan şarjlı nükleer pil sisteminin hacmini küçültebilmek için çoklu plaka sisteminin plaka aralığı 5 mm olarak belirlenmiştir. Kurulum için Şekil 8.10’da verilen sabit 5 mm aralıklı wafer kutusu seçilmiş ve 3” çaplı, yüzeyi nikel kaplanmış olan çelik plakalar kutuya yerleştirilmiştir. Şekil 8.10’da verilen doğrudan şarjlı pil sisteminde, toplamda 25 adet plaka kullanılmıştır. En alttaki plaka, kolektörden başlamak üzere, sırasıyla kolektör-kaynak şeklinde dizilmiş ve her bir kolektörün arasına Pm-147 radyoizotopunun olduğu kaynak plakalar yerleştirilmiştir.



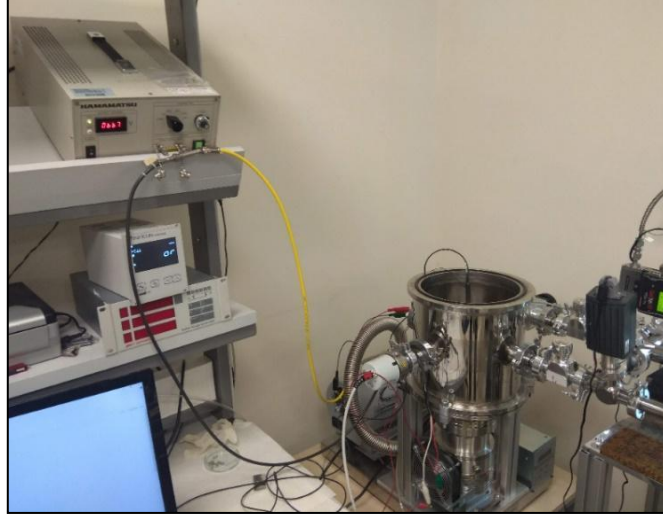
Şekil 8.10 DŞNP çok katmanlı metal plaka sistemi

Çoklu plaka sisteminin yerleştirileceği deney düzeneğinin tasarımı Şekil 8.11'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi deney, bir vakum hücresi içerisinde gerçekleştirilmiştir. Vakum ölçer bağlantısının yapılabilmesi için, hücrenin duvarına KF-40 çıkışları yaptırılmıştır. Benzer şekilde alınacak ölçümler için hücre duvarına konektörlü elektriksel bağlantılar da eklenmiştir. Hücrenin üst tarafına pleksiglas kapak yaptırılarak sistem vakuma alınabilir hale getirilmiştir. Vakum hücresinin alt kısmına CF girişine sahip turbomoleküler vakum pompa istasyonu yerleştirilmiş ve yapılan vakum sızdırmazlık testlerinde sistem, 1×10^{-5} mbar'dan daha iyi bir vakum seviyesine kadar getirilmiştir.



Şekil 8.11 DŞNP deney ve ölçüm sistemi

Vakum hücresi ve elektriksel bağlantıları içeren deneysel ölçüm sistemi Şekil 8.12’de gösterilmiştir. Şekildeki turbomoleküler vakum pompa istasyonu mekanik pompa ve turbomoleküler vakum pompasından oluşmaktadır. Yapılan testlerde, sistemin vakum düzeyi mekanik pompa ile 10^{-2} mbar seviyeye kadar düşürülmüş, daha sonra turbomoleküler vakum pompası açılarak, 10^{-6} mbar vakum seviyelerine kadar inilmiştir.

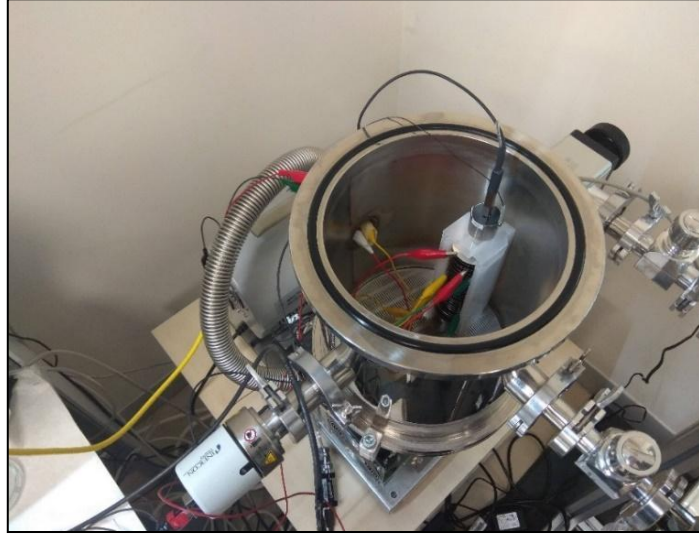


Şekil 8.12 Vakum hücresi ve elektriksel bağlantıları

Deney düzeneğinin kurulumu tamamlandıktan sonra, doğrudan şarjlı nükleer pil plaka düzeneği vakum hücresi içerisine yerleştirilmiş ve kolektör plakalar arasına seri bağlantı yapılmıştır. Alınacak elektriksel ölçümlerin için hücre içerisinde metal plakalara bağlı olan ölçüm kabloları, vakum hücresinin duvarına monte edilen konektörler yardımıyla hücre dışına taşınmıştır. Vakum hücresinin içi, doğrudan şarjlı nükleer pil plaka düzeneği ve bağlantıları Şekil 8.13’te verilmiştir.

Deney sistemde kaynak kaplı plakaların tümü birbirine seri bağlanarak topraklanmıştır. Benzer şekilde kolektörler de Şekil 8.11’de görüldüğü gibi seri olarak birbirine bağlanmıştır. Kaynak plakalardan yukarı ve aşağı yönde yayınlanan beta parçacıkları kolektörlere çarpar. Bu durumda kolektörlerde zamanla artan bir eksi voltaj akümüasyonu gerçekleşir. Plakada indüklenen toplam voltaj, şekilde verilen 1036F ve 257F probuna sahip elektrostatik alan/volt ölçer ile ölçülmüştür. Daha sonra Şekil 8.11’deki anahtar konumu cihazların

ölçüm noktasına getirilerek pilin şarj akımı ve plakada indüklenen toplam yük, elektrometre üzerinden okunmuştur.

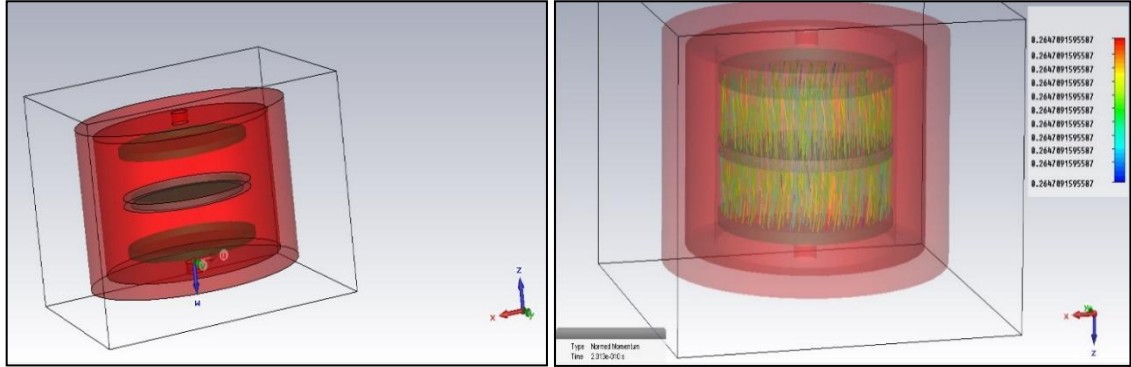


Şekil 8.13 Doğrudan şarjlı nükleer düzeneği ve elektriksel bağlantılar

8.3 Manyetik Alan Etkisi Simülasyonu

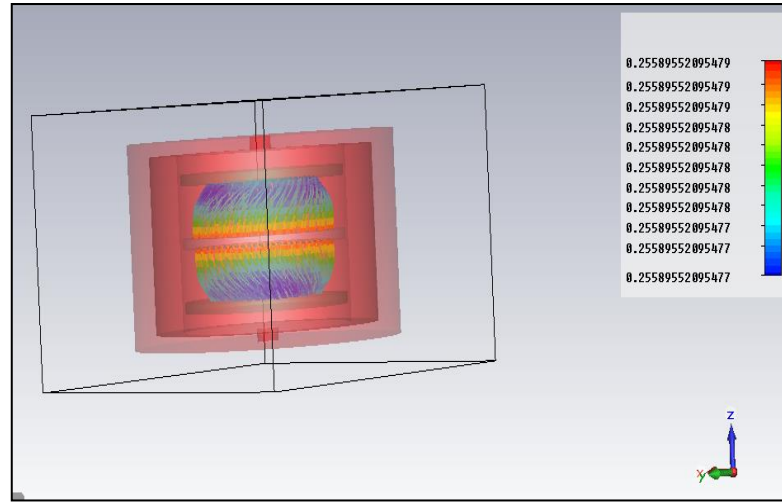
Şekil 8.10’da verilen çoklu plaka sisteminde, Şekil 8.7’de açıklandığı gibi, kaynaktan toplayıcı plaka arasındaki mesafe arttıkça kaynaktan yayınlanan beta parçacıklarının gördüğü katı açı artmakta ve bir kısmı karşı kolektöre çarpmadan, kolektörün kenarlardan dışarı doğru gitmektedir. Bu durum, sistemin yük kaybına neden olur. Bu etkiyi görebilmek için CST simülasyon yazılımında, Şekil 8.14’de verilen manyetik alan modellemesi yapılmıştır. Yapılan modellemede ortadaki kaynağın olduğu plaka, yüzey elektron kaynağı olarak tanımlanmış ve elektron enerjisi olarak, Pm-147 kaynağının ortalama beta enerjisi olan 62 keV değeri girilmiştir. Şekilde sağdaki resimde görüldüğü gibi kaynak plaka, yukarı ve aşağı yöndeki her açıda elektron salınımı yapmaktadır. Yapılan modelleme sonucunda aradaki mesafe arttıkça, kaynaktan yayınlanan elektronların bir kısmının sistemden dışarı çıktığı görülmüştür. Bu kaybı önlemek için, plakaların etrafına sarılmış ve kaynaktan yayınlanan elektronları plakalar arasında kalmaya zorlayan bir solenoid modellenerek, oluşan manyetik alanın etkisi incelenmiştir. Bilindiği gibi solenoidin oluşturduğu manyetik alan, plakalar arasında ve z-ekseni boyuncadır. Oluşturduğu manyetik kuvvet ise plakanın merkezine doğrudur. Bu

nedenle solenoidden yeterli miktarda akım geçirildiğinde oluşan manyetik kuvvet, elektronların sistemin dışına çıkmasına izin vermeyecektir.



Şekil 8.14 Üst ve altta toplayıcı plaka, ortada elektron kaynağının olduğu doğrudan şarjlı nükleer pil sistemi modeli

Yapılan modelleme Şekil 8.15'de gösterilmiştir. Modelleme sonucuna göre 33 mT gibi düşük bir manyetik alan, yüksek enerjili elektronları plakalar arasında tutmak için yeterlidir.

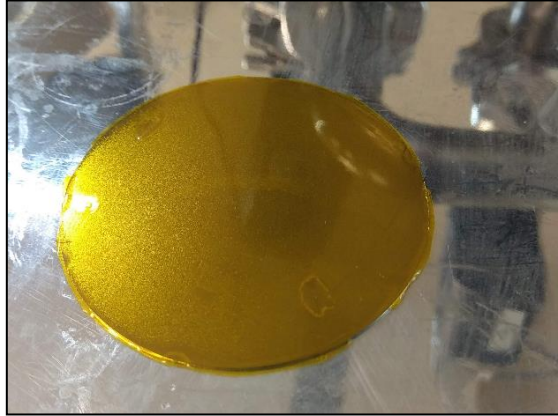


Şekil 8.15 Plakaya sarılmış solenoidin oluşturduğu manyetik alanın plakalar arasındaki elektron yörüngesi üzerindeki etkisi

8.4 Dielektrik Film Kaplanması

Kesim 6.2'de bahsedildiği gibi, kaynaktan çıkan yüksek enerjili beta parçacıklarının kolektöre çarpması sonucunda meydana gelen geri saçılma etkisi ve metalde oluşan düşük enerjili ikincil elektronlar, doğrudan şarjlı nükleer pilin kendi akımını zıt yönde bastırarak toplam şarj akımını azaltmaktadır. Zira

kaynaktan kolektöre çarpan beta parçacıkları burada oldukça fazla sayıda ikincil elektron oluşumuna sebep olmakta ve üstteki kolektör zaman geçtikçe daha fazla negatif olarak yüklenmektedir. Bu durum kaynağın olduğu plaka ve metal kolektör arasında kendiliğinden oluşan ve gittikçe artan, beta akımına zıt bir elektrik alan meydana getirir. Bunun sonucu olarak kaynaktan gelen beta parçacıklarının kolektördeki yük akümüasyonu belirli bir süre sonra imkânsız hale gelir. Bu etki, trityum gibi düşük enerjili beta kaynaklarında fazla iken, Pm-147 gibi yüksek beta enerjisine sahip kaynaklarda düşüktür. Literatürde yapılan çalışmalarda bu etkiyi azaltabilmek için Şekil 6.28 ve Tablo 6.6' da verilen çeşitli polimer malzemeler denenmiştir. Mevcut tez araştırmasında gerek kolay temin edilebilirliği, gerekse verim açısından dielektrik malzeme olarak polimid film temin edilmiş ve Şekil 8.16'da gösterildiği gibi metal kolektör üzerine ince film şeklinde yapıştırılmıştır.



Şekil 8.16 Metal kolektör üzerine kaplanmış polimid film

6. bölümde bahsedildiği gibi, alüminyumdan yapılan kolektör üzerindeki polimid film, 5.7 keV'lik H-3 beta parçacık enerjisi için ikincil elektron verimini 0,5'ten 0,17'ye düşürürken, 62 keV'lik Pm-147 beta parçacık enerjisi için bu değeri, 0.06'dan 0.03'e kadar düşürür. Görüldüğü gibi Pm-147'nin beta enerjisi yüksek olduğundan dolayı, ikincil elektronların verim üzerindeki negatif etkisi çok daha düşüktür. Ancak atom numarası yüksek olan metallerde ikincil elektron verimi ve geri saçılma, alüminyum ile karşılaştırıldığında daha büyüktür. Tez çalışmasında, nikel kaplanmış paslanmaz çelik plaka sistemi kullanıldığından dolayı polimid kaplama büyük bir avantaj sağlamaktadır.

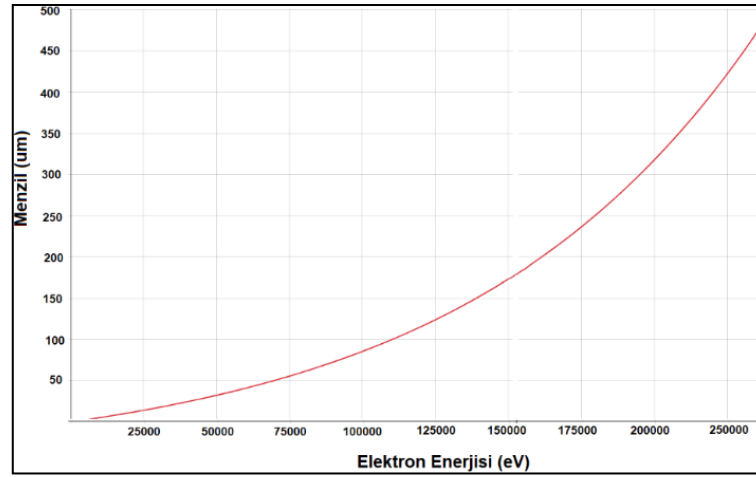
Ortalama 62 keV enerjiye sahip Pm-147 beta parçacıklarının polimid film içinde ne kadar ilerlediği, denklem (2.14) ile verilen Katz-Penfold yarı deneysel formül kullanılarak hesaplanmıştır. $0.01 \leq E \leq 2.5$ MeV enerji aralığı için bu denklem,

$$R = \frac{0.412}{\rho} E_{\beta}^{1.265-0.0954 \ln(E_{\beta})} \quad (8.5)$$

şeklinde yazılmıştır. Polimid malzemenin yoğunluğu 1.54 g/cm^3 olarak alındığında,

$$R = \frac{0.412}{1.54} E_{\beta}^{1.265-0.0954 \ln(E_{\beta})} = 0.267 E_{\beta}^{1.265-0.0954 \ln(E_{\beta})} \quad (8.6)$$

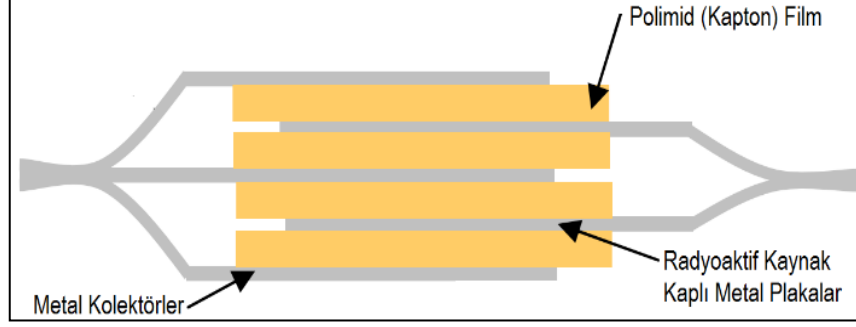
denklemini elde edilmiştir. Denklemin grafiği Şekil 8.17’de verilmiştir.



Şekil 8.17 Beta parçacıklarının polimid film içindeki

Denkleminde Pm-147’nin 62 keV ortalama beta enerjisi kullanıldığında, polimid içindeki menzili yaklaşık $38 \mu\text{m}$ olarak elde edilir. Diğer bir ifadeyle $38 \mu\text{m}$ polimid film, elektron spektrumunu 62 keV oranında soğurmaktadır. Böylece 62 keV ve altındaki tüm elektron enerji spektrumu kaybolmaktadır. Bu da toplam beta spektrumunu %70 oranında azaltır. Bu kayıp gözönüne alınarak ikincil elektron ve geri saçılma etkisini azaltmak için optimum polimid film kalınlığının $0.3-0.4 \mu\text{m}$ olması gerektiği belirlenmiştir. Ancak piyasadan en ince $25 \mu\text{m}$ kalınlığında polimid film temin edilebilmiştir. Denklem (8.6)’ya göre bu kalınlıkta 49 keV ve altındaki beta spektrumu kaybolur.

Yapılan çalışmada son olarak, şekil 8.10'da verilen plaka düzeneğindeki tüm metal kolektörler, şekil 8.16'da gösterilen şekilde polimid film ile kaplanmıştır. Polimid kaplamalı kollektörden oluşan promethium-147 doğrudan şarjlı nükleer pil modeli şekil 8.18'deki gibi üretilip elektriksel ölçümler alınmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçları Bölüm 9.2'de verilmiştir.

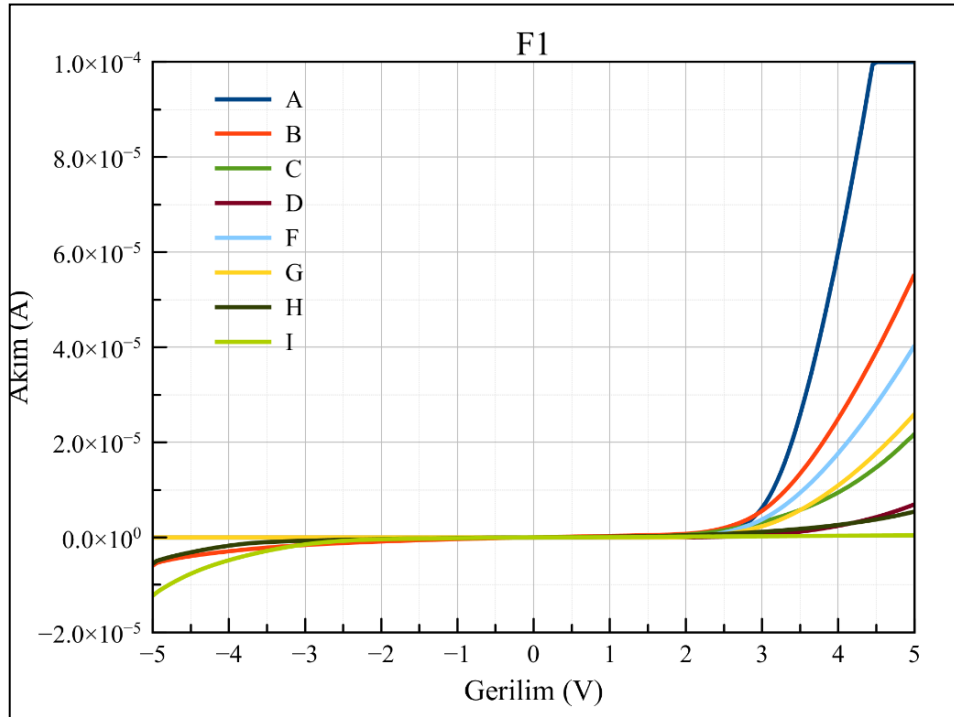


şekil 8.18 Polimid filmlerin metal kolektörler ile birleştirilmesi

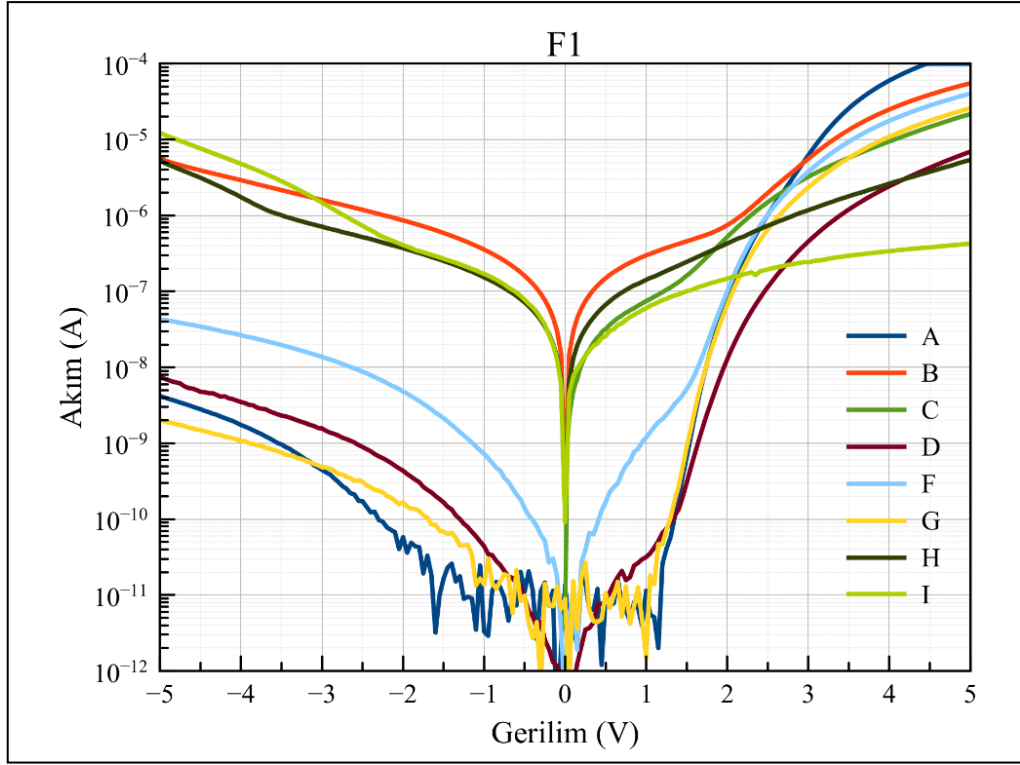
9.1 Betavoltaik Nükleer Pil Ölçüm Sonuçları

7. Bölümde geliştirilen betavoltaik nükleer pilin kesim 7.2’de anlatıldığı gibi karakteristik akım-voltaj ölçümleri bilgisayar kontrollü olarak yapılmıştır. Farklı her bir aygıt üzerinde yapılan karanlık akım, foto-akım ve betavoltaik akım ölçümlerine ait I-V grafikleri aşağıda verilmiştir.

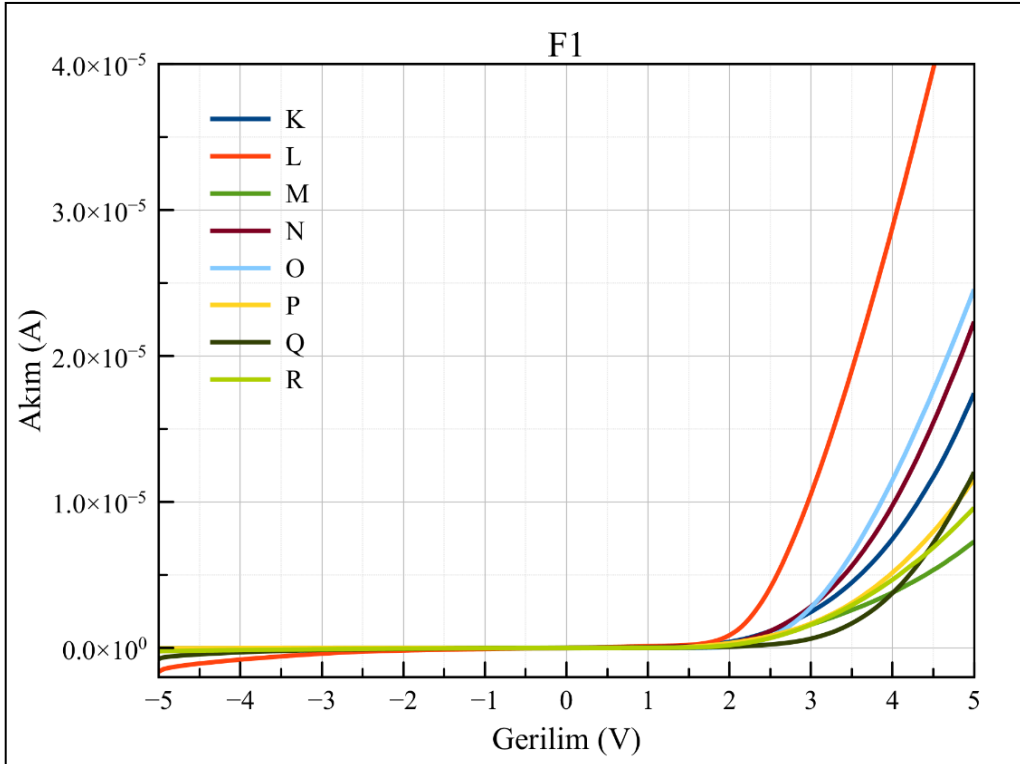
9.1.1 Karanlık Akım Ölçüm Sonuçları



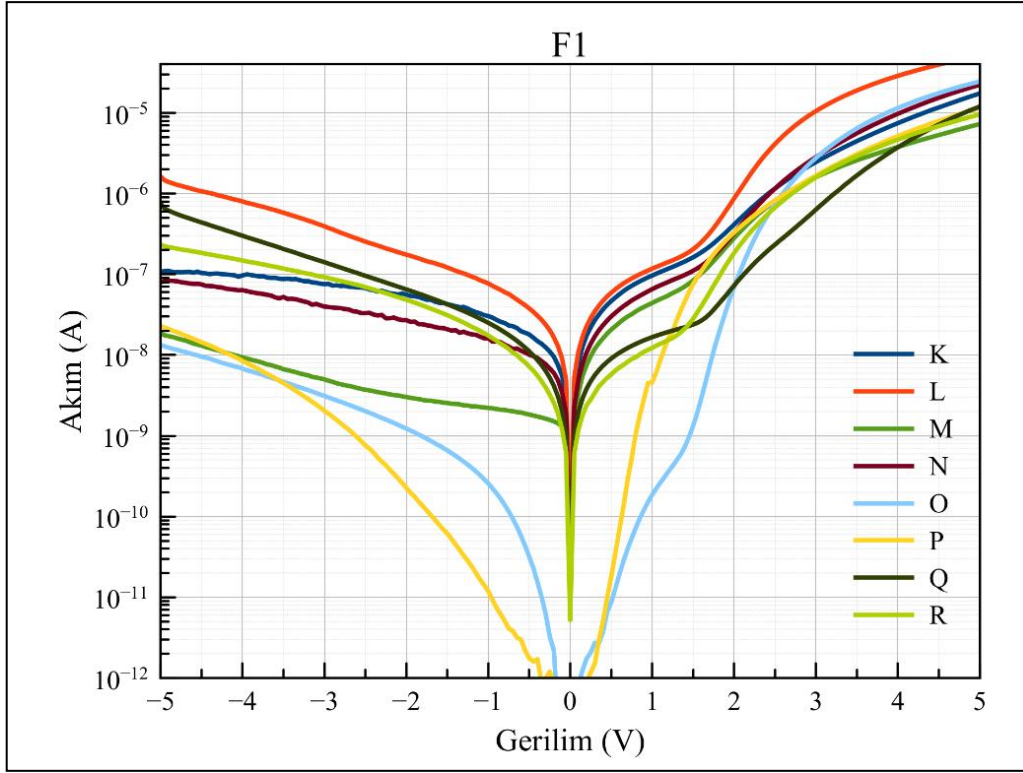
Şekil 9.1 F1 soldaki aygıtların karanlık akım ölçümleri



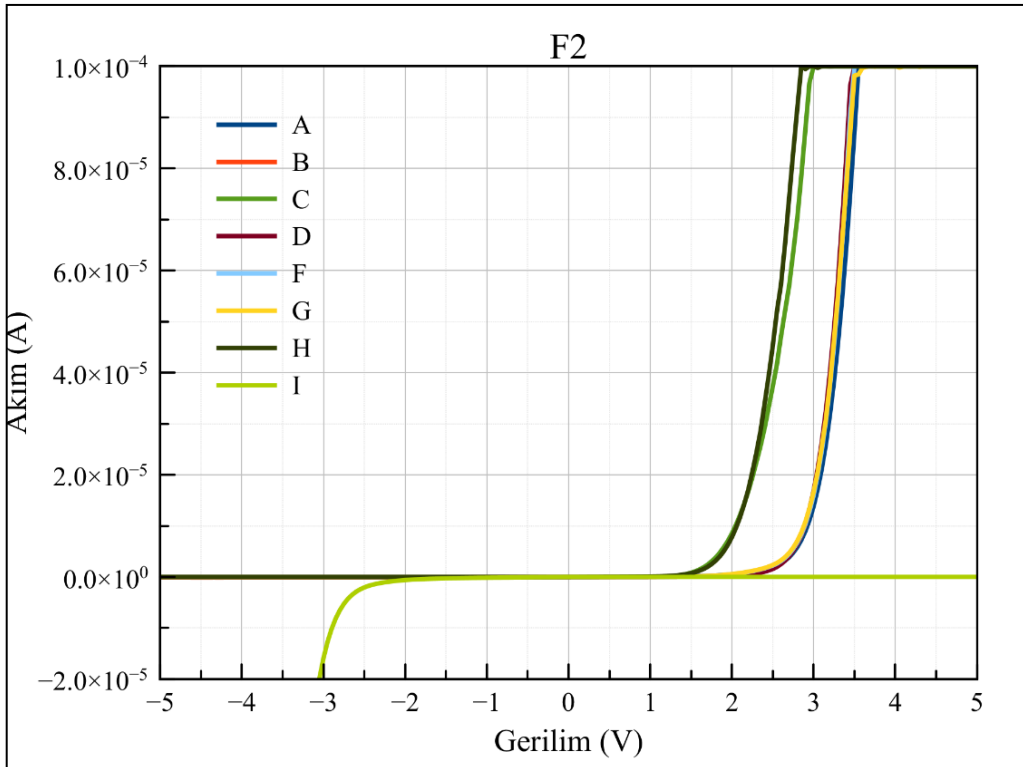
Şekil 9.2 F1 soldaki aygıtların karanlık akım ölçümleri (log)



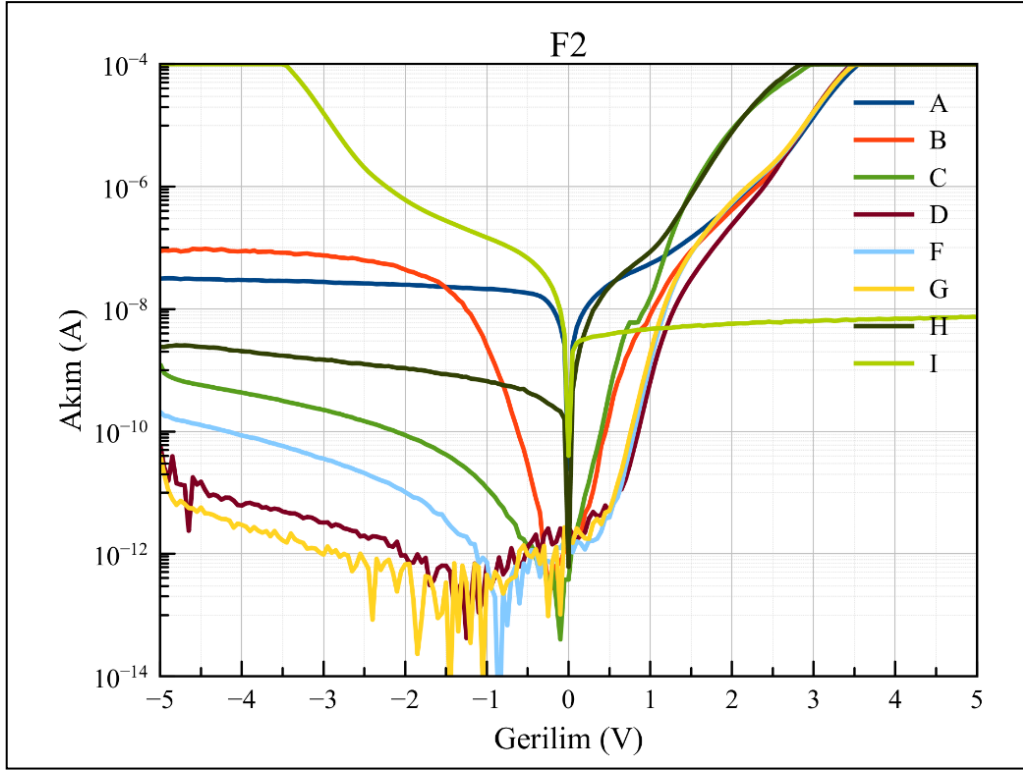
Şekil 9.3 F1 sağdaki aygıtların karanlık akım ölçümleri



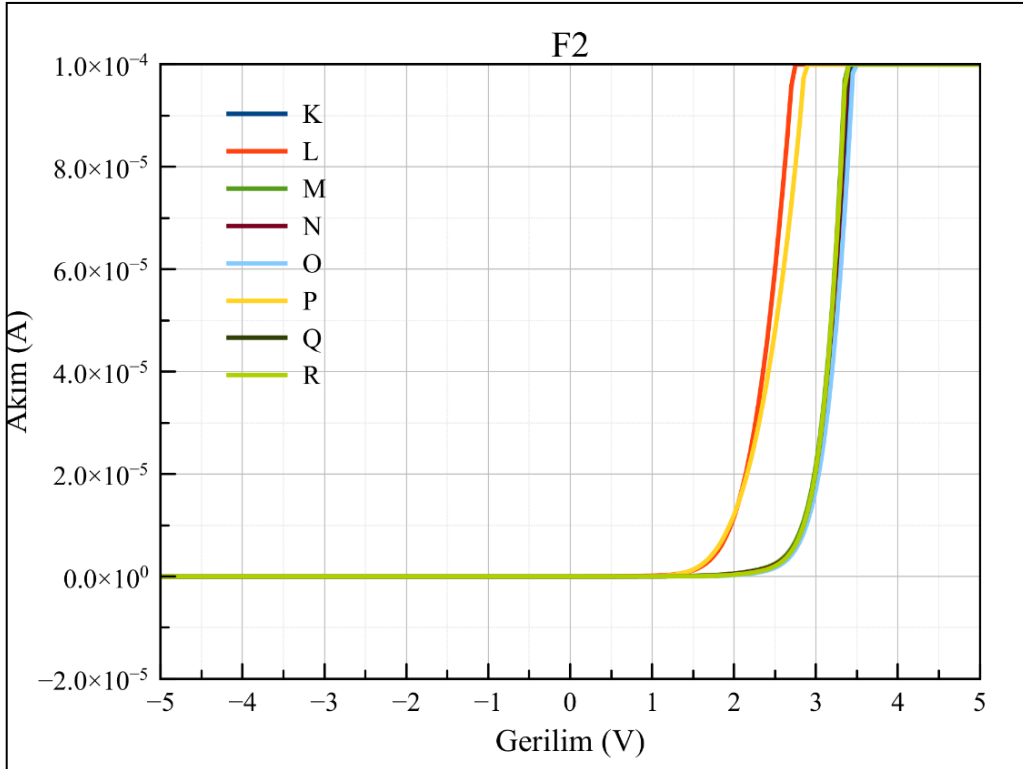
Şekil 9.4 F1 sağdaki aygıtların karanlık akım ölçümleri (log)



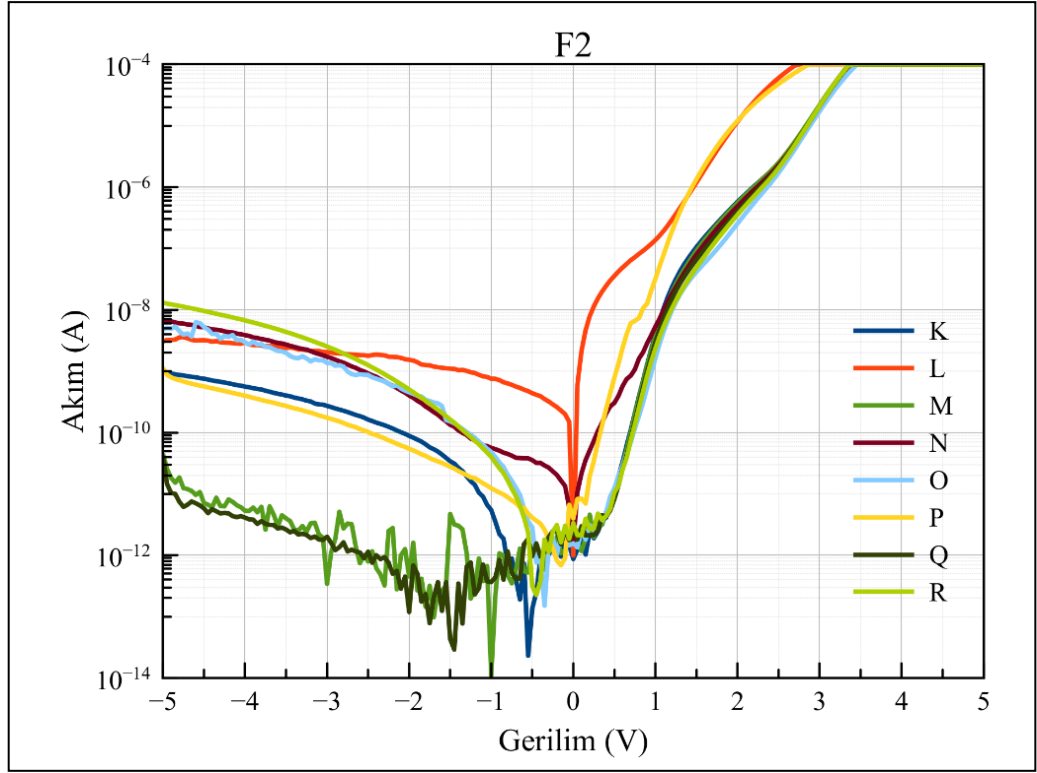
Şekil 9.5 F2 soldaki aygıtların karanlık akım ölçümleri



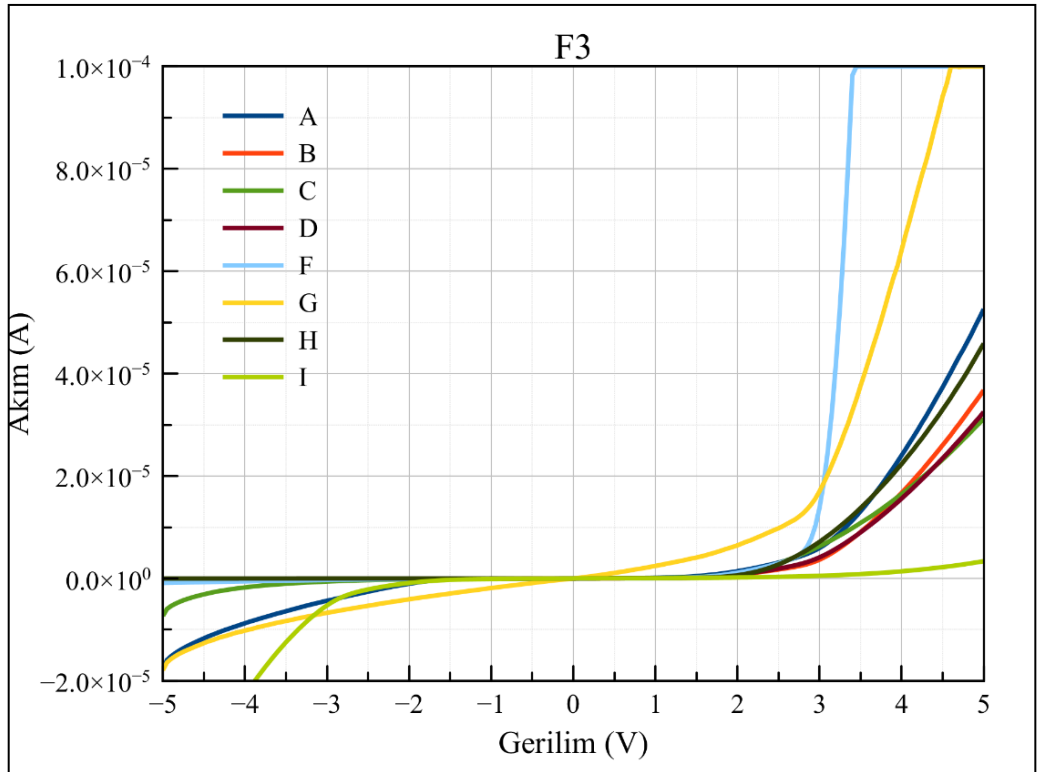
Şekil 9.6 F2 soldaki aygıtların karanlık akım ölçümleri (log)



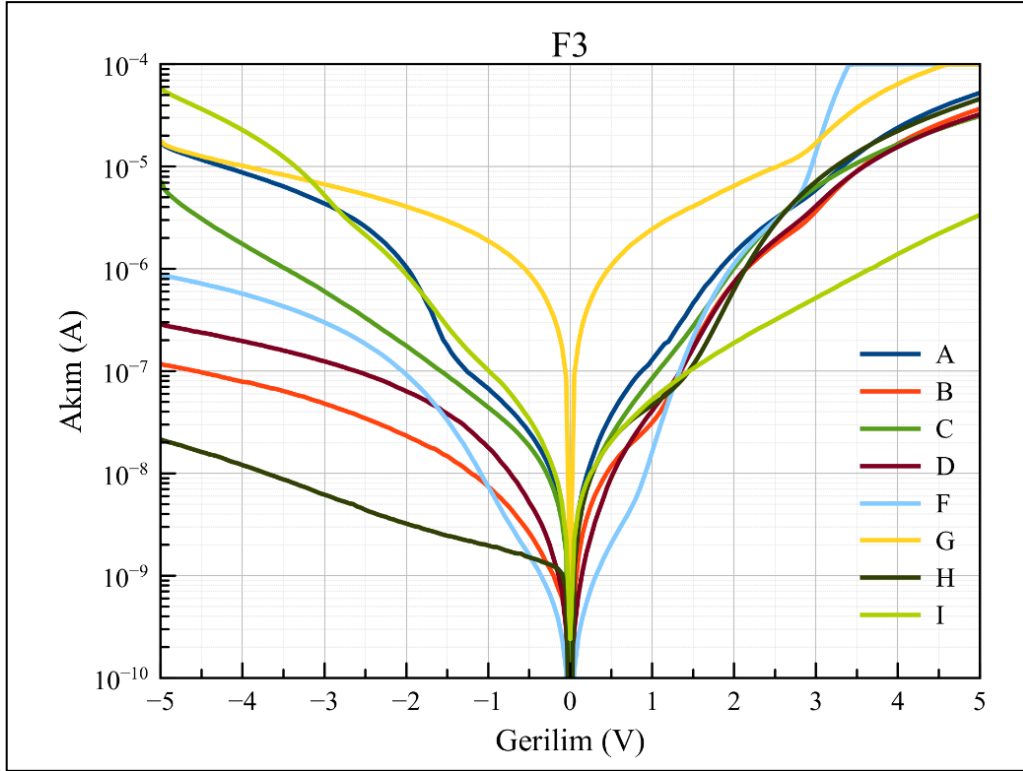
Şekil 9.7 F2 sağdaki aygıtların karanlık akım ölçümleri



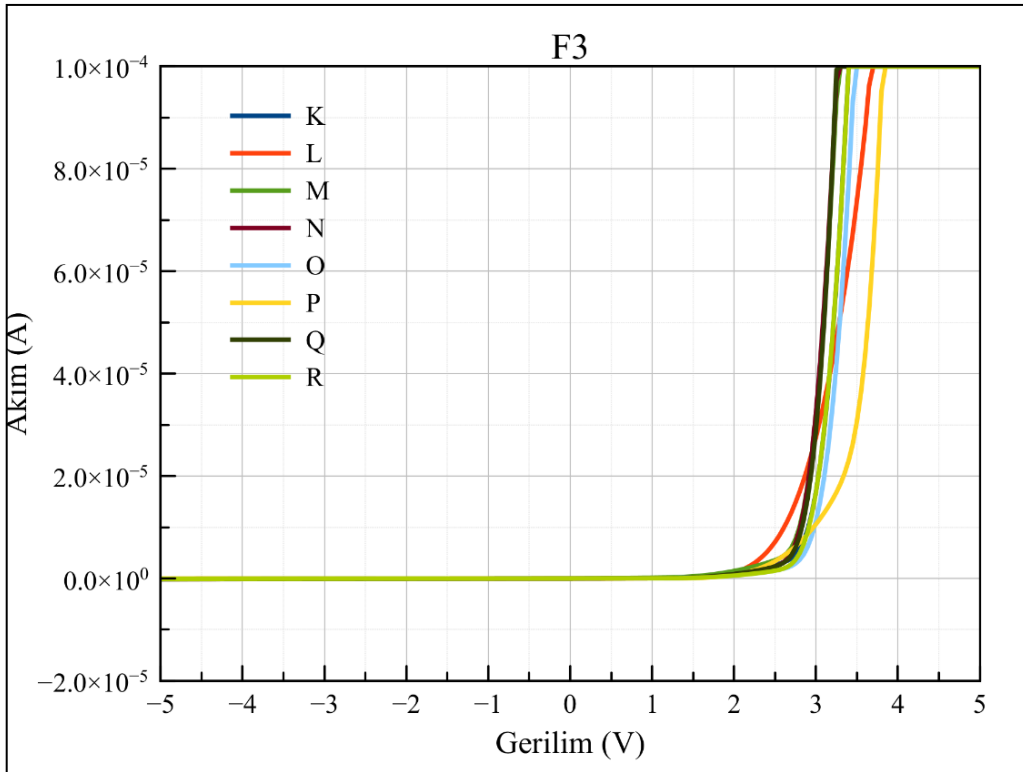
Şekil 9.8 F2 sağdaki aygıtların karanlık akım ölçümleri (log)



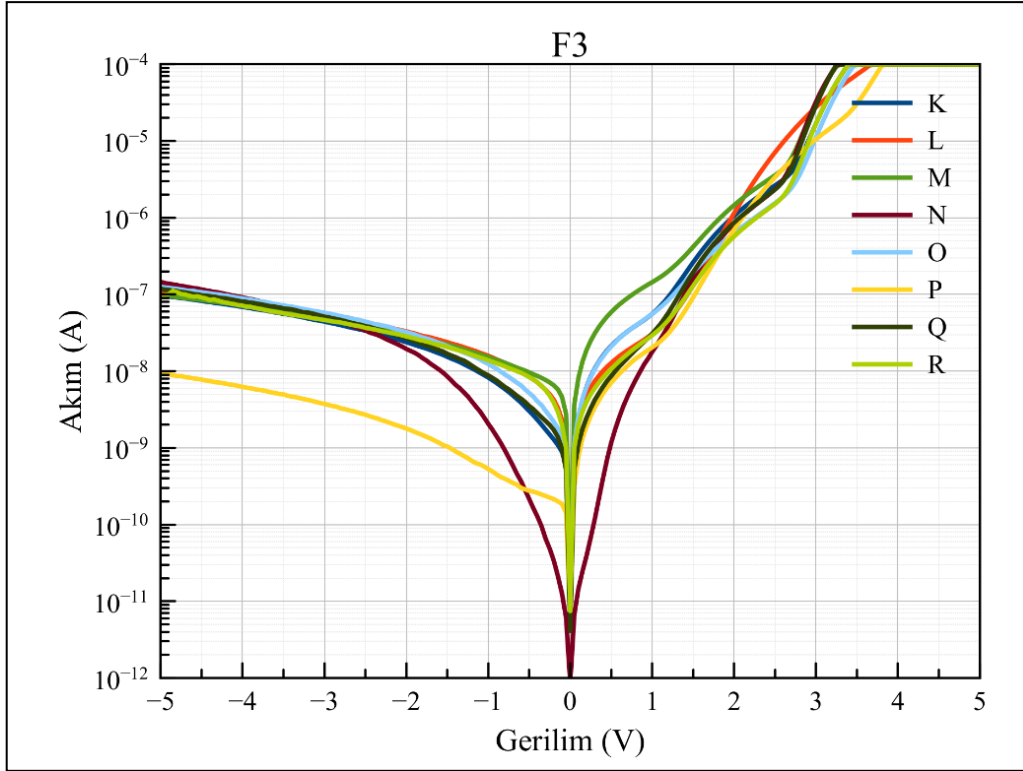
Şekil 9.9 F3 soldaki aygıtların karanlık akım ölçümleri



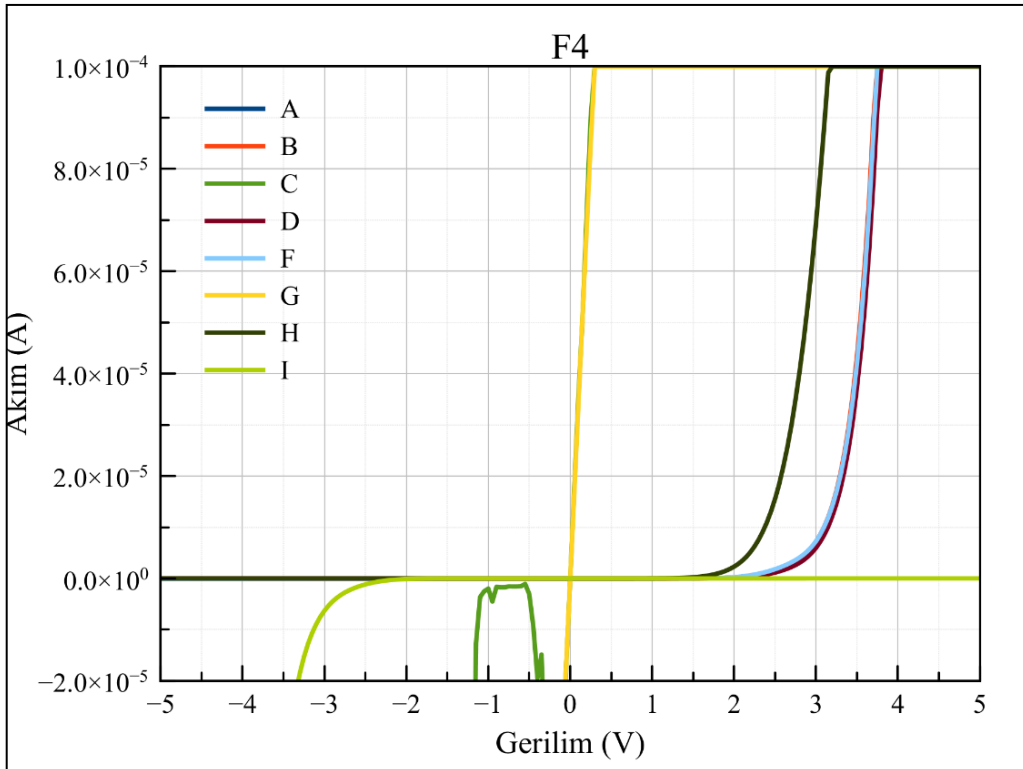
Şekil 9.10 F3 soldaki aygıtların karanlık akım ölçümleri (log)



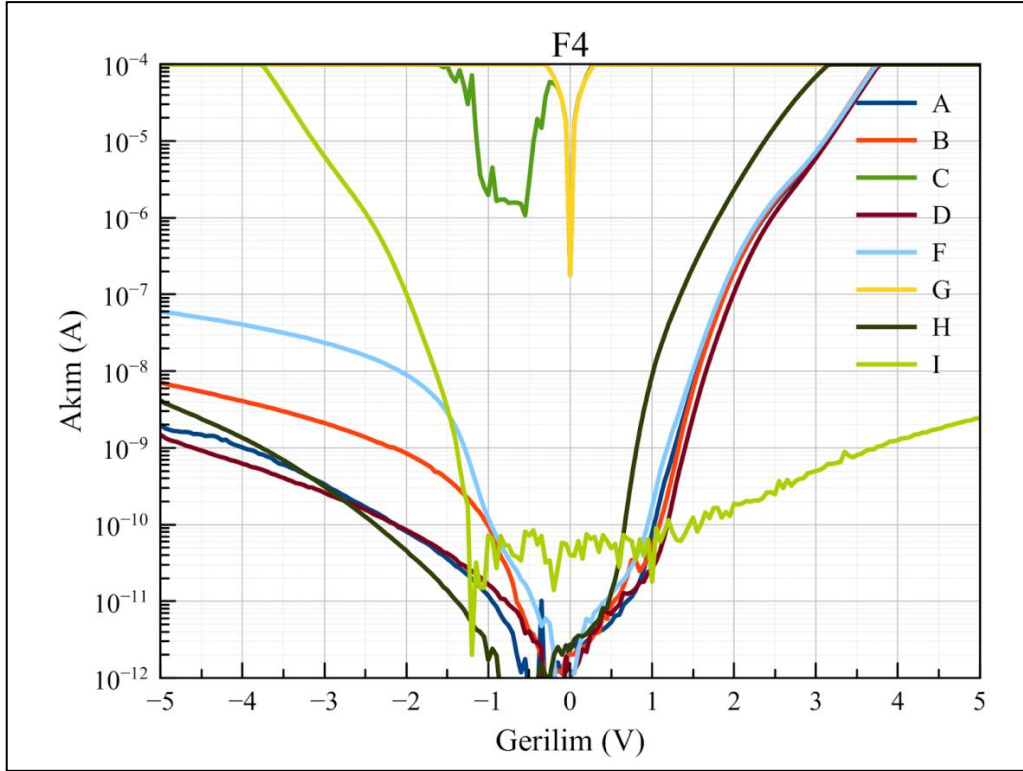
Şekil 9.11 F3 sağdaki aygıtların karanlık akım ölçümleri



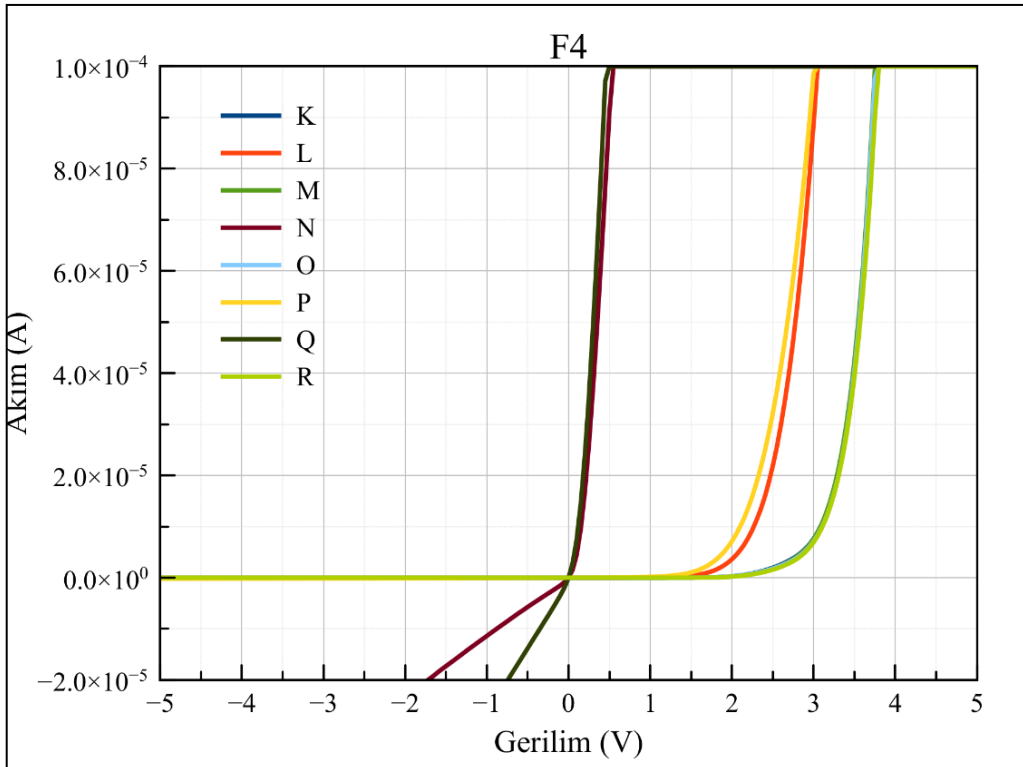
Şekil 9.12 F3 sağdaki aygıtların karanlık akım ölçümleri (log)



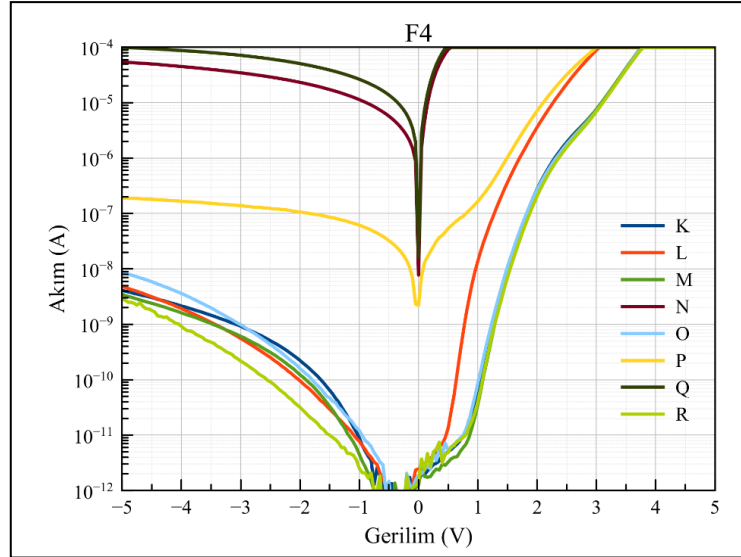
Şekil 9.13 F4 soldaki aygıtların karanlık akım ölçümleri



Şekil 9.14 F4 soldaki aygıtların karanlık akım ölçümleri (log)



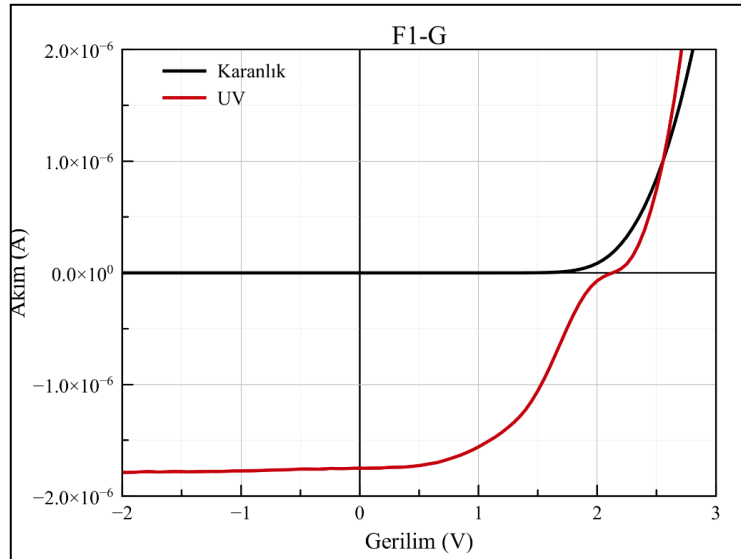
Şekil 9.15 F4 sağdaki aygıtların karanlık akım ölçümleri



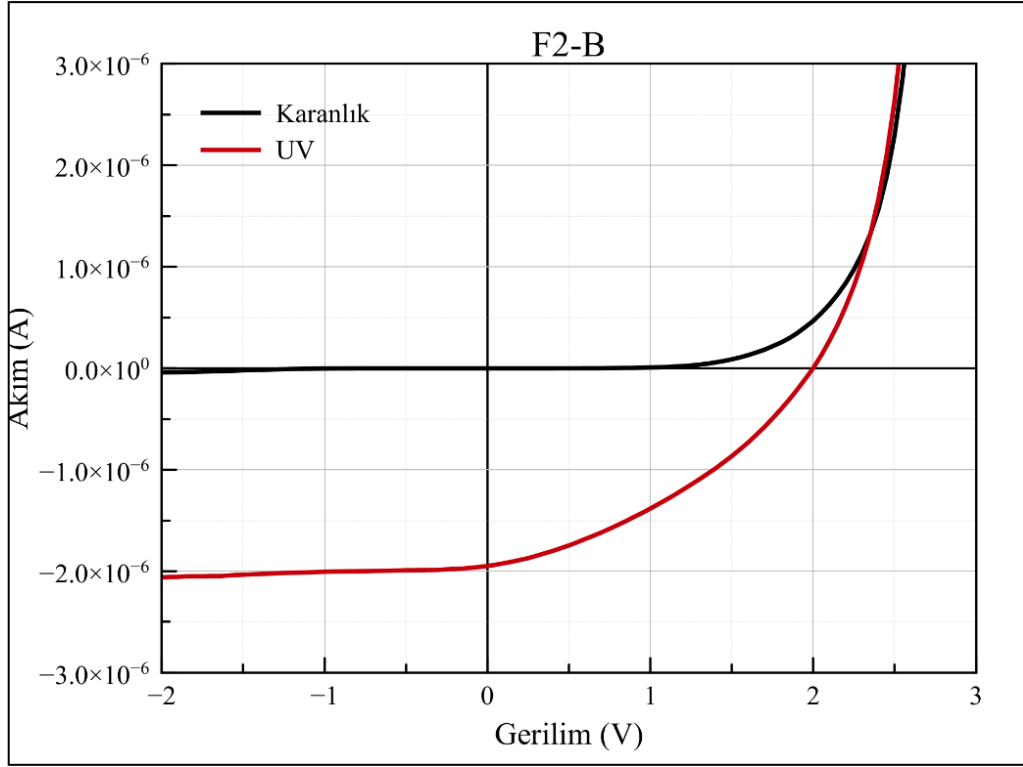
Şekil 9.16 F4 sağdaki aygıtların karanlık akım ölçümleri (log)

9.1.2 Foto Akım Ölçüm Sonuçları

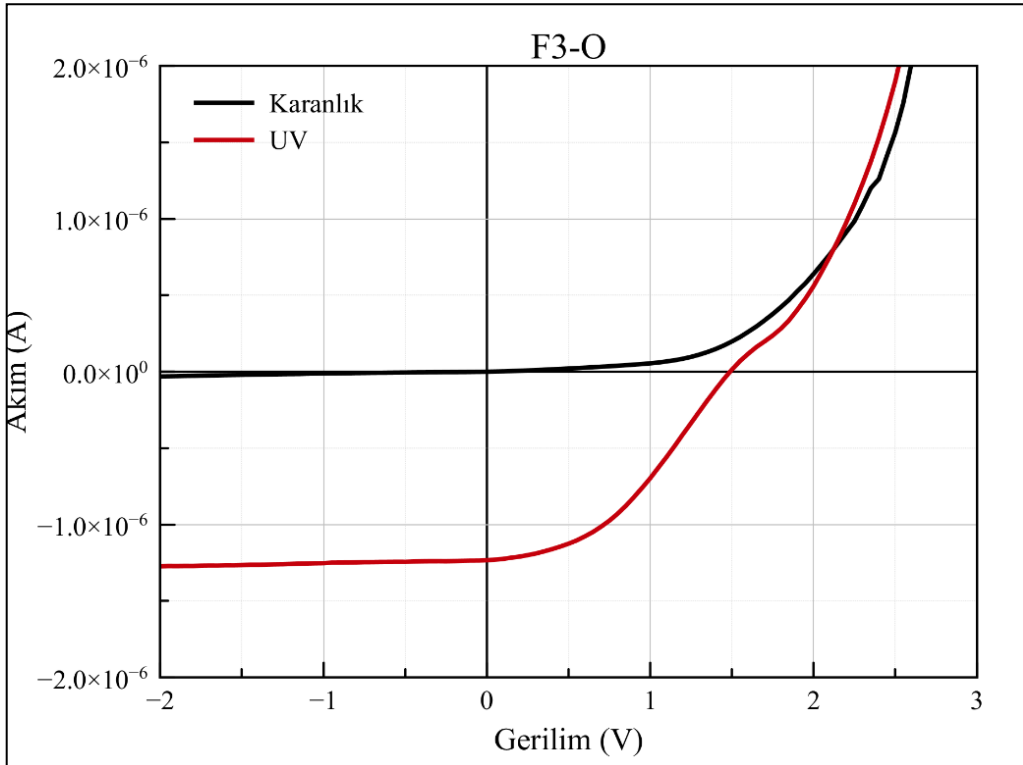
Karanlık akımlar ölçüldükten sonra, UV ışık altında aygıtların tepkisellikleri kalitatif olarak ölçülmüştür. UV ışık kaynağı sabitlenmediği için grafikteki fotoakımlarda dalgalanma görülmektedir ve aygıtlar üzerine düşen ışık miktarı her ölçümde aynı değildir. Ancak Şekil 9.17, Şekil 9.18, Şekil 9.19, Şekil 9.20 ve Şekil 9.23'te, yaklaşık 2 V açık devre gerilimi (V_{oc}) ve 1 μA seviyelerinde kısa devre akımı (I_{sc}) görülmektedir.



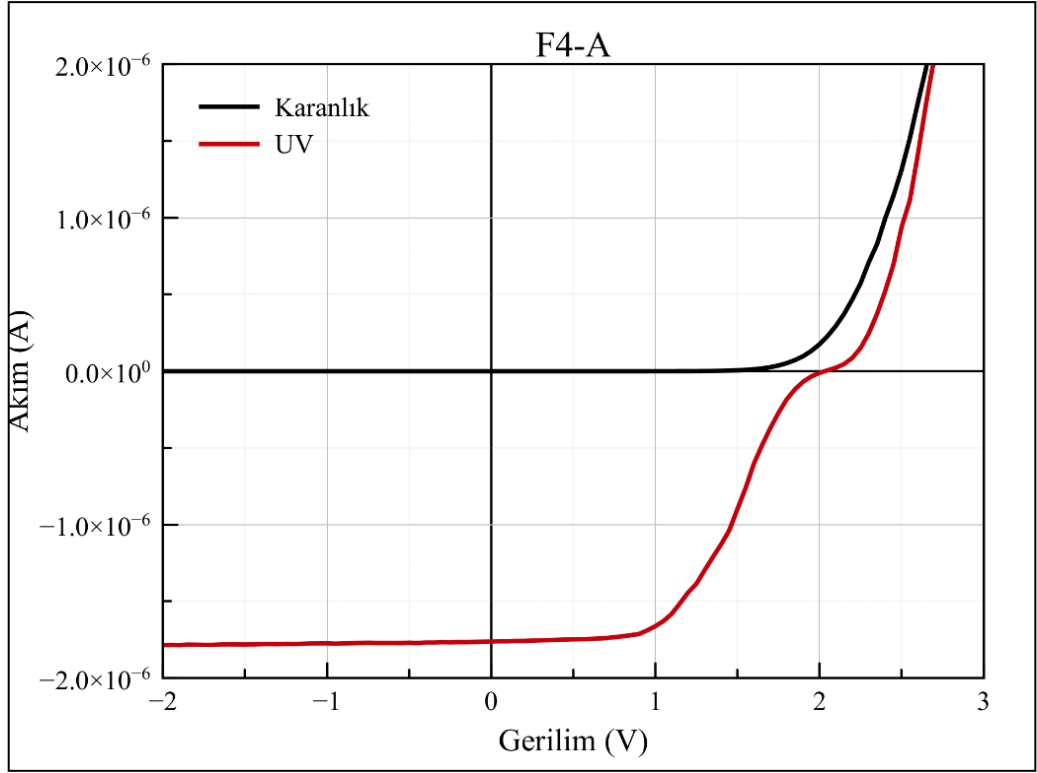
Şekil 9.17 F1-G aygıtı karanlık akım ve fotoakım



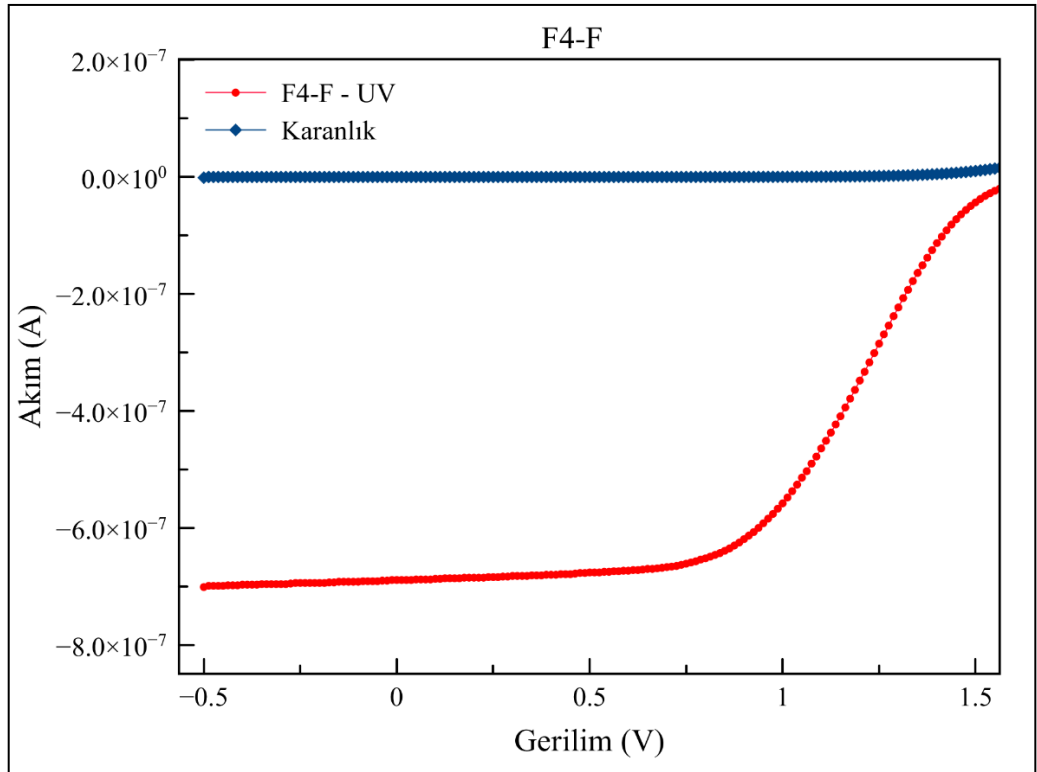
Şekil 9.18 F2-B aygıtı karanlık akım ve fotoakım



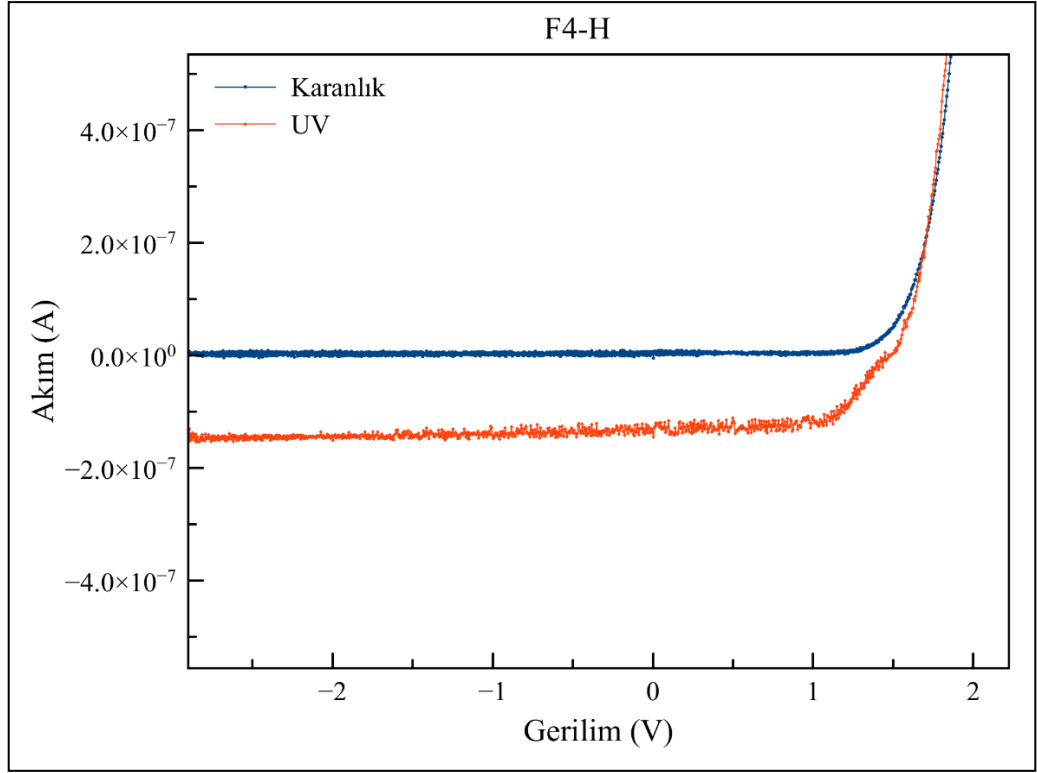
Şekil 9.19 F3-O aygıtı karanlık akım ve fotoakım



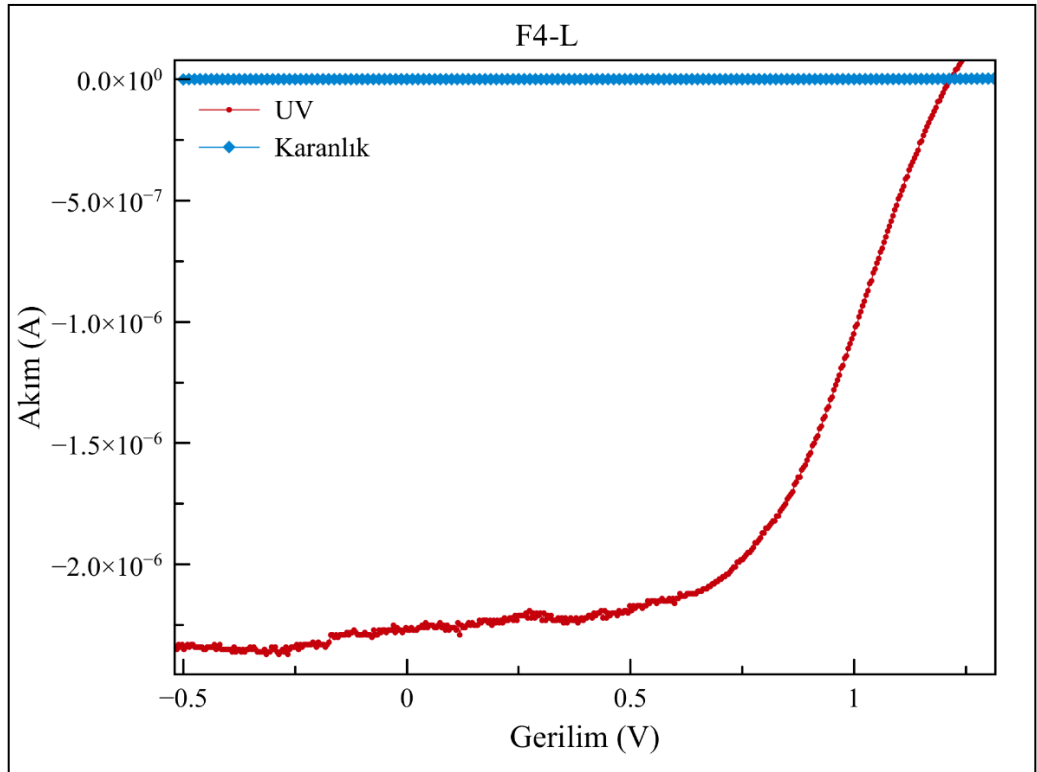
Şekil 9.20 F4-A aygıtı karanlık akım ve fotoakım



Şekil 9.21 F4-F aygıtı karanlık akım ve fotoakım



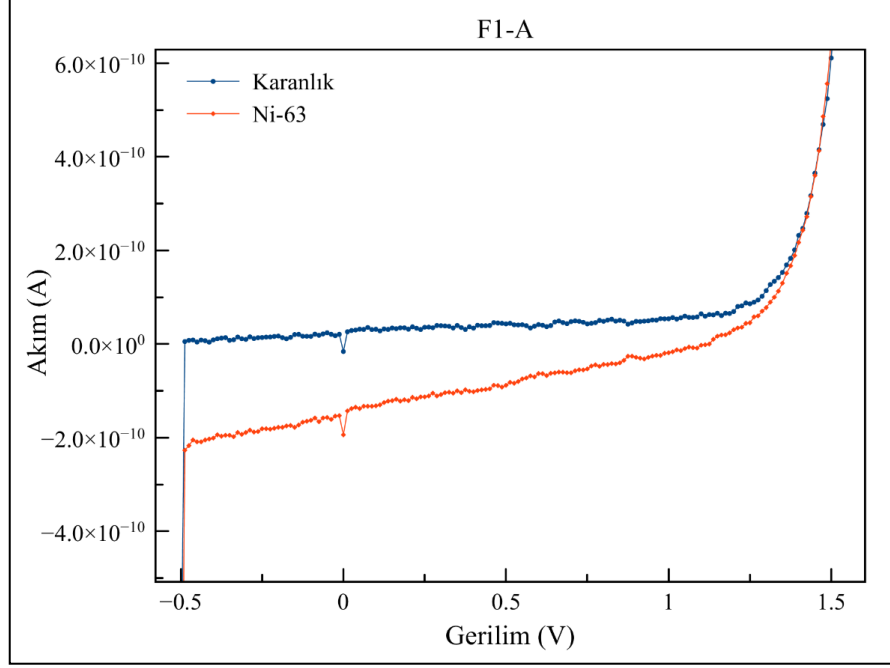
Şekil 9.22 F4-H aygıtı karanlık akım ve fotoakım



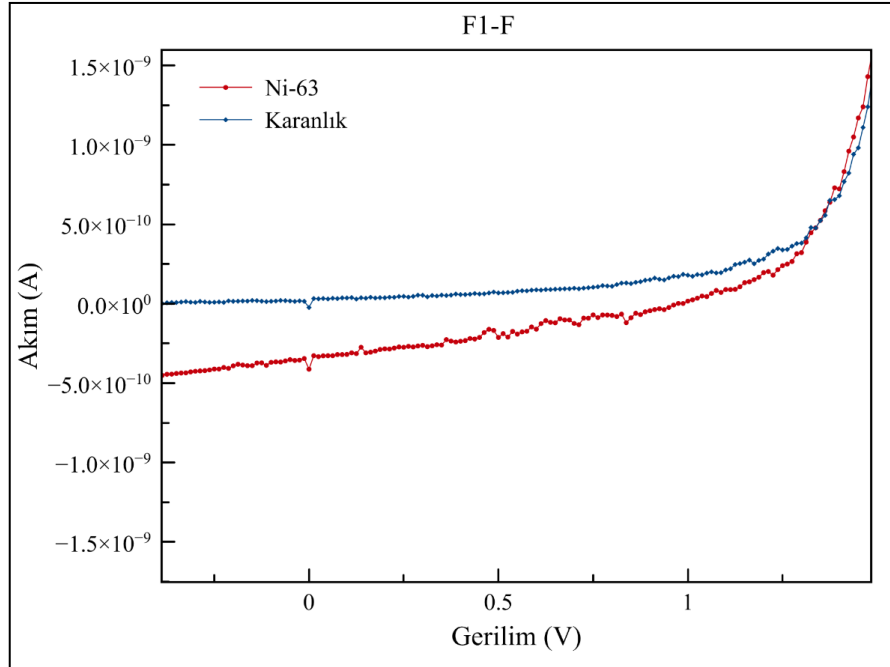
Şekil 9.23 F4-L aygıtı karanlık akım ve fotoakım

9.1.3 Betavoltaik Akım Ölçüm Sonuçları

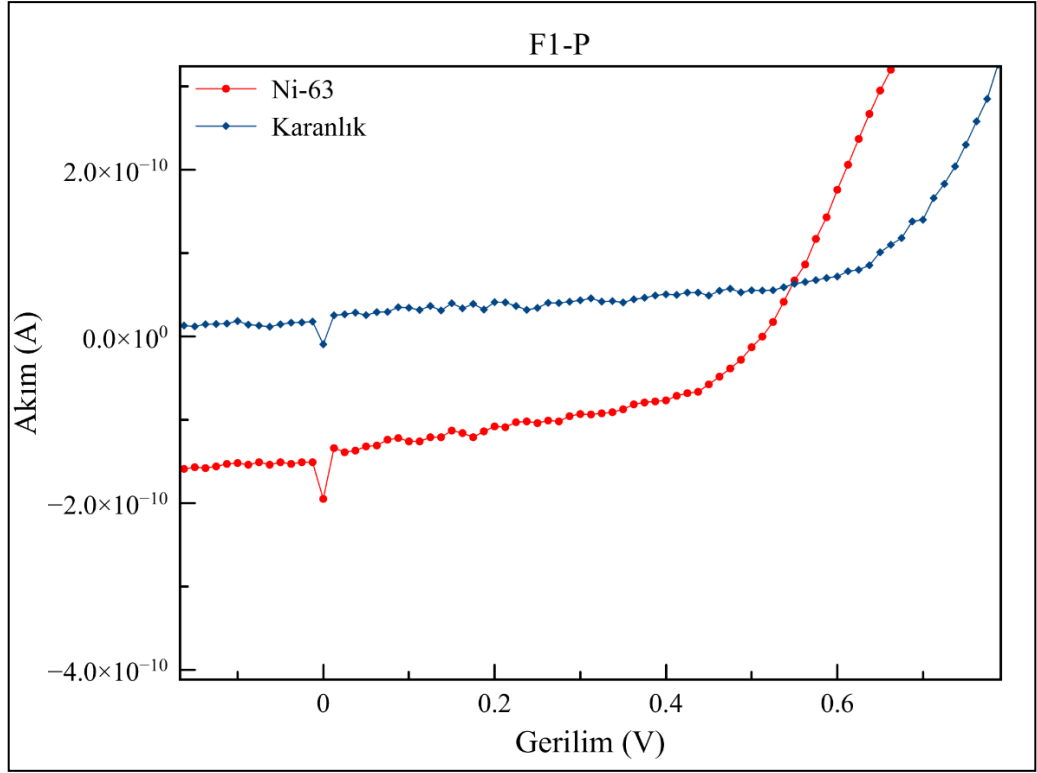
Yarı iletkenlere Ni-63 yerleştirilerek alınan betavoltaik I-V ölçümleri aşağıda verilmiştir.



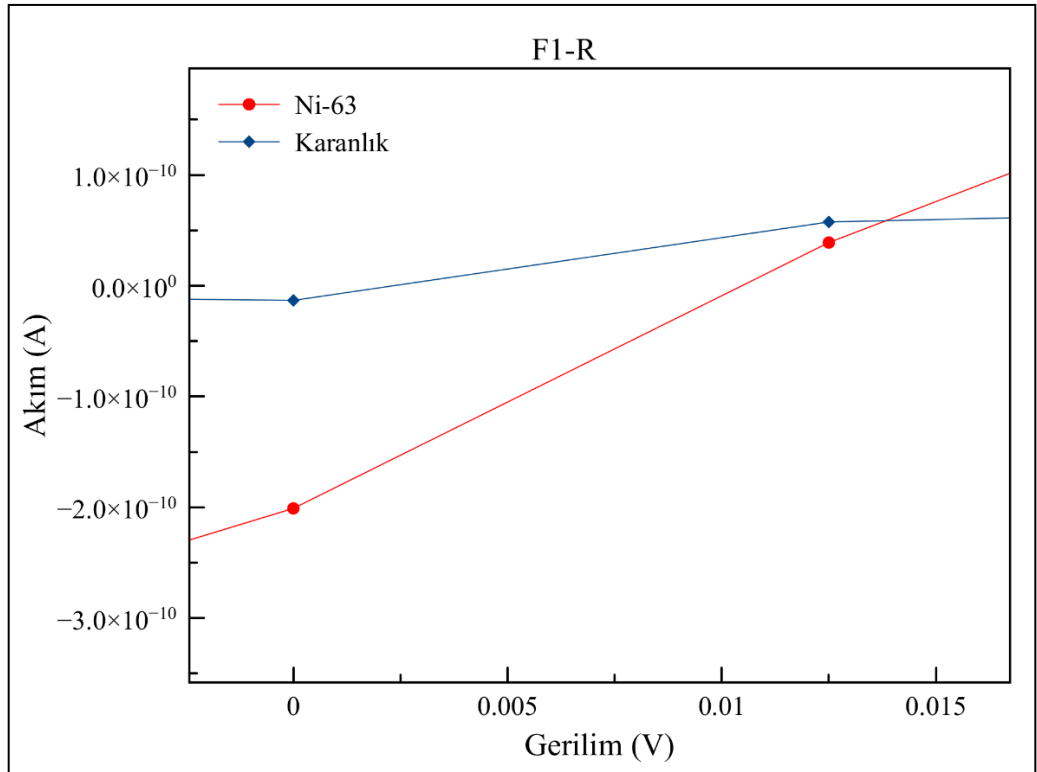
Şekil 9.24 F1-A aygıtı karanlık akım ve betavoltaik akım



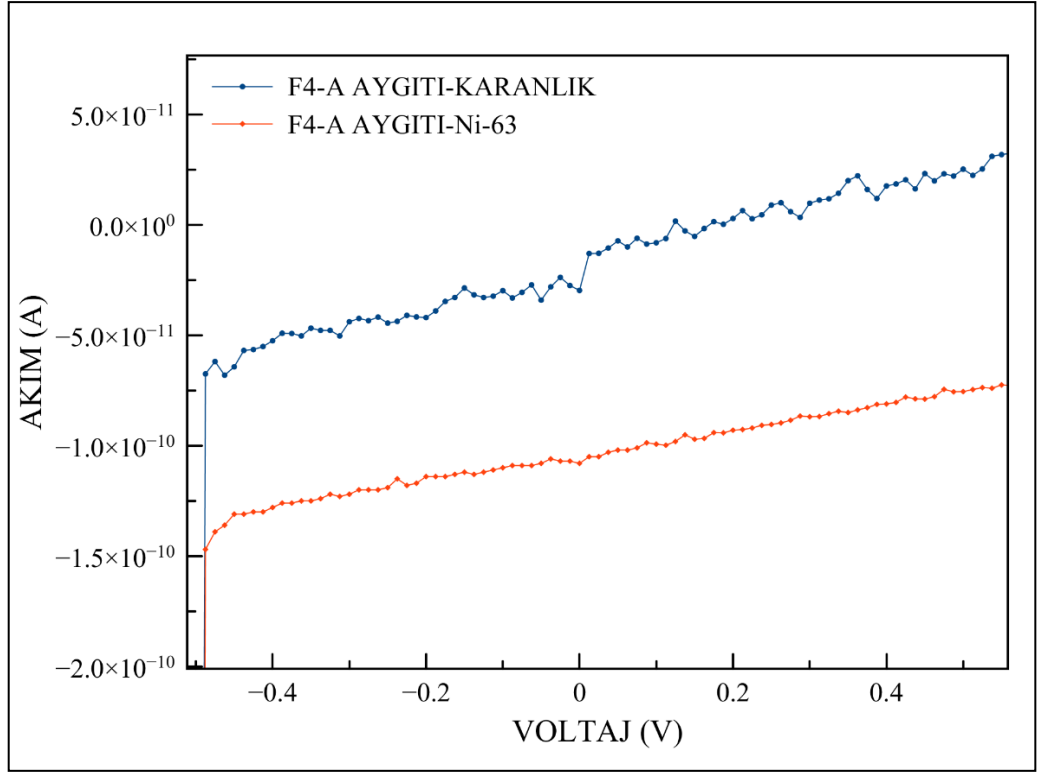
Şekil 9.25 F1-F aygıtı karanlık akım ve betavoltaik akım



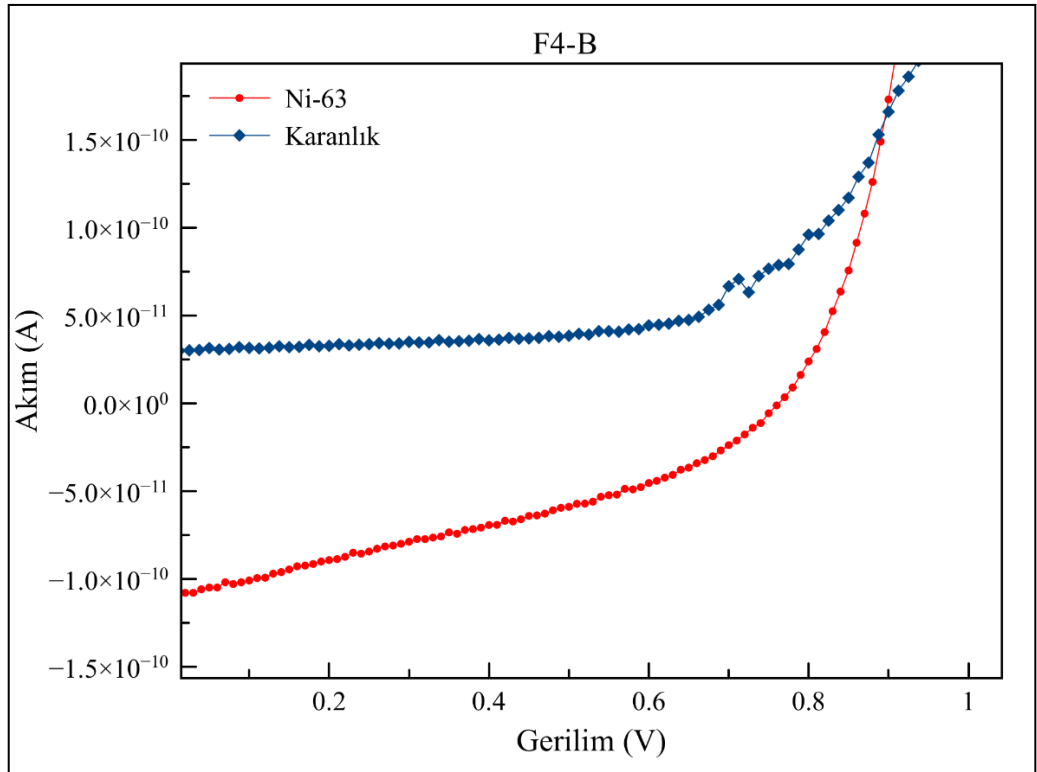
Şekil 9.26 F1-P aygıtı karanlık akım ve betavoltaik akım



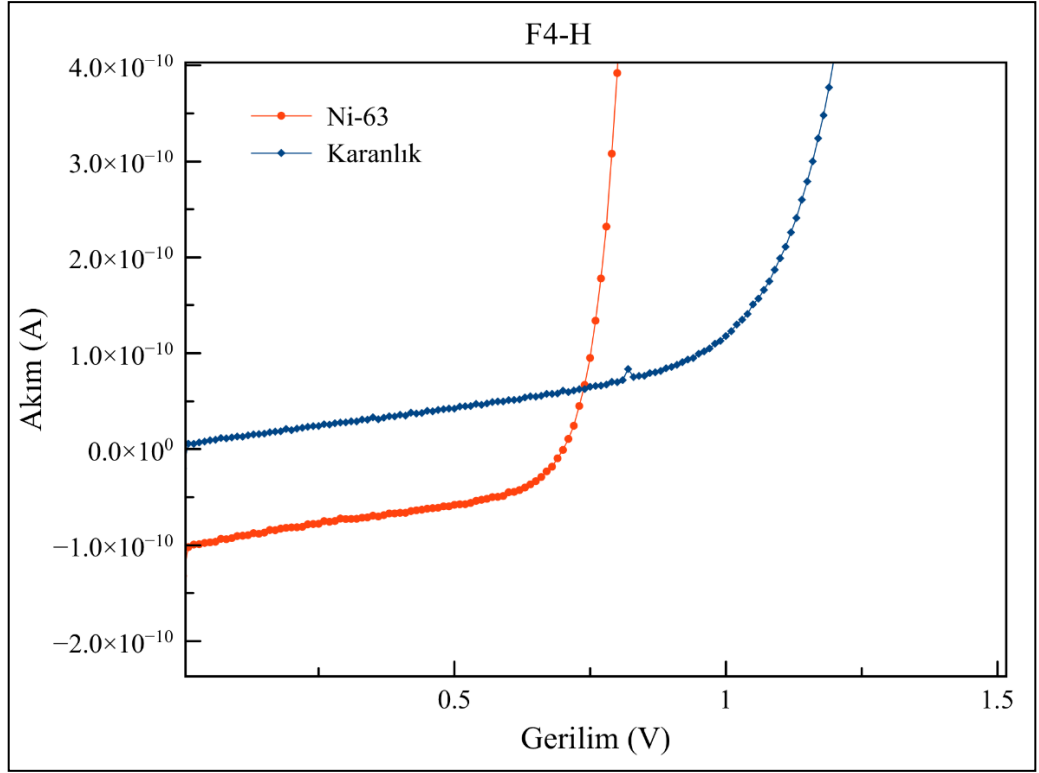
Şekil 9.27 F1-R aygıtı karanlık akım ve betavoltaik akım



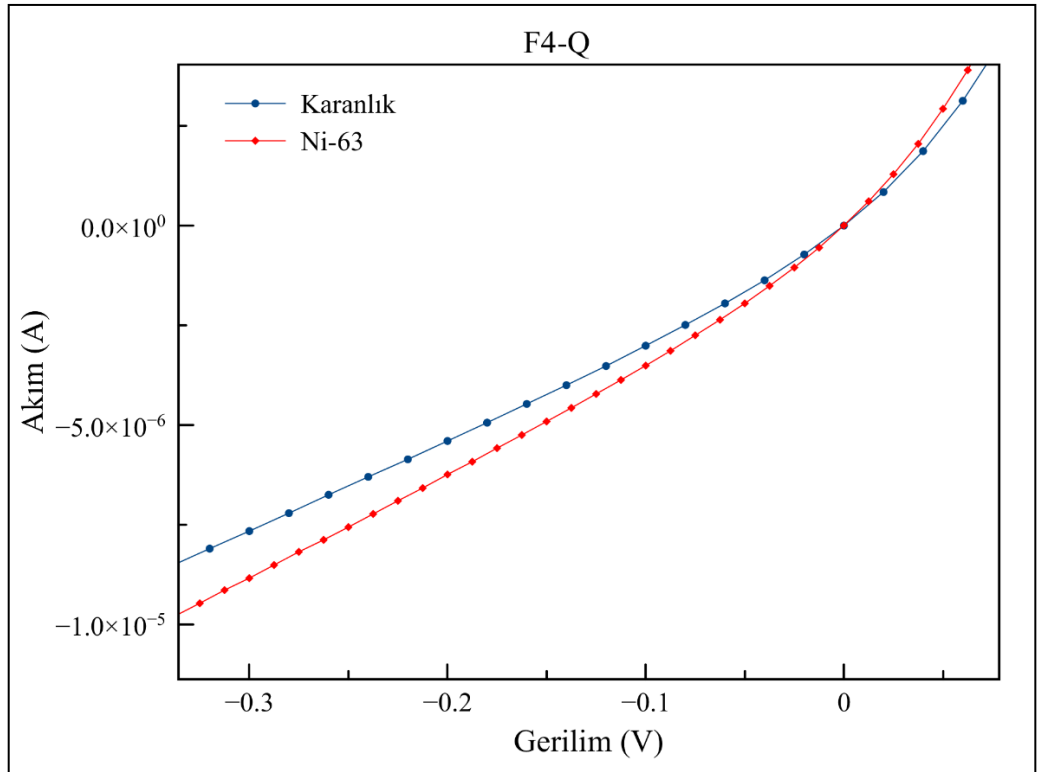
Şekil 9.28 F4-A aygıtı karanlık akım ve betavoltaik akım



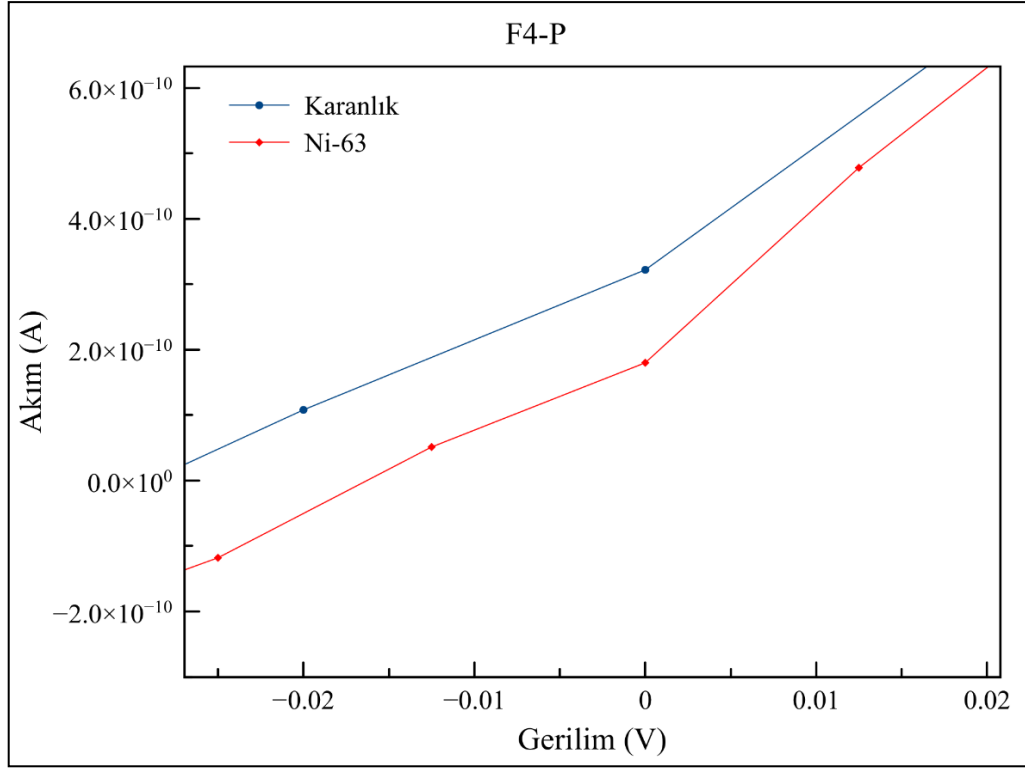
Şekil 9.29 F4-B aygıtı karanlık akım ve betavoltaik akım



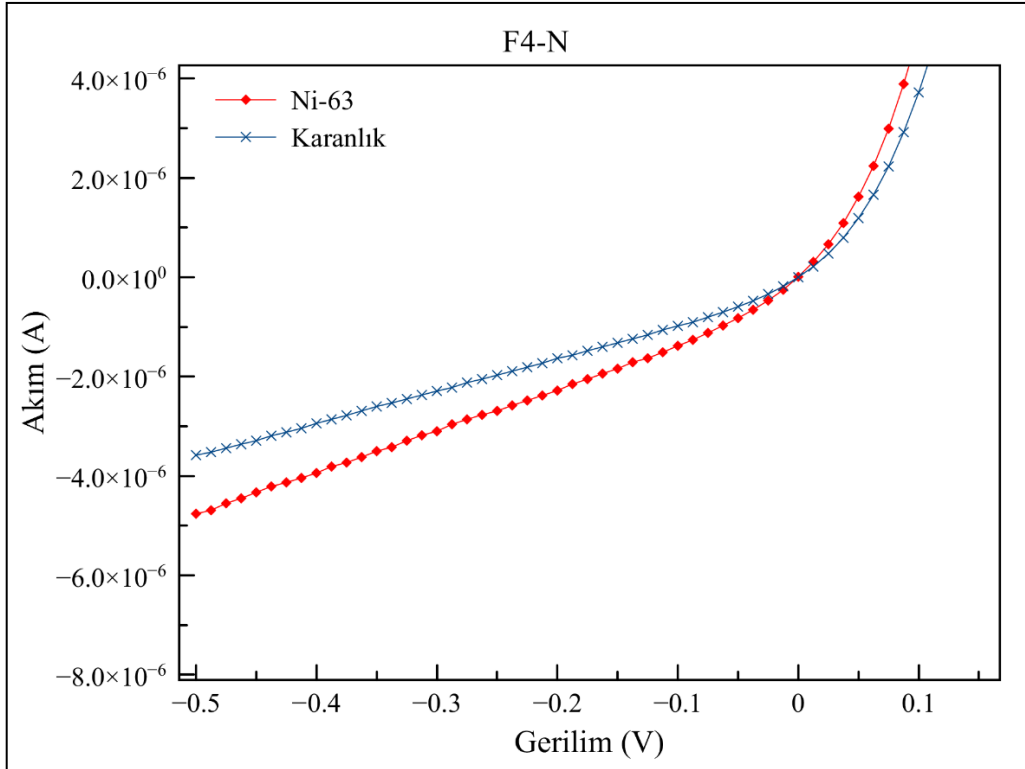
Şekil 9.30 F4-H aygıtı karanlık akım ve betavoltaik akım



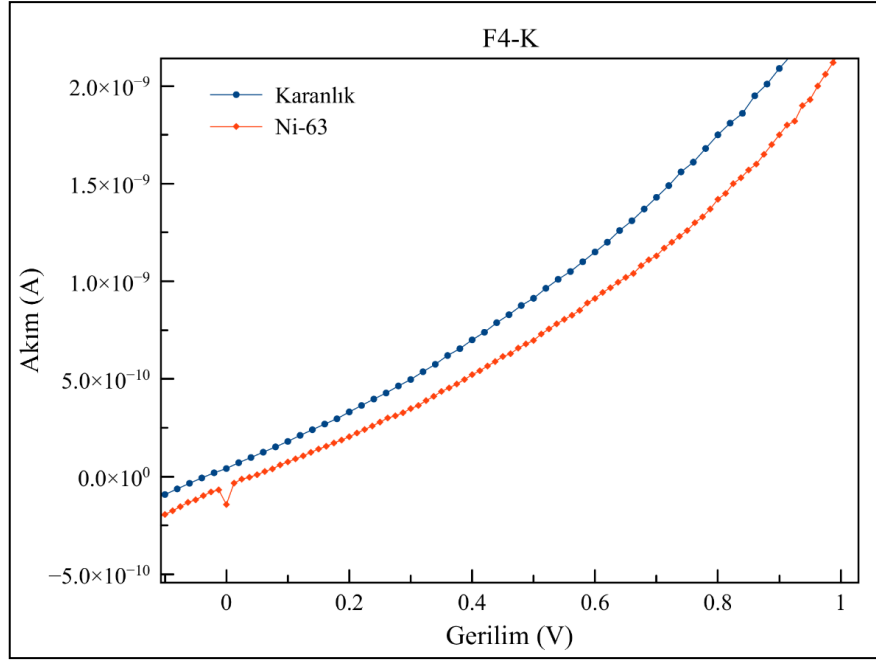
Şekil 9.31 F4-Q aygıtı karanlık akım ve betavoltaik akım



Şekil 9.32 F4-P aygıtı karanlık akım ve betavoltaik akım



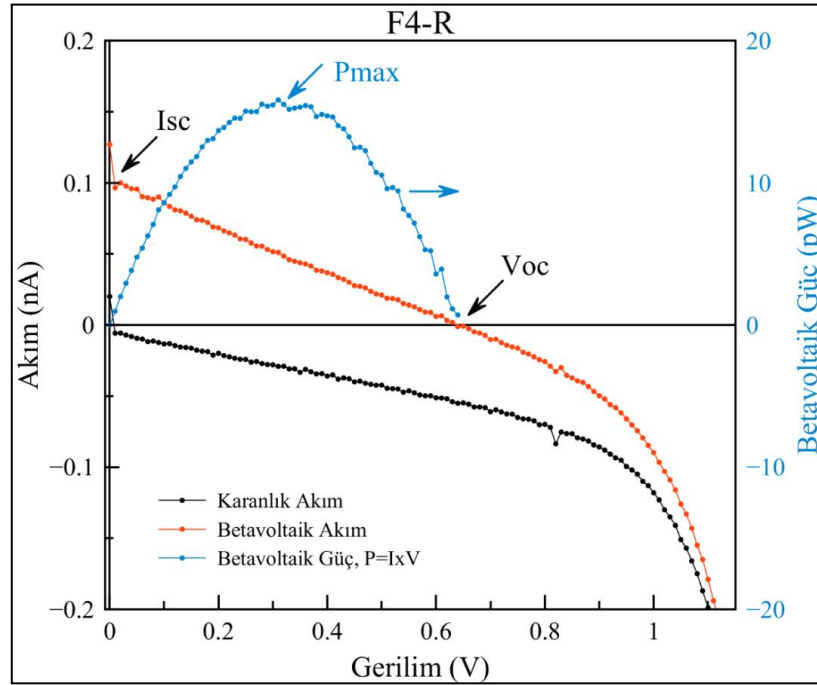
Şekil 9.33 F4-N aygıtı karanlık akım ve fotoakım



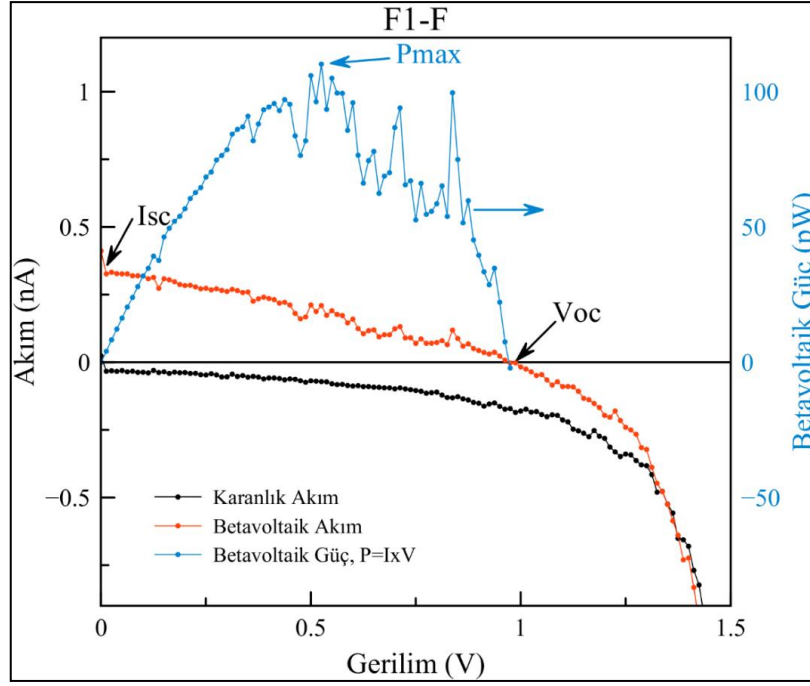
Şekil 9.34 F4-K aygıtı karanlık akım ve fotoakım

9.1.4 Üretilen Maksimum Güç ve Verimin Hesaplanması

Ölçümleri yapılan aygıtlardan maksimum I-V değerlerine sahip olan F4-R ve F1-F kodlu aygıtların hesaplanan maksimum güç değerleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 9.35 F4-R aygıtı karanlık akım ve betavoltaik akım-voltaj-güç eğrisi



Şekil 9.36 F1-F aygıtı karanlık akım ve betavoltaik akım-voltaj-güç eğrisi

Dolum faktörü (FF), maksimum güç (P_{max}) ve verim (η) değerleri, sırasıyla denklem (6.18), denklem (6.19) ve denklem (6.23) denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Tablo 9.1’de verilmiştir.

Tablo 9.1 Ni-63 tabanlı betavoltaik nükleer pilin performans parametreleri

Aygıt No	Açık Devre Voltajı (V_{oc}) (V)	Kısa Devre Akımı (I_{sc}) (nA)	Max Güç (nW)	Dolum Faktörü (FF)	Verim (η) (%)
F4-R	0.65	0.1	0.016	0.25	0.05
F1-F	0.98	0.4	0.11	0.28	0.35

9.2 Doğrudan Şarjlı Nükleer Pil Ölçüm Sonuçları

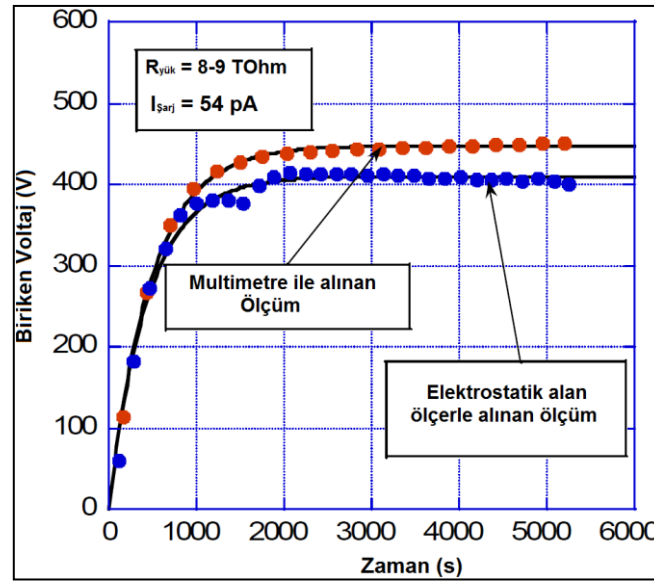
8.Bölümde geliştirilen Prometyum-147 tabanlı doğrudan şarjlı nükleer pilin çoklu plaka sistemi, Şekil 8.11’de verilen vakum ölçüm sistemi içerisine yerleştirilmiş ve elektriksel bağlantılar yapılmıştır. Kontak noktası sırasıyla elektrometre ve multimetre ölçüm ucuna alınarak, pil devresinde oluşan toplam şarj akımı 54 pA ve pil devresinin iç direnci (R_{pil}) 58 TOhm olarak ölçülmüştür. Daha sonra devreye

harici olarak 8-9 TOhm'lik direnç bağlanarak voltajın zamana bağlı grafiği çizilmiştir (Şekil 8.12).

Nükleer pilin 25 adet çoklu plaka sisteminde kullanılan Pm-147 aktivitesi toplam 100 mCi'dir. Kesim 8.1'de belirtildiği gibi iki plaka arası optimum mesafenin bulunması için kullanılan çift plakalı sistemde, kaynağın olduğu plaka 10 mCi aktiviteye sahipken, laboratuvarında sınırlı aktivitede Pm-147 kaynağı bulunduğundan dolayı, çoklu plaka sistemi için hazırlanan diğer 24 plakanın aktiviteleri 3 mCi ile 5 mCi arasında değişmektedir. Denklem (6.46)'da anlatıldığı gibi 10 mCi aktifiteli plaka sistemi için, kaynağın beta parçacık akımı hesaplandığında,

$$10 \text{ mCi} = 3.7 \cdot 10^8 \text{ Bq (elektron/s)} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 0.059 \text{ nA} \quad (9.1)$$

olarak elde edilir.



Şekil 9.37 Kolektör voltajının zamana göre değişimi

Denklem (6.38) kullanılarak,

$$R_{kaçak} = \frac{R_{pil} \cdot R_{yük}}{R_{pil} + R_{yük}} = \frac{58 \text{ TOhm} \cdot 9 \text{ TOhm}}{58 \text{ TOhm} + 9 \text{ TOhm}} = 7.8 \text{ TOhm} \quad (9.2)$$

elde edilir. Benzer şekilde denklem (6.36) kullanılarak doyum voltajı,

$$V_{Doyum} = I_{\text{şarj}} \frac{R_{\text{pil}} \cdot R_{\text{yük}}}{R_{\text{pil}} + R_{\text{yük}}} = 54\text{pA} \cdot 7.8 \text{ TOhm} = 421 \text{ V} \quad (9.3)$$

olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde üretilen güç değeri denklem (6.40) kullanılarak,

$$P_{\text{pil}} = V_{\text{doyum}} \cdot I_{\text{yük}} = 421 \text{ V} \cdot 54\text{pA} = 22.7 \text{ nW} \quad (9.4)$$

olarak hesaplanmıştır. Bu durumda (6.20) denkleminde benzer şekilde pilin elektriksel dönüşüm verimi,

$$\eta = \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{giriş}}} = \frac{P_{\text{pil}}}{qAE_{\text{ort}}} = \frac{22.7 \text{ nW} \cdot 100 \%}{1.6 \times 10^{-19} \text{ nC} \cdot 100 \text{ mCi} \cdot 3.7 \times 10^{10} \cdot 62 \text{ keV}} = 0.061\% \quad (9.5)$$

olarak elde edilmiştir. Ancak Şekil 8.9'daki plaka mesafesi-güç grafiğinde belirtildiği gibi maksimum güç 20 mm plaka mesafesinde oluşmasına rağmen, çoklu plaka sisteminin hacmini küçültmek amacıyla plakalar, Şekil 8.10'da gösterildiği gibi 5 mm aralıklı olarak yerleştirilmiştir. Şekil 8.9'da elde edilen grafiğe göre bu mesafeler arasındaki güç farkı %14 civarındadır. Bu nedenle nükleer pilde ulaşılabilecek maksimum verimi bulmak için, denklem (9.5)'de hesaplanan verim değeri 1.14 katsayısı ile çarpılarak normalize edilmelidir. Bu durumda nükleer pilin maksimum verimi,

$$\eta = 0.061 \times 1.14 = 0.07 \% \quad (9.6)$$

olarak bulunur. Ayrıca doğrudan şarjlı nükleer kapasitörün kapasitans değeri, denklem (6.35) kullanılarak hesaplanabilir. Denklemden kapasitans değeri çekildiğinde,

$$\begin{aligned} C &= \frac{-t}{R_{\text{kaçak}} \cdot \ln \left(1 - \frac{V(t)}{I_{\text{şarj}} \cdot R_{\text{kaçak}}} \right)} \\ &= \frac{-1200 \text{ s}}{9 \text{ TOhm} \cdot \ln \left(1 - \frac{421 \text{ V}}{54 \text{ pA} \cdot 9 \text{ TOhm}} \right)} = 66.8 \text{ pF} \end{aligned} \quad (9.7)$$

bulunur. Kapasitans denkleminde zaman parametresi yerine, voltajın doyuma ulaştığı $t=1200$ s yazılmıştır. Bu durumda toplam süre sonunda nükleer kapasitörde depo edilen enerji,

$$E_{\text{Nük.Kapasitör}} = -\frac{1}{2}CV^2 = 6 \mu\text{J} \quad (9.8)$$

olarak bulunmuştur. Hesaplanan tüm değerler Tablo 9.2’de gösterilmiştir.

Tablo 9.2 Pm-147 doğrudan şarjlı nükleer pilin performans parametreleri

Kaynak Aktivitesi	V_{Doyum} (V)	Şarj Akımı ($I_{\text{Şarj}}$) (pA)	Max Güç (nW)	Kapasitans (pF)	Verim (η) (%)
100 mCi	420-430	54	22.7	66.8	0.07

9.3 Tartışma ve Öneriler

Yapılan tez çalışmasında Ni-63 ve Pm-147 beta kaynakları kullanılarak doğrudan dönüşümlü (betavoltaik) ve doğrudan şarjlı olmak üzere iki farklı nükleer pil prototipi geliştirilmiştir.

Radyasyon enerjisinin farklı yöntemlerle elektrik enerjisine dönüşüm mekanizmasının anlaşılması amacıyla, tezin ikinci bölümünde farklı radyasyon türlerinin maddeyle etkileşim mekanizmaları anlatılmıştır.

Tezin üçüncü bölümünde, çalışma prensibine göre farklı nükleer pil modelleri ve çalışma prensiplerinden bahsedilmiştir. Ayrıca nükleer pillerde kullanılan beta radyoizotopların özellikleri açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde, nükleer pillerin 1950’li yıllardan günümüze mevcut teknolojik uygulamaları ile gelecek yıllarda hedeflenen potansiyel uygulamalarından bahsedilmiştir.

Beşinci bölümde yarı iletkenlerin genel karakteristikleri, yarı iletken katkılama kavramı ve p-i-n eklem yapıları anlatılmış, betavoltaik pillerde oldukça önemli bir parametre olan tüketim bölgesi kavramı açıklanmıştır.

Altıncı bölümün birinci kesiminde betavoltaik pillerin çalışma prensibi anlatılmış, pil performansını etkileyen faktörler ve tez çalışmasında kullanılacak olan GaN yarı iletken malzemenin fiziksel parametreleri hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca teorik verim hesaplamaları yapılarak, akım-voltaj karakteristiği, geniş bant aralıklı yarı iletkenler ve radyasyon dayanıklılığı kavramlarından bahsedilmiştir. Altıncı bölümün ikinci kesiminde, tez çalışmasının ikinci kısmını oluşturan doğrudan şarjlı nükleer pillerin çalışma prensibi ve verimi etkileyen faktörlerden bahsedilmiştir.

Tez araştırmasının yedinci bölümünde, Ni-63 radyoizotopla güçlendirilmiş GaN yarı iletken tabanlı nükleer pil prototipleri geliştirilmiştir. Bu amaçla ilk olarak, GaN yarı iletken malzemesinin karakteristik özellikleri ve parametreleri ile aktif bölge kalınlığı simülasyonları yapılmıştır. Simülasyon ve teorik hesaplamalardan elde edilen sonuçlara göre, Bilkent Nanotam'da, aygıt tasarımı çalışmaları, epitaksi büyütme çalışmaları ve aygıtların performansını etkileyecek en önemli faktörlerden kontak direncinin düşürülmesi üzerine çalışmalar yapılmış ve herbiri farklı özellikte yarı iletken aygıtlar geliştirilmiştir. Aygıt tasarımı için, Silvaco yarı iletken aygıt simülasyon programı ve Tracer Monte Carlo simülatörü kullanılmıştır. Epitaksi büyütmeleri NANOTAM temiz odasında bulunan metal-organik kimyasal buhar yoğunlaştırma (MOCVD) sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve metal kontakları yapılarak ölçüme hazır hale getirilmiştir. Üretilen aygıtların karanlık akımları ölçülmüş, morötesi dalgaboylarında fotonlara tepkiselliği gözlenmiştir. Yedinci bölümün ikinci kısmında Ni-63 ve Pm-147 radyoaktif ince film üretim çalışmaları yapılmıştır. Bunun için MCNP kodu kullanılarak, optimum radyoaktif ince film kalınlıklarının ne olması gerektiği belirlenmiş ve elde edilen bu kalınlık değerlerinde, kaynağın kendini zırlama etkisinden dolayı, beta enerji spektrumunun hangi oranda yüksek enerjiye doğru kaydığı belirlenmiştir. Elde edilen veriler ışığında Ni-63 kaynağı elektroliz ile, Pm-147 kaynağı ise damlatma yöntemi ile ince film şeklinde kaplanmış ve GaN yarı iletken aygıtlar ile birebir örtüştürülerek betavoltaik nükleer pil prototipinin üretimi tamamlanmıştır. Yedinci bölümün son kesiminde, nükleer pilin akım-voltaj-güç karakterizasyonları için gerekli olan vakum sistemi, kaynak ölçer,

elektrometre ve triax bağlantılı faraday ölçüm kafesi temin edilmiştir. Ayrıca alınacak ölçümler için labview tabanlı otomasyon yazılımı geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılım, kullanılan radyoaktif kaynağın türüne ve aktivitesine bağlı olarak alınan verileri analiz etmekte ve pilin maksimum akım-voltaj, dolum faktörü, kısa devre akımı, açık devre voltajı ve verim değerlerini otomatik olarak hesaplamaktadır. Ni-63 radyoizotop tabanlı, F4-R kodlu betavoltaik nükleer pil prototipi üzerinde yapılan ölçümlerde, açık devre voltajı 0.65 V, kısa devre akımı 0.1 nA ve maksimum güç 0.016 nW olarak elde edilmiştir. Pilin verimi % 0.05 ve dolum faktörü (FF) 0.25 civarında hesaplanmıştır. Ölçülen değerler, 1 mm² lik yarı iletken üzerine düşen 0.75 mCi aktivite ile elde edilmiştir. Bu durumda 75 mCi aktivite ile, 1 cm² lik pcb üzerinde seri bir şekilde birbirine bağlanacak toplam 16 adet baygıtdan elde edilecek maksimum güç değeri yaklaşık 0.256 nW civarında olacaktır. Geliştirilen F1-F kodlu betavoltaik nükleer pil prototipi üzerinde yapılan ölçümlerde açık devre voltajı 0.98 V, kısa devre akımı 0.4 nA ve maksimum güç 0.11 nW olarak elde edilmiştir. Pilin verimi %0.35 ve dolum faktörü (FF) 0.28 olarak bulunmuştur. Bu durumda 16 adet seri bağlı aygıtdan maksimum elde edilecek güç 1.76 nW civarında olacaktır.

Tezin sekizinci bölümünde, Pm-147 tabanlı doğrudan şarjlı nükleer pil düzeneği hazırlandıktan sonra yüksek vakum hücresi içerisine yerleştirilmiş ve elektriksel bağlantılar, yapılacak ölçümler için hücre dışına taşınmıştır. Akım voltaj ölçümleri için elektrometre ve dijital multimetre kullanılmıştır. Ayrıca pil sisteminde en üstteki metal plakada biriken toplam yük ve voltaj değerleri, elektrostatik alan/voltaj ölçer ile temassız olarak ölçülmüş ve pilin kapasitans değeri belirlenmiştir. 100 mCi aktiviteli Pm-147 radyoizotop tabanlı doğrudan şarjlı nükleer pil prototipi üzerinde yapılan ölçümlerde pilin doyum voltajı yaklaşık olarak 421 V, şarj akımı 54 pA ve üretilen maksimum güç 22.7 nW civarındadır. Kapasitans değeri 66.8 pF, verim değeri ise % 0.07 olarak elde edilmiştir. Pilde depolanan güç değeri 6 µJ civarındadır. Teorik olarak elde edilen verim değeri % 0.21 bulunmasına rağmen deneysel verim değerinin 3 kat düşük olmasının nedeni, kesim 8.4'te bahsedildiği gibi, pilde geri saçılma etkisini azaltmak için metal kolektörler üzerine kaplanması gereken optimum polimid film kalınlığı 0.3-

0.4 μm olduğu halde piyasadan en ince 25 μm polimid film temin edilebilmesidir. Denklem (8.6)'ya göre bu kalınlıkta 49 keV ve altındaki beta spektrumu kaybolmaktadır. Bu da pilin verimini oldukça d    rmektedir.

Yapılan tez çalışması tamamlandıktan sonra planlanan bir diğ er araştırma, üretilen betavoltaik nükleer pilin içerisine radyoaktif madde konulmadan, elektron hızlandırıcısı ile farklı enerji ve demet akımlarında verim-g    testlerini yapmaktır. Bu şekilde üretilen yarı iletkenin hangi elektron enerjisinde en yüksek verime sahip olacağı deneysel olarak tespit edilmiş olacaktır. Ayrıca, mevcut yarı iletken tasarımı, katkılama yoğunluğu, kristal kusur optimizasyonu ve yüksek p-kontak dirençlerinin d      lmesi gibi aşamalar üzerinde çalışılması planlanmakta ve daha geniş alanlı olacak şekilde seri ya da paralel bağlanacak aygıtların üretilmesi hedeflenmektedir. Mevcut aygıtlarda 100 mm²'lik alanın 16 mm²'lik alanı efektif olarak akım  l   lecek şekilde bağlanmıştır. Üretilen yarı iletken eklemlerde karanlık akım dağılımı oldukça geniş gözlemlendiği için, bu akım seviyelerinin benzer seviyelere çekilmesi de hedeflenmektedir.

Tez çalışmasında geliştirilen doğrudan d n    ml  (betavoltaik) ve doğrudan şarjlı prototip nükleer pillerin verimi, fotovoltaik güneş pillerine göre d    k olmasına rağmen, mevcut çalışma, bu teknolojinin gelecekteki uygulamaları ve Türkiye'de yapılan ilk kapsamlı deneysel araştırma olması açısından önem arz etmektedir.

- [1] W. Pfann, W. Van Roosbroeck, (1954). "Radioactive and photoelectric p-n junction power sources", *Journal of Applied Physics* 25 1422-1434.
- [2] P. Rappaport, (1954). "The electron-voltaic effect in p-n junctions induced by beta-particle bombardment", *Physical Review* 93 246.
- [3] P. Rappaport, (1956). "Radioactive battery employing intrinsic semiconductor", Google Patent.
- [4] C. J. Eiting, V. Krishnamoorthy, S. Rodgers, and T. George, (2006). "Demonstration of a radiation resistant, high efficiency SiC betavoltaic", *Applied Physics Letters* 88, 064101.
- [5] M. Lewis, S. Seeman, (1973). "Performance experience with prototype Betacel nuclear batteries", *Nuclear Technology* 17- 160-167.
- [6] A. Sciuto, G. D'Arrigo, F. Roccaforte, M. Mazzillo, R. Spinella, V. Raineri, (2011). "Interdigit 4H-SiC vertical Schottky diode for betavoltaic applications, *IEEE Transactions on Electron Devices*", 58,593-599.
- [7] L. Olsen, (1973). "Betavoltaic energy conversion, *Energy Conversion*", 13, 117-127.
- [8] Tom Adams, August (2015), "Betavoltaics: An Innovative Power Source Enabling Next Generation Low-Power Sensor and Communication Devices", Joint Power Expo, Cincinnati OH.
- [9] L.M. Fraas, J.E. Avery, J. Martin, V.S. Sundaram, G. Girard, V.T. Dinh, T.M. Davenport, J.W. Yerkes (1990). "Over % 35 efficient GaAs/GaSb tandem solar cells", *IEEE Trans. Electron Devices*, 37, 443.
- [10] K. E. Bower, Y. A. Barbanel, Y.G. Shreter, G. W. Bohnert (2002), "Polymers, Phosphors, and Voltaics for Radioisotope Microbatteries", CRC Press.
- [11] G. N. Yakubova, (2012). "Nuclear Batteries with Tritium and Promethium-147 Radioactive Sources: Design, Efficiency, Application of Tritium and Pm-147 Direct Charge Batteries", *Tritium Battery with Solid Dielectric*, ISBN: 9783659276200, LAP LAMBERT Academic Publishing.
- [12] M. Sychov, A. Kavetsky, G. Yakubova, G. Walter, S. Yousaf, Q. Lin, D. Chan, H. Socarras, K. Bower, (2008). "Alpha indirect conversion radioisotope power source", *Applied Radiation and Isotopes* Volume 66, Issue 2, S: 173-177.

- [13] D. Meier, (2008), "Radionuclide Production For Radioisotope Micro-Power Source Technologies", PhD Dissertation, University of Missouri-Columbia.
- [14] R. Michael, M. George H. Miley, Nie Luo; Richard J. Gimlin, (2008). "Ragone Plot Comparison of Radioisotope Cells and the Direct Sodium Borohydride/Hydrogen Peroxide Fuel Cell with Chemical Batteries", *IEEE Transactions on Energy Conversion*.
- [15] A. M. Barnett, J. E. Lees, D. J. Bassford, and J. S. Ng, (2012). "Determination of the electron-hole pair creation energy in $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ ", *J. Instrum.*, vol. 7, No: 6.
- [16] H. Gao, L. Shun-Zhong, H. Zhang, H. Wang, (2012). "Investigation of a energy conversion silicon chip based on ^{63}Ni radio-voltaic effect", *Acta Phys.Sin.* 61 (17), 176101.
- [17] H. San, S. Yao, X. Wang, Z. Cheng, and X. Chen, (2013). "Design and simulation of GaN based Schottky betavoltaic nuclear micro-battery", *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 80, pp. 17–22.
- [18] S. Tin and A. Lal, (2009). "Ultra-High Efficiency High Power Density Thinned-Down Silicon Carbide Betavoltaics", *PowerMEMS*, pp. 189–192.
- [19] S. Tin and A. Lal, (2009). "A radioisotope-powered surface acoustic wave transponder," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 19, no. 9.
- [20] X. Tang, Y. Liu, D. Ding, and D. Chen, (2012). "Optimization design of GaN betavoltaic microbattery," *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 55, no. 3, pp. 659–664.
- [21] T. Alam, M. Pierson., (2016). "Principles of Betavoltaic Battery Design", *J. Energy Power Sources*, vol. 3, no. 1, pp. 11–41.
- [22] S. T. Revankar and T. E. Adams, (2014). "Advances in Betavoltaic Power Sources," *J. Energy Power Sources*, vol. 1, no. 6, pp. 321–329.
- [23] S. Rahastama and A. Waris, (2016). "Analytical Study of ^{90}Sr Betavoltaic Nuclear Battery Performance Based on p-n Junction Silicon", *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 739, no. 1.
- [24] N. Science, (2014). "Demonstration of Pm-147 GaN betavoltaic cells," vol. 020403, no. 1, pp. 1–4.
- [25] G. R. Ghasemi Nejad, F. Rahmani, and G. R. Abaeiani, (2014). "Design and optimization of beta-cell temperature sensor based on $^{63}\text{Ni-Si}$ ", *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 86, pp. 46–51.
- [26] S.K. Lee, S. Son, K. Kim, J. Park, H. Lim, J. Lee, E. Chung, (2009). "Development of nuclear micro-battery with solid tritium source", *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 67, no. 7–8, pp. 1234–1238.
- [27] H. Guo, Y. Shi, Y. Zhang, Y. Zhang, and J. Han, (2011). "Fabrication of SiC p-i-n betavoltaic cell with ^{63}Ni irradiation source", *2011 IEEE Int. Conf. Electron Devices Solid-State Circuits, EDSSC 2011*.

- [28] C. Honsberg, W.A. Doolittle, M. Allen, C. Wang, (2005). "GaN betavoltaic energy converters", Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference.
- [29] S. Tin and A. Lal, (2016). "Radioisotope Micropower For Semi- Active RFID", Proceedings of the PowerMEMS.
- [30] K. Wu, C. Dai, H. Guo, (2011). "A theoretical study on silicon betavoltaics using Ni-63", 2011 IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), S. 724-727.
- [31] K. Fu, A. Knobloch, F. Martinez, D. Walther, C. Fernandez-Pello, A. Pisano, D. Liepmann, K. Miyaska, and K. Maruta, "Design and Experimental Results of Small-Scale Rotary Engines", Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS), ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, s. 867-873.
- [32] D.Y. Qiao, Y.W. Zheng, G. Peng, Y.X. Wang, Z. Bo, Z. Lin, (2008). "Demonstration of a 4H SiC betavoltaic nuclear battery based on Schottky barrier diode", Chinese Physics Letters 25, 3798.
- [33] A. Sciuto, G. D'Arrigo, F. Roccaforte, M. Mazzillo, R. Spinella, V. Raineri, (2001). "Interdigit 4H-SiC vertical Schottky diode for betavoltaic applications", IEEE Transactions on Electron Devices 58, 593-599.
- [34] D.Y. Qiao, X.J. Chen, Y. Ren, W.Z. Yuan, (2011). "A micro nuclear battery based on SiC Schottky barrier diode", Journal of Microelectromechanical Systems 20 685-690.
- [35] A. Lal, J. Blanchard, (2004). "Daintiest dynamos [nuclear microbatteries]", IEEE Spectrum 41, 36-41.
- [36] TAEK, Radyoaktivite, <http://www.taek.gov.tr/ogrenci/sf3.html>, 7 Mart 2017.
- [37] C. Grupen, M. Rodgers, (2016). "Radioactivity and Radiation", ISBN: 978-3-319-42329-6, First Edition, Springer International Publishing Switzerland, Switzerland.
- [38] Physics Libretexts Radioactive decay, [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_University_Physics_\(OpenStax\)/Map%3A_University_Physics_III_Optics_and_Modern_Physics_\(OpenStax\)/10%3A_Nuclear_Physics/10.3%3A_Radioactive_Decay](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_University_Physics_(OpenStax)/Map%3A_University_Physics_III_Optics_and_Modern_Physics_(OpenStax)/10%3A_Nuclear_Physics/10.3%3A_Radioactive_Decay)
- [39] W. R. Corliss and D. G. Harvey, (1964). "Radioisotopic Power Generation", Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- [40] R.E. Greene, R.S Pressly, F.N. Case, (1972), "Review of alpha radiation source preparation methods and applications", ORNL--4819, ABD.
- [41] Alpha Decay, TeachNuclear.ca, http://teachnuclear.ca/all-things-nuclear/radiation/radioactive-decay/alpha_decay/, 2017

- [42] Beta decay, Encyc. Britannica, <https://www.britannica.com/science/beta-decay>, 2007.
- [43] Electron Impact Cross Sections for Ionization and Excitation, <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Ionization/index.html>, National Institute of Standards and Technology, 2005.
- [44] J. F. Ziegler, M. D. Ziegler, J. P. Biersack, (2010). "SRIM-The stopping and range of ions in matter (2010)", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.
- [45] G.H. Walker, E.J. Conway, (1978). "Short circuit current changes in electron irradiated GaAlAs/GaAs solar cells", Prog. Int. Solar Energy Soc. Congr., Pergamon Press, NewYork, 575.
- [46] G., Friedlander, J.W Kennedy, E. S. Macias, J. M. Miller, (1981). "Nuclear and Radiochemistry", 3rd. John Wiley and Sons, pp 221-223
- [47] L. Katz, A. S. Penfold, (1952). "Range-Energy Relations for Electrons and the Determination of Beta-Ray End-Point Energies by Absorption", Rev. Modern Phys., vol. 24, no. 1, pp. 28-44.
- [48] WR. Hendee, (1979). "Medical radiation physics: roentgenology, nuclear medicine and ultrasound", Year Book Medical Publishers, p:115
- [49] Nükleer Pil Teknolojisi Üzerine: Enerji Sorununa Kesin Çözüm, <https://anahtar.sanayi.gov.tr/tr/news/nukleer-pil-teknolojisi-uzerine-enerji-sorununa-kesin-cozum/1877>
- [50] S. Kumar, "Atomic Batteries Energy from Radioactivity", (2015). Department of Electrical Engineering, Stanford University.
- [51] Betavoltaic Devices., <http://large.stanford.edu/courses/2013/ph241/harrison2>
- [52] S. Butera, M. D. C. Whitaker, G. Lioliou & A. M. Barnett, (2016), "AlGaAs ⁵⁵Fe X-ray radioisotope microbattery", Scientific Reports, 6:38409.
- [53] R. Loo, R.C. Knechtly, G.S. Kamath, (1981). "Enhanced annealing of GaAs solar cell radiation damage", Conf. Rec. 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., New York.
- [54] P. Rappaport and E. G. Linder, (1953). "Radioactive Charging Effects With Dielectrics," *J. Appl. Phys.*, 24, 9.
- [55] H. Flicker, J. J. Loferski, T. S. Elleman, (1964). "Construction of a Promethium-147 Atomic Battery," *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2.
- [56] L. C. Olsen, (1993). "X. Y. Chen Conversion," Washington State University/Tri Cities, N94-11407.
- [57] T. Kostas, N. P. Knerani, P. Stradins, F. Gaspari, (2003). "Tritiated amorphous silicon betavoltaic devices," *IEE Proceeding Circuit Devices Systems* 150 (4), 274.

- [58] H. Guo, and A. Lal, (2003). "Nanopower Betavoltaic Microbatteries," *IEEE Transducer*, 36.
- [59] W. Sun, N. P. Kherani, P. M. Fauchet, (2005). "A Three-Dimensional Porous Silicon p-n Diode for Betavoltaics and Photovoltaics", *Advanced Materials* 17 (10), 1230.
- [60] C. B. Honsberg, C. Wang, (2005). "GaN Betavoltaic Energy Converters", *31st IEEE Photovoltaics Specialist Conference*, Orlando, Florida, s: 3-7.
- [61] M. Wijesundara, R. Azevedo, (2011). "Silicon Carbide Microsystems for Harsh Environments", Springer Science & Business Media, ISBN: 978-1-4419-7120-3, s: 204-206.
- [62] M. V., S., Chandrashekhara, C. I., Thomas, H. Li, M.G., Spencer, A., Lal., (2006). "Demonstration of a 4H-SiC betavoltaic cell", *Applied Physics Letters* 88, 033506.
- [63] C. J. Eiting, V. Krishnamoorthy, E. Romero, and S. Jones, (2006). "Betavoltaic Power Cells," *Proceeding of the 42 Power Source Conference*, 601.
- [64] V. M. Andreev, A. G. Kavetsky, (2000). "Tritium-Powered Betacells Based on Al_xGa_{1-x}As," *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1253.
- [65] G. C. Rybicki, (2001). "Silicon Carbide Radioisotope Batteries," *NASA/CP-2001-210747/REV1*, 200.
- [66] J. Chu, and X. Piao, (2009). "Research of radioisotope microbattery based on beta-radio-voltaic effect," *Journal Micro/Nanolithograph MEMS MOEMS* 8 (2), 021180.
- [67] S. Deus, (2000). "Alpha- and Betavoltaic Cells Based on Amorphous Silicon," *16th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, TRACE Photonics, Inc., 218.
- [68] J. V. Kramer, (1924). "*The Electrician*", 93, 497.
- [69] A. G. Kavetsky, S. N. Nekhoroshkov, S. P. Meleshkov, (2002). "Radioactive materials, Ionizing Radiation Sources, and Radioluminescent Light Sources for Nuclear Batteries," in *Polymers, Phosphors, and Voltaics for Radioisotope Microbatteries*. CRC Press, 39.
- [70] V.M. Andreev, V.V. Komin, I.V. Kochnev, V.M. Lantratov, M.Z. Shvarts., (1994). "High-efficiency AlGaAs-GaAs solar cells with internal Bragg reflector", Dec. 1994, Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion - WCPEC., Waikoloa, HI, USA.
- [71] M. Sychoy, A. Kavetsky, G. Yakubova, (2008). "Alpha indirect conversion radioisotope power source," *Applied Radiation and Isotopes* 66 (2), 173.
- [72] E. G. Linder and S. M. Christian, (1952). "Use of Radioactive Material for the Generation of High Voltage," *J. Appl. Phys.*, 23, 11, 1213.

- [73] J. H. Coleman, (1956). "Nuclear Batteries", *Proc. 10th Annual Battery Research and Development Conference*, 56, Power Sources Division.
- [74] J. H. Coleman, (1957). "Constant Current Charging Type Nuclear Batteries", *Proc. 11th Annual Battery Research and Development Conference*, 106, Power Sources Division.
- [75] J. H. Coleman, (1958). "Nuclear Energy Sources", *Proc. 12th Annual Battery Research and Development Conference*, 108, Power Sources Division.
- [76] J. H. Coleman, (1953). "Radioisotope High-Potential Low-Current Sources", *Nucleonics*, 11, 12, 42.
- [77] W. F. Windle, (1964). "Microwatt Radioisotope Energy Converters," *IEEE Transactions on Aerospace*, 2, 2, 646.
- [78] G. D. Gorlovoy and E. G. Karbash, (1950). "Charging Device with Nuclear Battery," *Atomic Energy*, 4, 382
- [79] Y. V. Lazarenko, A. A. Pystovalov, and V. P Shapovalov, (1992). "Desk-Size Nuclear Sources of the Electricity Energy," Energoatomizdat, Moskova.
- [80] J. N. Anno, (1962). "A Direct-Energy Conversion Device Using Alpha Particles", *Nucl. News*, 6, 3.
- [81] J. Braun, L. Fermvik, and A. Stenback, (1973). "Theory and Performance of a Tritium Battery for the Microwatt Range", *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 6, 727.
- [82] H. Li, (2005), "Radioisotope-Powered Self-reciprocating Cantilever for Micro Power Generation", *Doktora Tezi*, Cornell Universitesi
- [83] H. Li, A. Lal, J. Blanchard, D. Henderson, (2002). "Self-reciprocating radioisotope-powered cantilever", *J. Appl. Phys.* 92 1122e1187.
- [84] Nano Nuclear Batteries,
<http://www.tahan.com/charlie/nanosociety/course201/nanos/MPnuke.pdf>
- [85] B. Ulmen, P.D. Despairs, S. Moghaddam, (2009). "Development of diode junction nuclear battery using Ni-63", *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 282, 601–604.
- [86] M. A. Prelas, C. L. Weaver, M. L. Watermann, E. D. Lukosi, R. J. Schott, D. A. Wisniewski, (2014). "A review of nuclear batteries", *Progress in Nuclear Energy*.
- [87] M. A. Prelas, M. Boraas, F. Aguilar, J.D Seelig, M.T. Tchouaso, D. Wisniewski, "Nuclear Batteries and Radioisotopes", (2016). Springer; 1st ed.
- [88] Live Chart of Nuclides,
<https://wwwnds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>
- [89] S Deus (2000), "Tritium-powered betavoltaic cells based on amorphous silicon", 28. IEEE Photovoltaic Specialists conference, 1246–1249.

- [90] V. Andreev, A. Kevetsky, V. Kaiinovsky, V. Khvostikov, V. Larionov, V. Rumyantsev, (2000). "Tritium-powered betacells based on AlxGa1-xAs", Photovoltaic specialists conference, 28. conference record, IEEE, 2000, pp: 1253–1256.
- [91] Pure Beta Emitters, (2009). University Of Wisconsin-Madison Jake Blanchard, <http://homepages.cae.wisc.edu/~blanchar/purebeta.html>
- [92] J. Dixon, A. Rajan, S. Bohlemann, D. Coso, A. Upadhyaya, A. Rohatgi, S. Chu, A. Majumdar, S. Yee, (2016). "Evaluation of a Silicon ⁹⁰Sr Betavoltaic Power Source", Sci. Rep., vol. 6, S. 4–9.
- [93] L. Zhang, H. L. Cheng, X. C. Hu, and X. B. Xu, (2018). "Model and optimal design of ¹⁴⁷Pm SiC-based betavoltaic cell", Superlattices Microstruct., vol. 123, pp. 60–70.
- [94] M. U. Díaz, (2011). "Off-line commissioning of a non-destructive FT-ICR detection system for monitoring the ion concentration in the KATRIN beamline", Doktora Tezi, Ruperto-Carola Üniversitesi-Heidelberg.
- [95] L.C. Olsen, (1974). "Advanced betavoltaic power sources", Proc. 9th Intersociety Energy Convers. Eng. Conf., 754.
- [96] Larry L. Gadeken, (2011). "Nanotechnology and Energy Harvesting from Radioisotopes", BetaBatt MEPTEC 9th Annual MEMS Symposium.
- [97] H. M. Salh, (2014). "Improving the Overall Efficiency of Radioisotope Thermoelectric Generators", Adv. Energy Power, vol. 2, no. 3, s. 21–26.
- [98] F. N. Huffman, J.J. Migliore, W.J. Robinson, J.C. Norman, (1974). "Radioisotope powered cardiac pacemakers", Cardiovasc Dis 1:52–60
- [99] American Optical's Nuclear Pacemaker, <http://www.implantable-device.com/2011/12/24/american-opticals-nuclear-pacemaker-1970s/>, 1970
- [100] Permanent Pacemaker Insertion, Darlington Memorial Hospital, <https://www.cddft.nhs.uk/media/44343/permanentpacemakerinsertiondarlingtonmemorialhospital.pdf>
- [101] L. Olsen, P. Cabaay, B. Elkind, (2012), "Betavoltaic power sources", Phys Today.;65(12):35.
- [102] V.M. Kodyukov, (1978). "Radioisotope Sources of Electrical Energy", Fradkin, G.M., Ed., Atomizdat, Moskova.
- [103] Hamilton Sundstrand Rocketdyne to Power 'Curiosity' Rover on Mars, <https://linkybird.com/2011/11/27/hamilton-sundstrand-rocketdyne-to-power-curiosity-rover-on-mars/>
- [104] K. Takahashi, (2006). "Contemporary technology and application of MEMS rocket", MNT Aerosp. Appl.
- [105] H. Nochetto, JR Maddux, P Taylor (2013), "High temperature thermoelectric materials for waste heat regeneration", Army Research Laboratory, Adelphi, MD, pp 20783–1197.

- [106] Neutron Sources, Nuclear Power, <https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/atomic-nuclear-physics/fundamental-particles/neutron/neutron-sources/> , 2016.
- [107] RTG is installed to New Horizons for a fit check, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RTG_is_installed_to_New_Horizons_for_a_fit_check.jpg
- [108] J. Blanchard, “Radioisotope Batteries for MEMS”, University of Wisconsin, Ocak 2005.
- [109] T. Adams, (2012). “Status of Betavoltaic Power Sources for Nano and Micro Power Applications” 45. Power Sources Conference, 11-14.
- [110] A. Sciuto, G. D’Arrigo, F. Roccaforte, M. Mazzillo, R. Spinella, V. Raineri, (2011). “Interdigit 4H-SiC vertical Schottky diode for betavoltaic applications”, IEEE Transactions on Electron Devices 58, 593-599.
- [111] Betavoltaic Power Sources, www.widetronix.com/products
- [112] Overview of Tritium Betavoltaic Power for Micro Sensors, <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/08/f26/Cabauy%20Tritium%20Focus%20Group%20Presentation.pdf>
- [113] S. Tin, R. Duggirala, R. Polcawich, M. Dubey, A. Lal, (2008), “Self-Powered Discharge-based Tunable Wireless Transmitter”, *MEMS*, s: 988-991
- [114] A. Reddy, S. Ganesh Nutan, M. Sohail, G. Boopalan, (2013). “Design of a Self-Powered Wireless Transmitter”, ISSN:0975-4024 International Journal of Engineering and Technology (IJET). Vol 5 No 3.
- [115] S. Roundy, D. Steingart, L. Frechette, P. Wright, and J. Rabaey, (2004). “Power Sources for Wireless Sensor Networks”, Proceedings of the First European Workshop on Wireless Sensor Networks, EWSN 2004, s. 117.
- [116] DJ Pines, F Bohorquez, (2006). “Challenges facing future micro-air-vehicle development”, J. Aircr. 43:290–305.
- [117] Unmanned Aerial Vehicles Up, Pilots Down, <https://www.symscape.com/blog/unmanned-aerial-vehicles-up-pilots-down>
- [118] UAS: Wasp® AE RQ-12A, <http://www.avinc.com/uas/view/wasp>
- [119] M. Lu, G.G. Zhang, K. Fu, G.H. Yu, D. Su, J.F. Hu, (2011). “Gallium Nitride Schottky betavoltaic nuclear batteries, Energy Conversion and Management”, s: 1955-1958.
- [120] M. Mohamadian, S. Feghhi, H. Afariadeh, (2009). “Geometrical optimization of GaN betavoltaic microbattery”, Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Power Systems, Beijing, China, s. 247-250.
- [121] Yarı İletkenler, <http://w3.balikesir.edu.tr/~kahveci/dersler/te-04.pdf>
- [122] Energy Education, https://energyeducation.ca/encyclopedia/Band_gap#cite_note-3

- [123] Fermi Seviyesi, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/Fermi.html>
- [124] Fotovoltaik (Güneş Pilleri), <https://web.itu.edu.tr/~kaymak/images/pv.html>
- [125] Semiconductors and diodes, http://www.citytech.cuny.edu/electrical-telecomm/docs/eet1240_et212_electronics.pdf
- [126] Kovelant Bağ, İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi ders notları, <http://namikakcay.com/wp-content/uploads/2016/10/EDTU-Ders2.pdf>
- [127] Semiconductor Materials, <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/semiconductor-materials>
- [128] Celal Bayar Üniversitesi, Elektronik ders notları 2, <http://yucelkocyigit.cbu.edu.tr/elektronik2.pdf>
- [129] Sze, S.M., (1981), “Physics of Semiconductor Devices”, John Wiley & Sons, Inc., New York, Part 1.
- [130] Valence Bond Model For Intrinsic Semiconductors, <https://www.physics-and-radio-electronics.com/blog/valence-bond-model-for-intrinsic-semiconductors/>
- [131] N. Tsoulfanidis, (2010). “Measurement and detection of radiation”, Boca Raton, 3rd ed., FL 33487:CRC.
- [132] W. Shockley and H.J. Queisser, (1961). “Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells”, J. Appl. Phys., 32, 510.
- [133] K. Shiojima, T. Sugahara, S. Sakai, (1999). “Large Schottky barriers for Ni/p-GaN contacts”, Appl. Phys. Lett., 74, 1936.
- [134] N.I. Kuznetsov, E. V. Kalinina, V.A. Soloviev, V.A. Dmitriev, (1996). “Schottky barriers on GaN”, Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 395,837.
- [135] G. Crabtree and L. Lewis, (2007). “Solar energy conversion”, Physics Today, s:37-42.
- [136] C.A. Klein, (1968). “Bandgap dependence and related features of radiation ionization energies in semiconductors”, Journal of Applied Physics 39, 2029-2038.
- [137] M. Chandrashekhar, C.I. Thomas, M.G. Spencer, (2006). “Measurement of the mean electron-hole pair ionization energy in 4H SiC”, Applied Physics Letters 89.
- [138] G.F. Knoll, (2000). “Radiation Detection and Measurement”, ISBN: 0-471-07338-5, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., USA.
- [139] C.D. Cress, B.J. Landi, R.P. Raffaele, (2008). “Modeling laterally-contacted nipi-diode radioisotope batteries”, IEEE Transactions on Nuclear Science 55, 1736-1743.
- [140] X.Y. Li, Y. Ren, X.J. Chen, D.Y. Qiao, W.Z. Yuan, (2011). “Ni-63 schottky barrier nuclear battery of 4H-SiC”, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 287, 173-176.

- [141] C. Hai-Yang, J. Lan, and L. Da-Rang, (2011). "Measurement of beta particles induced electron-hole pairs recombination in depletion region of GaAs PN junction", Chin. Phys. Lett. 28(5), 058101.
- [142] X. Tang, D. Ding, Y. Liu, D. Chen, (2012). "Optimization design and analysis of Si-⁶³Ni betavoltaic battery", Science China Technological Sciences 55, 990-996.
- [143] Yarıiletken Yapılar, http://www.acikders.org.tr/pluginfile.php/1075/mod_resource/content/1/Bolum-14.pdf
- [144] U. Ozgur, H. Liu, X. Li, X. Ni, H. Morkoc, (2010). "GaN-based lightemitting diodes: efficiency at high injection levels", Proceedings of the IEEE. 98(7):1180–1196.
- [145] M. Mandurrino, G. Verzellesi, M. Goano, M. Vallone, F. Bertazzi, G. Ghione, M. Meneghini, G. Meneghesso, E. Zanoni, "Physics-based modeling and experimental implications of trap-assisted tunneling in InGaN/GaN lightemitting diodes", Phys Status Solidi A. 2015;212(5):947–953.
- [146] S.M Sze, (1981). "Metal-Semiconductor Contacts, Physics of Semiconductors Devices, 2nd ed.", Wiley, New York, 1-300.
- [147] Billington E, Ehrengerg W., (1961). "The electron voltaic effects in silicon and selenium elements", Proc Phys Soc. 78(5):845–853.
- [148] A. Luque, (1989). "Solar Cells and Optics for Photovoltaic Concentration", Adam Hilger, Bristol-Philadelphia.
- [149] T. T. Mnatsakanov, M. E. Levinshtein, L. I. Pomortseva, S. N. Yurkov, G. S. Simin, and M. A. Khan, (2003), "Carrier mobility model for GaN", Solid-State Electron. 47(1), s: 111–115.
- [150] K. Gulbinas, V. Grivickas, H. P. Mahabadi, M. Usman, A. Hallen (2011). "Surface Recombination Investigation in Thin 4H-SiC Layers", Materials Science, Vol. 17, No. 2. 1392-1320.
- [151] Z. L. Alferov, V.M. Andreev, N.S. Zimogorova, (1969), "Photovoltaic properties of heterojunction AlGaAs-GaAs", Fiz. i Tekhn. Polupr., 3, 1633, translated in English in Sov. Phys. Semicond., 3, No. 11.
- [152] V.M. Andreev, L.M. Dolginov, D.N. Tret'iakov, (1975). "Liquid phase epitaxy in semiconductor devices technology", Sov. Radio, Moskova.
- [153] V.M. Andreev, V.A. Grilikhes, V.D. Rummyantsev (1997). "Photovoltaic Conversion of Concentrated Sunlight", John Wiley & Sons, Chichester, chap. 1- 3.
- [154] W. Ehrenberg, C. Lang (1954), "Probing of barrier layers with an electron beam", Physica.20(7–12):1137–1138.
- [155] F. K. Manasse, J. J. Pinajian, and A. N. Tse, (1976). "Schottky-barrier betavoltaic battery", IEEE Trans. Nucl. Sci. 23(1), 860–870.

- [156] L.D. Rang, J. Lan, Y.J. Hua, T.Y. Yuan, L. Nai, (2012). "Betavoltaic battery conversion efficiency improvement based on interlayer structures", Chinese Physics Letters 29.
- [157] L.D. Partain, (1995). "Solar cell fundamentals, in Solar Cells and Their Application", Partain, L.D., Ed., John Wiley & Sons, Chichester, chap. 1
- [158] H. Chen, L. Jiang, X. Chen, (2011). "Design optimization of GaAs betavoltaic batteries", Journal of Physics D: Applied Physics 44.
- [159] H. Gao, S. Luo, H. Zhang, H. Wang, Z. Fu, (2013), "Demonstration, radiation tolerance and design on a betavoltaic micropower", Energy 51, 116-122.
- [160] Z. Cheng, X. Chen, H. San, Z. Feng, B. Liu, (2012). "A high open-circuit voltage gallium nitride betavoltaic microbattery", Journal of Micromechanics and Microengineering 22.
- [161] G. ZUO, J. ZHOU, and G. KE, (2013). "A Simple theoretical model for ^{63}Ni betavoltaic battery", Appl. Radiat. Isot., vol. 82, s. 119–125.
- [162] S. R. Kurtz, P. Faine, J.M. Olson (1990). "Modeling of two-junction, series-connected tandem solar cells using top-cell thickness as an adjustable parameter", J. Appl. Phys. 68, 1890-1895.
- [163] C.E., Munson M. Arif, J. Streque, S. Belahsene, (2015). "Model of Ni-63 battery with realistic PIN structure", J. Appl. Phys., vol. 118, no. 10, s. 1–8.
- [164] J. Zhang, S.-T. Lee, and B. Sun, (2014). "Effect of series and shunt resistance on organic-inorganic hybrid solar cells performance", Electrochim. Acta 146, 845–849.
- [165] A. Luque, S. Hegedus, (2003). "Handbook of Photovoltaik Science and Engineering", John Wiley and Sons Ltd, England, s. 102-113
- [166] H.K. Jung a, N.H. Lee, Y.S. Joo, C.W. Lee, (2006). "Betavoltaic Power Prediction by using a Monte Carlo Simulation", Korean Nuclear Society, Taejon (Korea, Republic of), 2006 autumn meeting of the KNS; Kyongju, Korea.
- [167] M.A. Green (1982). "Solar cells: operating principles, technology and system applications", Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- [168] D.E. Ergen, (2009), "Au/n-GaAs metal yariletken kontakların optik Özelliklerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [169] H. Guo, H. Yang, Y. Zhang, (2007). "Betavoltaic microbatteries using porous silicon", IEEE 20. International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, s. 867-870.
- [170] X.-B. Tang, L. Hong, Z.-H. Xu, Y.-P. Liu, D. Chen, (2015). "Temperature effect of radioluminescent nuclear battery based on $^{147}\text{Pm}/\text{ZnS: Cu/GaAs}$ ", Appl. Radiat. Isotopes 97, 118-124.

- [171] Z.M. Chen, J.N. Wang, (1999). “Basic Material Physics for Semiconductor Devices”, Science Publishing Company, China.
- [172] G. Wang, R. Hu, H. Wei., H. Zhang, Y. Yang, X. Xiong, G. Liu, S. Luo, (2010). “The effect of temperature changes on electrical performance of the betavoltaic cell”, Appl. Radiat. Isot., vol. 68, no. 12, s. 2214–2217.
- [173] Y. Liu, R. Hu, Y. Yang, G. Wang, S. Luo, and N. Liu, (2012). “Investigation on a radiation tolerant betavoltaic battery based on schottky barrier diode,” Appl. Radiat. Isot. 70(3), s: 438–441.
- [174] H. J. Hovel, and J.M. Woodall, (1972). “High-efficiency AlGaAs-GaAs solar cells”, Appl. Phys. Lett., 21, 379.
- [175] A.I. Nedelcescu, C. Carlone, A. Houdayer, H. Von Bardeleben, J.L. Cantin, S. Raymond, (2002). “Radiation hardness of gallium nitride”, IEEE Transactions on Nuclear Science 49, s:2733-2738
- [176] S. J. Pearton, J. C. Zolper, R. J Shul, F. Ren, (1999). “GaN: Processing, defects, and devices”, J. Appl. Phys., 86, 1.
- [177] M. Lu, G. Wang, C.S. Yao, (2011). “Gallium nitride for nuclear batteries”, Adv Mater Res, s: 343-344, 56–61.
- [178] M. Mohamadian, S. Fegghi, H. Afarideh, (2007). “Conceptual design of GaN betavoltaic battery using in cardiac pacemaker”, Proceedings of 13th International Conf. on Emerging of Nuclear Energy Systems (ICENES), Istanbul, Turkiye.
- [179] J. Granta, R. Batesa, W. Cunninghama, (2007). “Review of using gallium nitride for ionizing radiation detection”, Nucl Instrum Meth A, 576, s: 60–65.
- [180] S. K. Chaudhuri, K. J. Zavalla, and K. C. Mandal, (2013). “Experimental determination of electron-hole pair creation energy in 4H-SiC epitaxial layer: An absolute calibration approach”, Appl. Phys. Lett., vol. 102, no. 3.
- [181] F. Li, X Gao, Y. Yuan, J. Yuan, M. Lu. (2014), “GaN PIN betavoltaic nuclear batteries”, Science China Technological Sciences: Nuclear Sci and Technology, 57(1):25–28.
- [182] Gallium Nitride, <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaN/ebasic.html>
- [183] V. V. Bochkarev, G. B. Radsievsky, L. V. Timofeev, and N. A. Demianov, (1972). “Distribution of absorbed energy from a point beta source in a tissue-equivalent medium”, Int. J. of Applied Radiation and Isotopes, 23, 493.
- [184] Interactive Chart of Nuclides, <https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>
- [185] J. A. Tompkins, E. Lewis, (1990). “Tritide based radioluminescent light sources”, Radioluminescent Lighting Technology. Technology Transfer Conference Processing, DOE, Annapolis, MD.

- [186] Isotope products., <http://ritverc.com/>
- [187] G.N., Yakubova, (2010). “Nuclear Batteries with Tritium and Promethium-147 Radioactive Sources”, Doktora Tezi, Urbana-Champaign-Illinois Üniversitesi, ABD.
- [188] Sekonder Emisyon, http://en.wikipedia.org/wiki/Secondary_emission
- [189] J. C. Trump, and R.J.Van de Graaff, (1949). “The secondary Emission of Electrons by High Energy Electrons”, *Physical Review* 75 (1), 44.
- [190] Y. C. Yong, and J.T.L. Thong, (2000). “Determination of Secondary Electron Spectra from Insulators”, *Scanning* 22, 161.
- [191] D. C. Joy, (2008). “A Database of Electron-Solid Interactions,” <http://web.utk.edu/~srcutk/htm/interact.htm>
- [192] Y. Kishimoto, T. Ohshima., (1990). “A Consideration of Secondary Electron Emission from Organic Solids”, *Journal of Applied Polymer Science* 39, 2055.
- [193] J. Cazaux, (2005). “A new model of dependence of secondary electron emission yield on primary electron energy for application to polymers”, *Journal of Physics D: Applied Physics* 38, 2433.
- [194] G. Archard, (1961). “Backscattering of Electrons”, *Journal of Applied Physics* 32, 1505
- [195] T. Tabata, R. Ito, and S. Okabe, (1971). “An empirical equation for the backscattering coefficient of electrons”, *Nuclear Instruments and Methods* 94, 509.
- [196] S. Shionoya and W.M.Yen, Eds., (1999). “Phosphor Handbook,” *CRC Press LLC*, Boca Raton, Fl.
- [197] E. J. Sternglass, (1954). “Backscattering of Kilovolt Electrons from Solid”, *Physical Review* 95 (2), 345.
- [198] Device Simulation. Santa Clara: Silvaco, 2010.
- [199] Swirhun, S. E., Kwark, Y. H., Swanson, R. M. (1986). “Measurement of Electron Lifetime, Electron Mobility and Bandgap Narrowing in Heavily Doped p-Type Silicon”, *Solid State Electronics Laboratory*, Stanford University.
- [200] Laurie Waters, Ed., MCNPX User’s Manual, Version 2.5.0, Los Alamos National Laboratory.
- [201] M. Farahmand, C. Garetto, E. Bellotti E, K. Brennan, M. Gaono, E. Ghillino, G. Ghione, J. Albrecht, P. Ruden, (2001). “Monte Carlo simulation of electron transport in the III-nitride wurtzite phase materials system: binaries and ternaries”, *IEEE Trans. Electron Devices*, 48(3):535–542.
- [202] J. D Alamo, S. Swirhun, R. M. Swanson, (1985). “Simultaneous Measurement of Hole Lifetime, Hole Mobility and Bandgap Narrowing in

Heavily Doped n-Type Silicon”, Solid State Electronics Laboratory, Stanford University CH2252-5185/0000-0290.

- [203] J. Wang, P. Mulligan, L. Cao, (2014). “Transient current analysis of a GaN radiation detector by TCAD”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 761:7–12.
- [204] M. Py, C. Zellweger, V. Wagner, J. Carlin, H Buehlmann, M. Ilegems, (2005) “Characterization of deep levels in n-GaN by combined capacitance transient techniques”, Phys Stat Sol. (A)., 202(4):572–577.
- [205] M. Asif Khan, J. N. Kuznia, D. T. Olson, M. Blasingame, and A. R. Bhattacharai, (1993). “Schottky barrier photodetector based on Mg-doped p-type GaN films”, Appl. Phys. Lett., 63, 2455.
- [206] A. Y. Polyakov, N. B. Smirnov, A. V. Govorkov, V. I. Vdovin, A. V. Markov, A. A. Shlensky, E. Prebble, D. Hanser, J. M. Zavada, and S. J. Pearton, (2007). “Properties of Fe-doped, thick, freestanding GaN crystals grown by hydride vapor phase epitaxy”, J. Vac. Sci. Technol. B 25(3), 686–690.
- [207] F. Smits, (1958). "Measurement of sheet resistivities with the four-point probe." Bell Syst. Tech. J 37(3): 711-718.
- [208] A. Wickenden, D. Koleske, R. Henry, M. Twigg, (2004). “M. Resistivity control in unintentionally doped GaN films grown by MOCVD”. Journal of Crystal Growth, 260(1–2):54–62.
- [209] A. Polyakov, I. Lee, N. Smirnov, A. Govorkov, E. Kozhukhova, S. Pearton, (2011). “Comparison of hole traps in n-GaN grown by hydride vapor phase epitaxy, metal organic chemical vapor deposition, and epitaxial lateral over growth”, J Appl Phys. 109(12):123701.
- [210] W. C. Parker, (1973). “Preparation of thin films of promethium-147 by means of coelectrodeposition”, Radiochemical and Radioanalytical Letters, 13, (2), 89.
- [211] Y.R. Uhm, K.J. Son, K.Y. Park, B.G. Choi, J.S. Lee, (2014). “The effect of Ni seed layer for electroplating ⁶³Ni in radioisotope battery”, Springer Proceedings in Energy of the 2nd International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials, Oludeniz Türkiye.
- [212] LabVIEW User Manual, National Instruments, USA, 2008.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

İletişim Bilgisi: selimaydin571@gmail.com

Makaleler

1. S. Aydın, E. Kam, (2019). “Investigation of Nickel-63 Radioisotope-Powered GaN Betavoltaic Nuclear Battery”, International Journal of Energy Research.

Konferans Bildirileri

1. E. Kam, S. Aydın, “Experimental Investigation of Ni-63 Radioisotope-Powered Betavoltaic Nuclear Battery” Energy Conversion & Storage – II, Dünya Enerji Stratejileri Kongresi ve Fuarı 2019 (WESCE-2019), 2019.

2. E. Kam, S. Aydın, “Demonstration of a Betavoltaic Cell with Promethium (Pm-147) Radioisotope”, The International Conference on Material Science and Technology in Kızılcahamam (IMSTEC 2019), Ankara, Türkiye, 2019, ss:17.

Projeler

1. Radyoizotop Tabanlı Doğrudan Dönüştüren Betavoltaik veya Dolaylı Dönüştüren Fotovoltaik Nükleer PİL Geliştirilmesi ve Enerji Dönüşüm Veriminin Deneysel İncelemesi, YTÜ BAP Projesi, 2019