



GİRESUN
ÜNİVERSİTESİ



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÜNEŞ PİLLERİNDE KULLANILAN
METAL/ORGANİK/İNORGANİK YAPILARIN
KAPASİTANS-GERİLİM PARAMETRELERİ ÜZERİNE
GAMA RADYASYONUNUN ETKİSİ**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

Yüksek Lisans Tezi

Tuba ÖZTÜRK

20152108004

Haziran 2019

GİRESUN

**T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GÜNEŞ PİLLERİNDE KULLANILAN
METAL/ORGANİK/İNORGANİK YAPILARIN
KAPASİTANS-GERİLİM PARAMETRELERİ ÜZERİNE
GAMA RADYASYONUNUN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuba ÖZTÜRK

Enstitü Anabilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Serdar KARADENİZ

Haziran 2019

**T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GÜNEŞ PİLLERİNDE KULLANILAN
METAL/ORGANİK/İNORGANİK YAPILARIN
KAPASİTANS-GERİLİM PARAMETRELERİ ÜZERİNE
GAMA RADYASYONUNUN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuba ÖZTÜRK

Enstitü Anabilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği

Bu tez 25/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.



**Prof. Dr.
Sema BİLGE OCAK
Jüri Başkanı**



**Prof. Dr.
Serdar KARADENİZ
Üye**



**Doç. Dr.
Behzad BARIŞ
Üye**

**Doç. Dr.
Bahadır KOZ
Enstitü Müdürü**

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Tuba ÖZTÜRK

25/06/2019

TEŞEKKÜR

Bu tez konusunu seçerken isteklerimi göz önünde bulundurup bana yardımcı olan ve tez çalışmasının gerçekleştirilmesi sırasında değerli bilgilerini paylaşan bana faydalı olabilmek için elinden gelenden fazlasını sunan danışman hoca statüsünü hakkıyla yerine getiren Prof. Dr. Serdar KARADENİZ’e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Hayatımın her döneminde maddi manevi beni destekleyen ve tez hazırlama sürecinde de beni yalnız bırakmayan sevgili anneme, babama, kardeşlerime, değerli büyüklerim anneannem, babaannem ve dedeme ilgileri ve sabırları için sonsuz minnetlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	I
İÇİNDEKİLER	II
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ	IX
TABLolar LİSTESİ	XII
ÖZET	XIII
SUMMARY	XIV
 BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	 1
 BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	 3
2.1. Yarıiletkenler.....	4
2.2. Katkılı Yarıiletkenler.....	7
2.3. Metal-Yarıiletken (Schottky) Kontaklar	8
2.3.1. Metal/ <i>p</i> -tipi yarıiletken kontaklar	9
2.3.2. Metal <i>p</i> -tipi yarıiletken omik kontak.....	11
2.4. İdeal Metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) Tipi Schottky Diyotların Yapısı.....	13
2.5. İnce Film Üretim Teknikleri.....	16
2.5.1. Buhar fazda büyütme.....	17
2.5.1.1 Fiziksel buhar biriktirme.....	17
2.5.1.2 Buharlaştırma.....	17
2.5.2. Döndürme ile kaplama yöntemi (Spin coating).....	18
2.6. Arayüzey Durumları.....	19
2.7. Kapasitans-Gerilim (<i>C-V</i>) Karakteristikleri.....	20
2.8. Seri Direnç.....	22

2.9. Radyasyonun Madde Üzerine Etkileri.....	22
2.9.1 Gama radyasyonunun maddeyle etkileşmesi.....	23
2.9.1.1 Fotoelektrik etki.....	24
2.9.1.2. Compton olayı.....	25
2.9.1.3. Çift oluşumu.....	28
 BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM	29
3.1. Kristal Temizliği.....	29
3.2. Al/coronene/ <i>p</i> -Si/Al Yapılarının Hazırlanması.....	32
3.2.1. Omik kontakın oluşturulması.....	32
3.2.2. Coronene arayüzey tabakasının oluşturulması.....	35
3.2.3. Doğrultucu kontakın oluşturulması.....	36
3.3. Kullanılan Ölçüm Cihazları ve Düzenekleri.....	36
 BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI	38
4.1. Kapasitans Spektroskopisi ve Temel Parametre Tayini.....	38
4.1.1. Gerilime bağlı ölçümler.....	38
4.1.2. Radyasyon sonrası ölçümler.....	49
4.1.3. Frekansa bağlı ölçümler.....	56
 BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ	60
 KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Al	: Alüminyum
Au	: Altın
Ag	: Gümüş
A	: Diyot kontakt alanı
CdS	: Kadmiyumsülfür
^{60}Co	: Kobalt
C_{HF}	: Yüksek frekans kapasitesi
C_{LF}	: Düşük frekans kapasitesi
C_2	: Taşıyıcı yoğunluğuna bağlı parametre
C_{m}	: Ölçüm kapasitesi
C_{c}	: Düzeltilmiş kapasite
$C_{\text{m, acc}}$	: Biriktirme bölgesinde ölçülen kapasite
C_{i}	: Arayüzey tabakasının kapasitesi
D_{it}	: Arayüzey tuzak yoğunluğu
$\Delta\lambda$	: Saçılan ve gelen fotonun dalga boyları arasındaki fark
$\Delta\Phi_{\text{B}}$	: Schottky alçalması
δ	: Arayüzey tabakasının kalınlığı
E_{c}	: İletkenlik bandının enerji seviyesi
E_{v}	: Değerlik bandının enerji seviyesi
E_{ss}	: Arayüzey durumlarının enerjisi
E_{F}	: Fermi enerji seviyesi
E_{m}	: Maksimum elektrik alan

E'	: Saçılan foton enerjisi,
E^e	: Geri tepen elektronun enerjisi
E_s	: Vakum seviyesi ile yarıiletkenin dolu bandının tepesi arasındaki enerji farkı
E_f	: Fermi enerjisi
E_i	: Saf durum enerji seviyesi
ϵ_s	: Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ϵ_0	: Boşluğun elektriksel geçirgenliği
ϵ_i	: Arayüzey tabakasının dielektriksabiti
E_{foton}	: Foton enerjisi
E_b	: Elektronun bağlanma enerjisi
E_k	: Fotoelektronun kinetik enerjisi
$E_{(x)}$	: Schottky bölgesindeki elektrik alanı
E_g	: Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
Ψ_B	: Saf yarıiletkenin fermi enerji seviyesi (E_i) ile p tipi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi (E_f) arasındaki enerji farkı
ϕ_m	: Metalin iş fonksiyonu
ϕ_s	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
ϕ_B	: Engel yüksekliği
ϕ_{ms}	: Metal ve yarıiletken arasındaki iş fonksiyonlarının farkı
ϕ_F	: Gerçek Fermi enerji seviyesi ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkı
ϕ_e	: Etkin engel yüksekliği
$G_{m,\text{maks}}$	: Biriktirme bölgesinde ölçülen maksimum iletkenlik
G_m	: Ölçüm iletkenliği
G_c	: Düzeltilmiş iletkenlik
$G_{m,\text{acc}}$	: Biriktirme bölgesinde ölçülen iletkenlik
Ge	: Germanyum

GaAs	: Galyum arsenit
H ₂ O ₂	: Hidrojen peroksit
h	: Planck sabiti
HF	: Hidroflorik asit
InSb	: İndiyum antimon
k	: Boltzmann sabiti
K	: Kelvin sıcaklık birimi
$\lambda_{\text{saçılan}}$	: Saçılan fotonun dalga boyu
λ_{gelen}	: Gelen fotonun dalga boyu
m^*	: Deşiklerin etkin kütlesi
m_0	: Serbest elektron kütlesi
m_e	: Elektronun kütlesi
μ_p	: Deşik mobilitesi
ν_{gelen}	: Gelen fotonun frekansı
$\nu_{\text{saçılan}}$	: Saçılan fotonun frekansı
N_{ss}	: Arayüzey durum yoğunluğu
N_v	: Değerlik bandındaki etkin durum yoğunluğu
N_a	: Alıcı atomlarının yoğunluğu
N_{deneysel}	: Deneysel taşıyıcı yoğunluğu
N_{teorik}	: Teorik taşıyıcı yoğunluğu
NH ₄ OH	: Amonyum hidroksit
Q	: Yarıiletkende oluşan yük yoğunluğu
q	: Elektronik yük
R_s	: Seri direnç
ρ	: Özdirenç
Si	: Silisyum
T	: Kelvin cinsinden sıcaklık

θ	: Fotonun saçılma açısı
V_0	: Kesme voltajı
V_{bi}	: Difüzyon potansiyeli
V	: Uygulanan harici beslem
V_n	: Gerçek Fermi enerji seviyesi ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkı
V_d	: Difüzyon potansiyeli
w	: Açısal frekans
W_D	: Tüketme bölgesinin genişliği
X	: Yarıiletken elektron yatkınlığı
$C-V$	: Kapasitans-gerilim
$C-f$	: Kapasitans-frekans
$C^{-2}-V$	: Ters kapasitans-gerilim
dc	: Doğru akım
$G-f$	: İletkenlik-frekans
$G-V$	: İletkenlik-gerilim
Hz	: Hertz (frekans birimi)
kGy	: Kilogray (radyasyon dozu birimi)
kHz	: Kilohertz
MeV	: Mega elektron volt
MHz	: Megahertz
n -Si	: N tipi silisyum
p -Si	: P tipi silisyum
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
MS	: Metal/yarıiletken
MIS	: Metal/yalıtkan/yarıiletken
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
RCA	: Amonyum hidroksit ve hidrojen peroksitten oluşan çözelti

THF : Tetrahidrofuran



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Bir yarıiletkenin enerji bant diyagramı.....	6
Şekil 2.2. Bir Schottky kontağın şematik görünümü.....	9
Şekil 2.3. Metal/ <i>p</i> -tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji bant diyagramları: a)Kontakt olmadan önce, b) Kontakt olduktan sonra ve termal dengede, c) $V>0$ olması durumunda, d) $V<0$ olması durumunda [3].....	10
Şekil 2.4. Metal/ <i>p</i> -tipi yarıiletken omik kontağın enerji-bant diyagramı: a) Kontakt yapılmadan önce b) Kontakt yapıldıktan sonra ve termal dengede, c) $V>0$ ve $V<0$ olması durumunda [3].....	12
Şekil 2.5. $V=0$ da ideal bir MIS yapının enerji-bant diyagramı: a) <i>p</i> tipi yarıiletken, b) <i>n</i> tipi yarıiletken.....	13
Şekil 2.6. İdeal bir <i>p</i> -tipi MIS yapıda $V\neq 0$ için enerji band diyagramları (a) biriktirme durumu (b) tüketme durumu (c) tersinim durumu [28].....	15
Şekil 2.7. Buharlaştırma yönteminin şematik gösterilişi [37,38].....	18
Şekil 2.8. Döndürme ile kaplama yapan cihaz [42].....	19
Şekil 2.9. Üç gamma ışını etkileşme işlemi ve bunların baskın olduğu bölgeler [47].....	23
Şekil 2.10. Fotoelektrik olayın şematik gösterimi [48].....	24
Şekil 2.11. Compton Saçılması [49].....	25
Şekil 2.12. Çift oluşumu [50].....	28
Şekil 3.1. <i>p</i> -tipi Silisyum kristali.....	29
Şekil 3.2. Kristal temizliğinde kullanılan ultrasonik temizleyici.....	30
Şekil 3.3. Deiyonize su sistemi.....	30
Şekil 3.4. Isıtıcıly manyetik karıştırıcı: a) $\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$ çözeltisi, b) Kristal ile reaksiyona girmiş RCA çözeltisi.....	31

Şekil 3.5. Termal buharlaştırma sistemi.....	32
Şekil 3.6. Kontaktların oluşturulmasında kullanılan maskeler: a) omik kontakt için, b) doğrultucu kontakt için.....	33
Şekil 3.7. Tungsten malzemeden yapılmış tel bir pota.....	34
Şekil 3.8. Coronene çözeltisi.....	35
Şekil 3.9. Al/coronene/p-Si/Al yapıları: a) Çeyrek wafer üzerinde, b) şematik diagram	36
Şekil 3.10. “Keysight E4990A” marka Impedance Analyzer cihazı ve ölçüm düzeneği.....	37
Şekil 4.1. Al/coronene/p-Si/Al Schottky yapısının 1MHz sabit frekansta çizilmiş eğrileri: a) kapasitans-gerilim ve b) iletkenlik-gerilim.....	40
Şekil 4.2. Al/coronene/p-Si/Al Schottky yapısının voltaja bağlı seri direnç eğrisi...	42
Şekil 4.3. Seri direnç etkisi dikkate alınarak yeniden elde edilmiş voltaja bağlı a) kapasitans, b) iletkenlik eğrileri.....	43
Şekil 4.4. Al/coronene/p-Si/Al Schottky yapısının seri direncin etkisi çıkarılarak elde edilmiş C^{-2} -V grafiği.....	45
Şekil 4.5. Al/coronene/p-Si/Al Schottky yapılarının radyasyon öncesi ve sonrası kapasitans-gerilim eğrileri.....	50
Şekil 4.6. Al/coronene/p-Si/Al Schottky yapılarının radyasyon öncesi ve sonrası iletkenlik-gerilim eğrileri.....	51
Şekil 4.7. Al/coronene/p-Si/Al Schottky yapılarının radyasyon öncesi ve sonrası C^{-2} -V grafiği.....	52
Şekil 4.8. Al/coronene/p-Si/Al Schottky yapılarının radyasyon öncesi ve sonrası voltaja bağlı seri direnç eğrileri.....	53
Şekil 4.9. Al/coronene/p-Si/Al Schottky yapısının iyonize radyasyon öncesi ve sonrası arayüzey durum yoğunluklarının enerjiye bağlı dağılımı.....	54
Şekil 4.10. Al/coronene/p-Si/Al Schottky yapısının yüksek frekans-düşük frekans kapasitans yöntemi ile elde edilmiş enerjiye bağlı iyonize radyasyon öncesi ve sonrası arayüzey durum yoğunluğu dağılımı.....	56
Şekil 4.11. Al/coronene/p-Si/Al Schottky yapısının iyonize radyasyon öncesi ve sonrası frekansa bağlı kapasitans eğrileri.....	57

Şekil 4.12. Al/coronene/ <i>p</i> -Si/Al Schottky yapısının iyonize radyasyon öncesi ve sonrası frekansa bağlı iletkenlik eğrileri.....	58
Şekil 4.13. Al/coronene/ <i>p</i> -Si/Al Schottky yapısının iyonize radyasyon öncesi ve sonrası frekansa bağlı seri direnç eğrileri.....	59



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Bazı yarıiletkenlerin temel özellikleri [3].....	5
Tablo 2.2. İş fonksiyonlarına göre doğrultucu ve omik kontakların oluşumu.....	9
Tablo 4.1. Al/coronene/ <i>p</i> -Si/Al Schottky yapısının C^{-2} - V eğrilerinden elde edilen radyasyon öncesi V_{bi} , Φ_B , N_A , E_m , W_D ve R_s parametreleri.....	48
Tablo 4.2. Al/coronene/ <i>p</i> -Si/Al Schottky yapısının radyasyon öncesi ve sonrası ortalama arayüzey durum yoğunlukları.....	56

GÜNEŞ PİLLERİNDE KULLANILAN METAL/ORGANİK/İNORGANİK YAPILARIN KAPASİTANS-GERİLİM PARAMETRELERİ ÜZERİNE GAMA RADYASYONUNUN ETKİSİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, Schottky diyotlarının organik arayüzeyli olanları üretilmiş ve iyonize radyasyona bağlı temel elektriksel parametrelerindeki değişimler incelenmiştir. Bunun için p tipi bir silisyum alttabaka üzerine ince bir organik arayüzey tabakasının kaplanmasıyla metal/organik/inorganik yapılar oluşturulmuştur. Arayüzey tabaka olarak coronenen organik bileşiği kullanılmış olup, bu malzeme silisyum alttabaka üzerine dönerek kaplama yöntemiyle ince film şeklinde büyütülmüştür. Termal buharlaştırma yöntemiyle omik ve doğrultucu kontaklar oluşturulduktan sonra yapıların oda sıcaklığında ve karanlık ortamda gerilime ve frekansa bağlı kapasite ve iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerden elde edilen veriler yardımıyla yapının temel diyot parametreleri farklı teknikler kullanılarak incelenmiştir. Karakterizasyon işlemleri sonrasında yapılar, ^{60}Co gamma kaynağı kullanılarak 12 kGy'lik gamma ışınlarına maruz bırakılmış, ışınlama sonrası aygıtın temel parametrelerindeki değişimleri incelemek amacıyla karakterizasyon işlemleri tekrarlanmıştır.

Yapıların radyasyon öncesi ve sonrası gerilime bağlı iletkenlik ve kapasite eğrileri Schottky tipi davranış göstermiştir. İyonize radyasyon sonrası yapıların kapasite ve iletkenlik değerlerinde azalmalar, seri direnç değerlerinde ise artma meydana gelmiştir. Bu durum radyasyonun meydana getirdiği seri direnç etkilerine ve alıcı benzeri arayüzey tuzaklarının oluşmasına atfedilmiştir. İyonize radyasyon sonrası arayüzey durumları azalma göstermiş, bu durum değerlik bandının üst kısımlarında yerleşmiş donör benzeri aktif arayüzey durumlarının arayüzey tabaka tarafından pasifize edilmesine atfedilmiştir.

Anahtar kelimeler: Gama radyasyonu, kapasitans-voltaj, güneş pilleri, metal/organik/inorganik

THE EFFECT OF GAMMA RADIATION ON CAPACITANCE-VOLTAGE PARAMETERS OF METAL/ORGANIC/INORGANIC STRUCTURES USING IN SOLAR CELLS

SUMMARY

In this thesis work, Schottky diodes with organic interface were produced and ionized radiation dependent variations of basic parameters were investigated. For this, a metal/organic/inorganic structures were formed by coating a thin organic interface layer on *p* type silicon substrate. Coronene organic compound was used as an interface layer and this material was grown on *p* type silicon substrate as a thin film by using spin coating method. After formation of omic and rectifier contacts by thermal evaporation technique the voltage dependent capacitance and conductance measurements of structures were performed at room temperature and in a dark environment. By means of obtained data from the measurements the basic diode parameters were examined using different techniques. After characterization process, the structures were exposed to gamma rays of 12 kGy using a ^{60}Co gamma source and the characterization process was repeated in order to examine the changes of basic parameters after irradiation.

The voltage dependent capacitance and conductance curves of structures were showed a Schottky type behaviour before and after radiation. A decreasing was occurred in capacitance and conductance values and an increasing was occurred in series resistance values of structures after ionized radiation. This case was attributed to the series resistance effect and formation of acceptor-like interface states generated by radiation. On the other hand, the interface states were showed a decreasing after irradiation. This was attributed to pasivation of donor-like interface states by interfacial layer that located on the upper part of the valance band.

Keywords: Gamma radiation, capacitance-voltage, solar cells, metal/organic/inorganic

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Metal/yarıiletken Schottky kontaktları oldukça önemli devre elemanları olup, yarıiletken teknolojisinin gelişim sağlamasıyla farklı kullanım alanları bulmuşlardır. Bu kullanım alanları genellikle frekansı yüksek işaretlerin doğrultulması yada biçimlendirilmesi şeklindedir. Anahtarlama hızları yüksek, gerilimleri pn eklemlere göre daha küçük olmakla birlikte güç kayıpları azdır.

Schottky aygıtları bir metal ve bir yarıiletkenin birbiriyle kontakt yapılması sonucu elde edilir. Bu tip yapılarda silisyum (Si), germanium (Ge) ve galyum arsenit (GaAs) en çok kullanılan yarıiletkenlerdir. Bu yapıların akım iletimini çoğunluk taşıyıcıları sağlar. Kontak dirençleri oldukça düşük olduğu için doğru beslem uygulandığında çok küçük voltajlarda bile ilettime geçerler. Diğer taraftan azınlık taşıyıcıları az olduğundan, ters beslem uygulandığında yapıdan geçen akım düşük ve gürültü seviyeleri azdır.

Bir metal/yarıiletken yapısının elektriksel özellikleri, arayüzey bir tabaka ile kontrol edilebilmektedir [1, 2]. Bir arayüzey tabakanın varlığı Schottky parametreleri üzerinde önemli bir rol oynayıp aygıtın performans ve kararlılığını belirler [3, 4].

Organik malzemeler üretim kolaylıklarından dolayı son yıllarda büyük ilgi görmüş ve Schottky diyotları, farklı organik malzemeler kullanılarak üretilmiştir. Diğer taraftan organik yarıiletken malzemeler ve bileşikleri kullanılarak Schottky diyotlar üretilmekte ve elektriksel özellikleri incelenmektedir. Düşük maliyet ve kolay üretim onları avantajlı kılmış, inorganik malzemelerin yerini almasını sağlamıştır. Schottky diyotunun performansı, bir metal-organik yarıiletken eklemesinin elektriksel ve elektronik karakteristiklerine bağlıdır. Sonuçta, metal ve organik yarıiletkenler arasındaki arayüzey elektronik özelliklerinin anlaşılması, malzeme uygulamaları için

önemlidir. Bu tez çalışmasında arayüzey tabaka olarak coronene organik bileşiği kullanılarak organik arayüzeyli Schottky yapıları üretilmiştir.

Bu tez çalışmasında, teknolojik öneme sahip Schottky diyotlarının organik arayüzeyli olanları üretilmiş ve iyonize radyasyona bağlı temel elektriksel parametrelerindeki değişimler incelenmiştir. Organik arayüzey olarak coronene bileşiği kullanılmış ve çok sayıda Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapıları oluşturulmuştur. Üretilen bu yapılar gama radyasyonuna maruz bırakılmış, radyasyon öncesi ve sonrası kapasite-gerilim (*C-V*) ve iletkenlik-gerilim (*G-V*) ölçümleri oda sıcaklığında ve karanlık ortamda alınmıştır. Temel diyot parametreleri ve elektriksel özellikler ilgili teoriler kullanılarak incelenmiş elde edilen sonuçlar karşılaştırılmalı olarak verilmiş ve yorumlanmıştır.

BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bilinen ilk metal/yarıiletken aygıt ince bir tel ile bir yarıiletkenin birbirine temas ettirilmesiyle oluşan nokta kontakt diyottur. 1874 yılında birçok metal/yarıiletken aygıtlar üretilerek elektronik devrelerde kullanılması sağlanmıştır [5].

Değişik biçimlerdeki nokta-kontakt doğrultucuların pratik uygulamaları 1904 yılının başlarında yapılmıştır [6]. 1931 yılında katıların band teorisine dayalı olarak yarıiletkenlerin akım iletim teorisi formüle edilmiştir [7] Bu teori, daha sonra, metal/yarıiletken kontaklara uygulanmıştır. 1938'de metal yarıiletken yapıdaki potansiyel engelin, kimyasal bir tabaka olmayıp, sadece yarıiletken içerisindeki kararlı uzay yüklerinden kaynaklandığını ileri sürülmüştür [8]. Bu düşünceden doğan model Schottky engeli olarak bilinir. 1938'de yarıiletken kontaklar için uygun olan ve Mott engeli olarak bilinen bir teori geliştirilmiştir [9].

1957 yılında doğrultucu metal/yarıiletken kontakların temel teorisi ve tarihi gelişimi bir kitapta toplanarak yayınlanmış ve literatüre sunulmuştur [10].

Metal-yarıiletken (MS) Schottky kontaklar, elektronik ve optoelektronik alanlarda kullanılan önemli bir aygıt olup, yüksek anahtarlama hızından dolayı da yüksek frekans uygulamalarında kullanılmaktadır. N tipi veya p tipi yarıiletkenler, MS, metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) veya metal/polimer/yarıiletken (MPS) yapıların hazırlanmasında kullanılırlar. Metal olarak genellikle altın (Au), gümüş (Ag) ve alüminyum (Al) gibi metaller yüksek saflıkta kullanılırken yarıiletken olarak, daha ucuz ve kararlı olmasından dolayı genelde silisyum (Si) tercih edilir.

Metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) kontakların elektriksel özellikleri metal ile yarıiletken arasında bulunan ara yüzey malzemesine bağlı olarak değişebilir. Metal-

yarıiletken kontakların ara yüzey durumları engel yüksekliği, idealite faktörü gibi diyota ait birçok parametreyi değiştireceğinden kullanılan ara yüzey malzemesi doğrudan malzemenin özelliklerini, performansını ve verimini etkiler [3, 11].

Birçok araştırmacı Schottky kontağın elektriksel özelliklerini modifiye etmek için ara yüzey malzemesi olarak organik malzeme kullanmak suretiyle çalışmalar yapmıştır [12-14].

Forest ve ark. [15], ara yüzey malzemesi olarak organik bileşik ve yarıiletken olarak da *p*-Si kullanarak organik Schottky kontakları hazırlamışlardır. Schottky diyotların akım-gerilim karakteristiklerinin kontak yapılırken kullanılan metale bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

1964’lerde metal/yarıiletken yapılar için görüntü kuvvet etkisiyle engel alçalması bulunmuştur [16, 17].

C. Barret ve arkadaşları Schottky’nın difüzyon ve Bethe’nin termiyonik emisyon teorilerini “emisyon-difüzyon teorisi” adı altında tek bir teori şeklinde ortaya koymuşlardır [18]. Si-metal diyotların doğru beslem admittans ölçümlerinden, arayüzey hallerinin yoğunluk dağılımını ve durulma zamanını belirlemişlerdir. Metal/yalıtkan/yarıiletken tünel diyotlarının elektriksel özellikleri admitans ve düşük frekans görüldü ölçümleri göz önüne alınarak artık kapasite Rhoderick ve Williams tarafından incelenmiştir [19]. Chattopodhyay ve RayChaudhuri, *C-V* karakteristiklerinde gözlenen kapasite pikini seri direnç etkisine atfetmişlerdir [20].

2.1. Yarıiletkenler

Elektrik akımını geçiren türler arasında elektronik geçişli ve iyonik geçişli iletkenler mevcuttur. Metal malzemelerde elektrik akımı taşıyan parçacıklar elektronlardır. İyonik iletkenlerde elektrik akımı malzemenin iyonları ile taşındığı için iletkenin yapısı içinden geçen akımla değişmektedir. Yarıiletken malzemeler hem iyon iletkenliğine hem de elektronlara sahiptirler. Silisyum, germanyum, selenyum ve telluryum gibi yarıiletkenler malzemeler ve GaP, InSb, GaAs ve CdS gibi bileşik

yarıiletkenler elektron iletkenliğine sahiptir. Tablo 2.1.'de bazı yarıiletkenlerin özellikleri verilmiştir [3].

Yarıiletkenlerde ısı enerjisi etkisiyle deşiklerin ve elektronların (serbest yük taşıyıcıların) konsantrasyonu artar. Bu yöntemle meydana gelen yük taşıyıcılarına dengeleyici veya ısısal yük taşıyıcıları denir. Yarıiletkenlerde, serbest yük taşıyıcıları ışık, elektrik alan, basınç, gama-ışınları veya hızlı parçacıkların (proton, nötron, elektron vb.) etkisiyle oluşabilir. Bu şekilde oluşmuş yük taşıyıcılarına denkleştirilmemiş yük taşıyıcıları adı verilir.

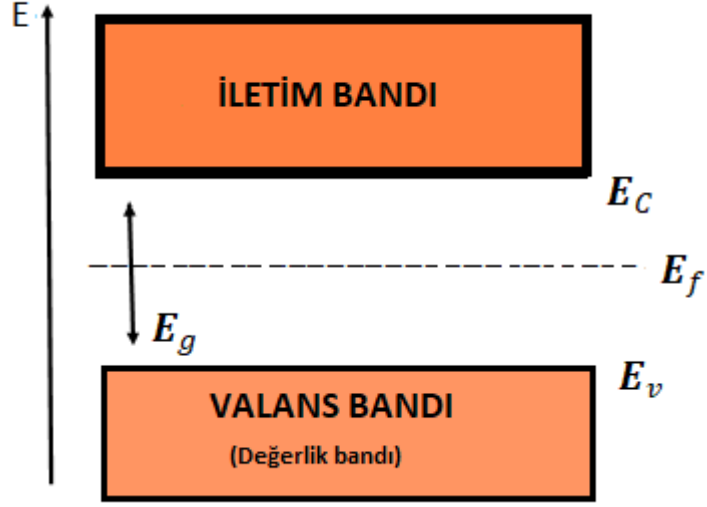
Metallerde atomlar tam olarak iyonlaşmış durumdadırlar ve elektronların konsantrasyonu 10^{22} cm^{-3} civarında olup, atomların konsantrasyonuna eşittir. Bu yüzden dış etkilere karşı metallerin etkileri çok az değişmektedir. Katkısız yarıiletkenlerde serbest elektronların konsantrasyonu 10^{13} ile 10^{15} cm^{-3} mertebesinde Yarıiletken atomlarının elektrik alanı, ışık veya basınç gibi dış etkilere iyonlaşması sonucu serbest elektron konsantrasyonları değişir.

Yarıiletkenlerin kristal yapısına çok az miktarda ($10^{-3} - 10^{-8}$) katkı atomları yerleştirdiğimizde bu atomlar yarıiletkenin iletkenliğini 10^8 katına kadar değiştirebilirler. Bu yüzden oda sıcaklığında yarıiletkenin öz direnci 10^{-4} ile $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ olabilir.

Tablo 2.1. Bazı yarıiletkenlerin temel özellikleri [3]

	C	Ge	Si
Yasak enerji bant aralığı (eV)	5,47	0,66	1,12
Deşikler için mobilite ($\text{cm}^2/\text{V-s}$)	1200	1900	500
Elektronlar için mobilite ($\text{cm}^2/\text{V-s}$)	1800	3900	1450

Bir yarıiletkenin iletkenlik ve değerlik bantlarından oluşan enerji bant diyagramı Şekil 2.1.'de görülmektedir. E_v değerlik bandının maksimum enerjisi, E_c iletkenlik bandının minimum enerjisi ve E_g ise iki nicelik arasındaki bölge yani yasak enerji bant aralığıdır.



Şekil 2.1. Bir yarıiletkenin enerji bant diyagramı

Her maddenin (iletken, yalıtkan, yarıiletken gibi) valans elektronlarının belirli bir enerji seviyesi vardır ve buna valans bandı enerjisi adı verilir. Valans elektronunu atomdan ayırabilmek için verilmesi gereken bir enerji miktarı vardır. Bu enerji, iletkenlik bandı enerjisi olarak tanımlanır. Maddeler elektronların bu banda geçmesiyle iletken hale gelirler. İletkenlerin, valans bandı enerji seviyesi ile iletkenlik bandı enerji seviyesi bitişiktir. Bu nedenle verilen küçük bir enerjiyle, pek çok valans elektronu serbest hale geçer. Yarı iletkenlerin valans bandı ile iletkenlik bandı arasında belirli boşluk bandı vardır. Elektron bakımından boş bulunan ve valans bandındaki elektronların iletkenlik bandına geçmesini zorlaştıran boşluğa yasak enerji bant aralığı adı verilir. Yarı iletkeni, iletken hale geçirebilmek için valans elektronlarına, boşluk bandı kadar bir ek enerji vermek gerekir.

E_f (Fermi Enerji Seviyesi) katkılanırlmamış bir yarı iletkenin enerji bant aralığının ortasında kabul edilmiştir. Fermi enerji seviyesi malzeme içerisindeki elektronların sıfır Kelvin'deki (K) maksimum enerjileridir. Sıfır Kelvin sıcaklığında Fermi enerji seviyeleri altında izin verilen tüm enerji seviyeleri elektronlar tarafından etkisiz hale getirilmiş olup, bu seviye üstündeki tüm enerji seviyeleri boştur. Yani Fermi Enerji seviyesi elektronlar tarafından yarı yarıya dolu bir enerji seviyesi olarak da kabul edilebilir. Bir yarıiletkende iletkenlik bandı tamamen boş iken, sıfır Kelvinde değerlik bandı elektronlarla tamamen doludur. Bu durum yalıtkanlar için de

geçerlidir. Bu yüzden Fermi seviyesi enerji bant aralığı içerisinde herhangi bir yerde bulunabilir. Metal malzemelerde ise Fermi enerji seviyesi enerji bantları ile birbirlerine yakın durumdadırlar.

2.2. Katkılı Yarıiletkenler

Bir yarıiletken malzemenin yük taşıyıcılarının (elektronların) sayısı ile boşlukların sayısının eşit olmadığı durumlarda meydana gelen yarıiletken malzemelere “katkılı yarıiletken” denir. Katkılama, yarıiletken bir malzemenin elektriksel özelliklerini değiştirmek, malzeme içerisindeki elektron ya da deşik yoğunluğunu arttırmak için kristali oluşturan atomların bir kısmının yerine farklı ve uygun miktarda safsızlık (katkı) atomunun eklenmesidir [21].

Yani iletkenliği kontrollü olarak arttırmak için saf yarıiletken malzemeye katkı maddesi eklenir. Germanyum ve silisyum elementlerinin iletkenliğini kontrollü olarak arttırmak amacıyla yarıiletkenlere katkı maddesi eklenir ve bu yapılan işleme “doping” adı verilir [21].

Elektron veya boşluk (akım taşıyıcılarının) sayısının artırılması malzemenin iletkenliğini, azaltılması ise malzemenin direncini artırır. Her iki doping olayı sonucunda n tipi ve p tipi yarıiletken malzemeler oluşur. Yarıiletken malzeme alıcı (akseptör) atomları ile katkılандığı durumda p tipi yarıiletken olarak adlandırılır. P tipi katkılama işleminde silisyum atomuna bor, fosfor veya arsenik gibi elementler katılmış ve kovalent bağ oluşturmuş ise silisyum elementinin son yörüngesinde bulunan bir elektron diğer atomunun kovalent bağ yapacak elektronu kalmadığından dolayı açıkta kalır. Bu açıkta kalan elektron katıldığı malzeme içerisindeki elektronlarla bağ yaparak geride elektron boşluklarının oluşmasına sebep olur. Katıldığı malzemedan elektron alan bu tür safsızlıklara alıcı (akseptör) ve oluşan bu yeni malzemeye de p tipi yarıiletken adı verilir.

Yarıiletken malzeme verici (donör) atomları ile katkılандığı durumda ise n tipi yarıiletken olarak adlandırılır. Bu durumda da saf bir yarıiletken malzemeye,

periyodik tablonun beşinci sütununda bulunan fosfor, bizmut veya arsenik gibi elementlerden biri katılırsa silisyum elementinin son yörüngesinde bulunan dört elektron ile diğer atomunun son yörüngesinde bulunan elektronlar kovalent bağ yapar ve sonuçta bir elektron açıkta kalır ve bağ yapacak silisyum elektronu bulamaz. Bu elektron küçük bir ısı enerjisiyle iletkenlik bandına doğru hareket ederek yapının iletkenliği artırır. Bu durumda yarıiletkende elektron fazlalığı oluşmuş olur. Elektronların çoğalmasına neden olan bu katkı atomlarına verici, bu yarıiletkene de n tipi yarıiletken adı verilir.

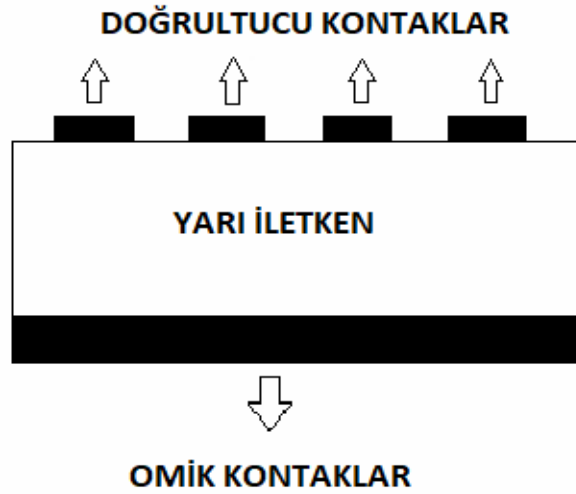
2.3. Metal-Yarıiletken (Schottky) Kontaklar

Metal, yarıiletken ve yalıtkan maddelerin iletkenlik özelliklerinin incelenmesi, bu malzemelere uygun kontakların yapılması ile mümkündür [22]. Kontak, genel anlamda iki maddenin en az dirençle (idealde sıfır) birbirine temas etmesi şeklinde düşünülür. Temas eden yüzeylerin temiz, pürüzsüz ve parlak olması ile ideal bir kontak elde edilir [1,11]. Metal/yarıiletken kontaklarda bu iki malzeme temas ettirilip yük alışverişi ile Fermi enerji seviyesinin eşit olması sağlanır. Fermi enerji seviyesi eşit olduğunda termal denge sağlanmış olur. Daha sonra yeni bir yük dağılımı meydana gelir. Bu iki malzeme arasında başka bir malzeme olmaksızın oluşan yeni sisteme metal/yarıiletken kontakt (Schottky kontağı) adı verilir.

Schottky kontaklar, kullanılan malzemelerin iş fonksiyonlarına göre iki gruba ayrılır:

- Metal/yarıiletken kontaklarda taşıyıcı hareketinin bir taraftan diğer tarafa göre daha fazla olduğu doğrultucu kontakt,
- Metal/yarıiletken kontaklarda taşıyıcıların her iki yöne de kolayca geçebildiği omik kontakt

Şekil 2.2.'de bir metal/yarıiletken kontağın şematik diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.2. Bir Schottky kontağın şematik görünümü

Seçilen bir metalin kontak haline getirildiği yarıiletken tipi (n tipi yada p tipi kontaklar) ve yarıiletkenin iş fonksiyonları birbirlerine bağlıdır. Yarıiletkenin iş fonksiyonu ϕ_s , metalin iş fonksiyonu ise ϕ_m ile temsil edilir. Tablo 2.2.'de doğrultucu ve omik kontakların oluşuma durumu gösterilmiştir.

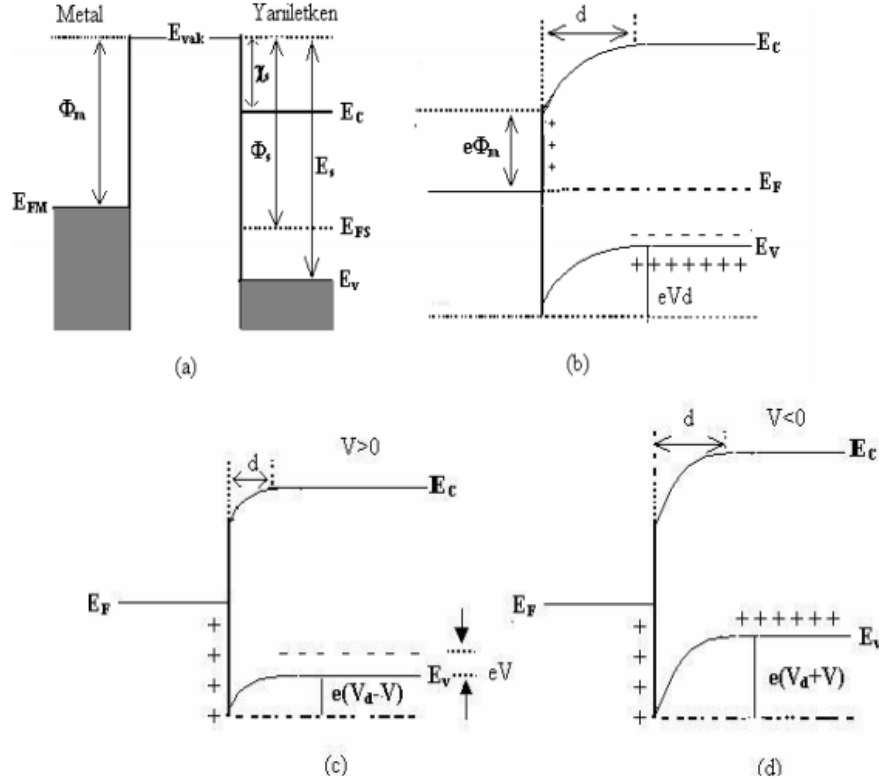
Tablo 2.2. İş fonksiyonlarına göre doğrultucu ve omik kontakların oluşumu

İş fonksiyonların durumu	Yarıiletken türü	Kontak türü
$\phi_m < \phi_s$	p -tipi	Doğrultucu
$\phi_m > \phi_s$	p -tipi	Omik
$\phi_m < \phi_s$	n -tipi	Omik
$\phi_m > \phi_s$	n -tipi	Doğrultucu

2.3.1. Metal/ p -tipi yarıiletken kontaklar

Bir metal ile bir p -tipi yarıiletkenin kontak haline getirilmesi sırasında maddeler arasında yük geçişi meydana gelir. Bu yük geçişleri Fermi enerji seviyesi eşit olana kadar devam eder. Maddeler arasındaki yük geçişi metal/yarıiletken kontaklardadeşikler (yük taşıyıcıları) tarafından kolayca yapılabiliyorsa bu tür kontaklara doğrultucu kontaklar adı verilir ve bu durum $\phi_s > \phi_m$ şartını sağlar [1]. Kontakt yapılmadan önce yarıiletkenin Fermi seviyesi, metalin Fermi seviyesinin altındadır. Kontakt yapıldıktan sonra Fermi seviyeleri arasındaki fark $\Phi_s - \Phi_m$ kadar olur. Şekil

2.3.'de bir metal/*p*-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji-bant diyagramları görülmektedir [3].



Şekil 2.3. Metal/*p*-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji bant diyagramları: a)Kontakt olmadan önce, b) Kontakt olduktan sonra ve termal dengede, c) $V > 0$ olması durumunda, d) $V < 0$ olması durumunda [3]

Kontakt yapılmadan önce yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinin altında olup, kontakt yapıldıktan sonra metal ve yarıiletken arasındaki Fermi seviyesi eşitleninceye kadar elektron akışı meydana gelir. Bu yük akışı sonunda yarıiletkende bulunan yük taşıyıcıları yani deşikler iyonize hale gelirler.

Yarıiletkenin yüzey tabakasındaki negatif yüklü iyonize olmuş alıcılar, d kalınlığındaki bir uzay yük tabakası içinde dağılır. Yarı iletken tarafındaki Fermi enerji seviyeleri $\Phi_s - \Phi_m$ kadar yükseldiğinden, yarıiletken tarafındaki deşikler ve kontağın metal tarafındaki deşikler için potansiyel engel yüksekliği sırasıyla 2.1 ve 2.2 denklemi ile verilir.

$$qV_d = \Phi_s - \Phi_m \quad (2.1)$$

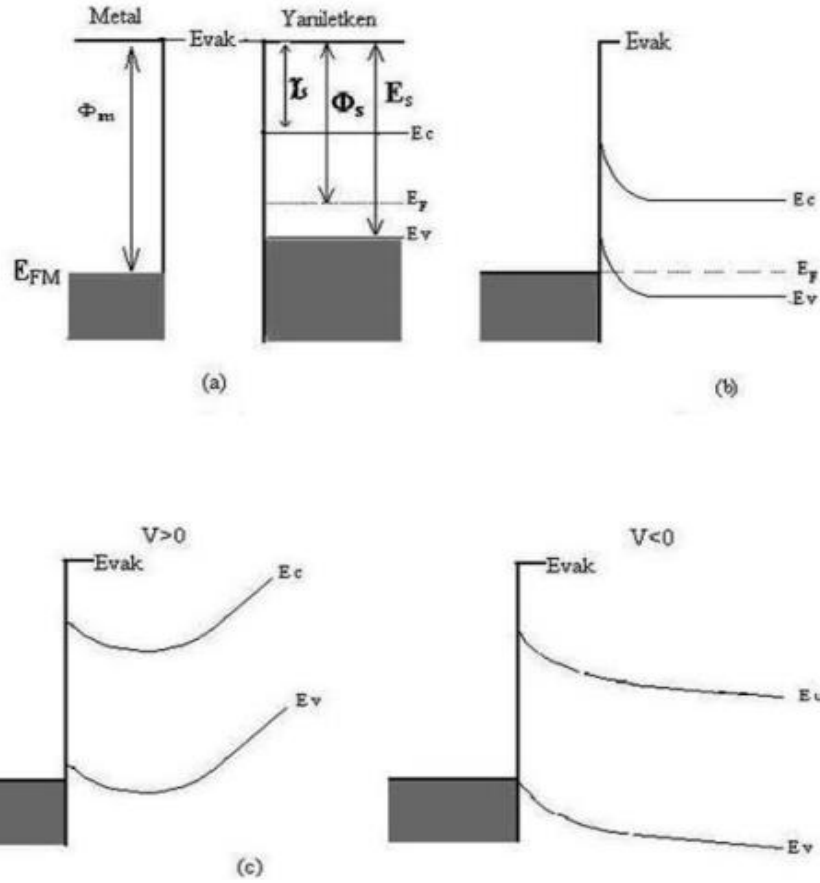
$$q\Phi_B = E_s - \Phi_m \quad (2.2)$$

V_d = kontak potansiyel farkı ya da difüzyon potansiyeli, Φ_m = Metalin iş fonksiyonu, Φ_s = Yarıiletkenin iş fonksiyonu, Φ_B = Engel yüksekliği, E_s = Vakum seviyesi ile yarıiletkenin dolu bandının tepesi arasındaki enerji farkı

Denklem 2.1'deki yarıiletken içerisindeki engel potansiyeli metalin yüzeyinden itibaren ölçülür [23]. Yarıiletken içerisindeki difüzyon potansiyeli yarıiletkenin iletkenlik bandından itibaren ölçülür. Yarıiletken içindeki bazıdeşikler potansiyel engelini aşıp metale geçecek kadar enerji kazanırlar. Metalin içinde termal olarak oluşandeşikler de yarıiletken içerisine geçecek kadar enerji kazanarak potansiyel engelini aşarlar. Böylece termal denge sonucunda engelden geçen akımlar eşit ve zıt yönlü olur.

2.3.2. Metal *p*-tipi yarıiletken omik kontak

Metal/yarıiletken yapıda, uygulanan gerilimin polaritesinden bağımsız olarak her iki yönde de akımın akması için minimum direnç göstermesine omik kontak denir. Bu durum $\Phi_m > \Phi_s$ şartını sağlar. Yani metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyüktür. Kontakta sonra metal ve yarıiletkenin enerjileri (Fermi seviyeleri) aynı düzeye gelinceye kadar yarıiletkenden metale elektron geçişi gerçekleşerek dengeye ulaşılır [24]. Sonuçta metalin Fermi seviyesi yarıiletkenin Fermi seviyesinden $\Phi_m - \Phi_s$ kadar aşağıda olur. Şekil 2.4.'de omik kontakta önceki ve sonraki enerji bant diyagramları gösterilmiştir [3].

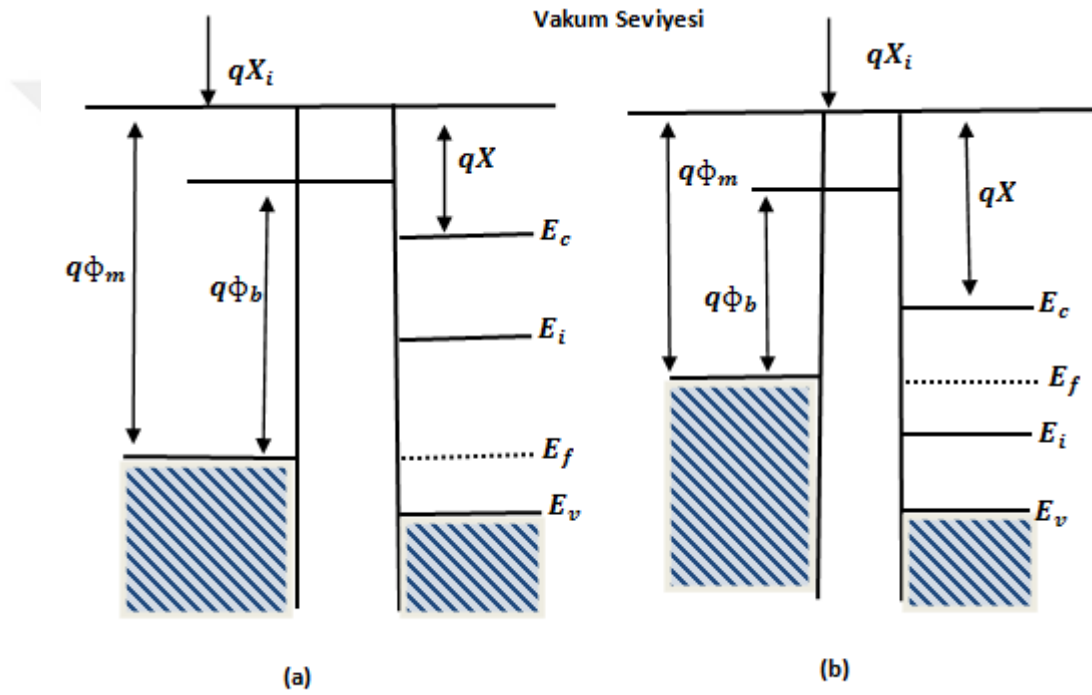


Şekil 2.4. Metal/*p*-tipi yarıiletken omik kontağın enerji-bant diyagramı: a) Kontakt yapılmadan önce b) Kontakt yapıldıktan sonra ve termal dengede, c) $V>0$ ve $V<0$ olması durumunda [3]

Metal pozitif ve yarıiletken negatif olacak şekilde bir voltaj uygulandığında yani harici bir ters beslem durumunda iletkenlik bandları aşağı doğru daha çok bükülecektir. Bu yüzden metal tarafında oluşandeşikler yarıiletkene doğru hareket edeceklerdir. Omik kontaklar akımı her iki tarafa da iletebilen kontaklardır. Omik kontaklarda hem metalden yarı iletkene hem de yarı iletkenden metale doğru akım geçişi kolaydır. Şekil 2.4c ve d’de metal/yarıiletken omik kontağın doğru ($V>0$) ve ters beslemdeki ($V<0$) enerji bant diyagramları verilmiştir.

2.4. İdeal Metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) Tipi Schottky Diyotların Yapısı

Sıfır beslem için ($V=0$) ideal bir MIS tipi Schottky diyot yapının enerji bant diyagramı Şekil 2.5.'de verilmiştir. MIS yapılarında iki ayrı bölgede arayüzey söz konusudur. Bunlar yalıtkan/yarıiletken arayüzeyi ve metal/yalıtkan arayüzeyi'dir. İdeal durumda yükler yarıiletkende ve yalıtkana yakın olan metal yüzeyinde bulunur. Bir dc gerilim uygulandığında yalıtkan içinden akım geçmez ve yapının ideallik faktörü birdir.



Şekil 2.5. $V=0$ da ideal bir MIS yapının enerji-bant diyagramı: a) p tipi yarıiletken, b) n tipi yarıiletken

İdeal bir MIS yapının sıfır beslemde ($V=0$) metalin iş fonksiyonu (Φ_m) ve yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) arasında enerji farkı yoktur. Diğer bir deyişle aradaki enerji farkı sıfırdır [25, 26].

N ve p tipi yarıiletkenler için metal ve yarıiletken arasındaki iş fonksiyonlarının farkı sırasıyla (2.3) ve (2.4) denklemleri ile verilmiştir.

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \left[X + \frac{E_g}{2q} - \Psi_B \right] = 0 \quad (n \text{ tipi yarıiletken için}) \quad (2.3)$$

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \left[X + \frac{E_g}{2q} + \Psi_B \right] = 0 \quad (\text{p tipi yarıiletken için}) \quad (2.4)$$

Φ_{ms} = Metal ve yarıiletken arasındaki iş fonksiyonlarının farkı,

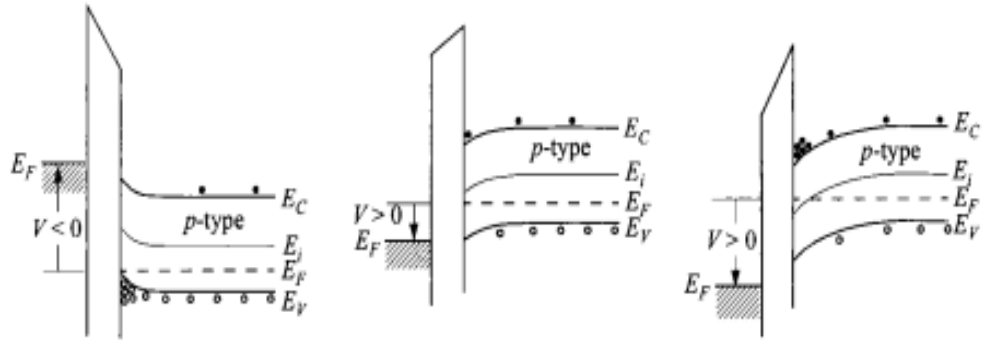
X = Yarıiletken elektron yatkınlığı, E_g = Yarıiletkenin yasak enerji aralığı,

Ψ_B = Saf yarıiletkenin fermi enerji seviyesi (E_i) ile p tipi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi (E_f) arasındaki enerji farkı

İdeal bir MIS yapıda yalıtkan bant aralığı çok büyük olduğundan, yalıtkanın iletkenlik bandındaki yük taşıyıcı yoğunluğu ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Herhangi bir beslem altında yarıiletkende ve yalıtkanla yakın metal yüzeyindeki yükler eşit ve zıt yönlüdür. Yalıtkan içinde ve yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinde tuzaklar, sabit ve hareketli iyonlar bulunmazlar. DC beslem durumunda yalıtkanla doğru taşıyıcı geçişi yoktur. Yani diğer bir deyişle yalıtkanın öz direnci sonsuzdur değerdedir.

İdeal bir MIS yapıda yalıtkan tabakanın iletkenliği sıfırdır. Ancak gerçekte yeterli büyüklükte elektrik alan ve sıcaklık varsa iletkenlik gösterebilir. MIS Schottky engelli yapılarda yalıtkan tabakanın etkisi Fonash [27] ve Card, Rhoderick [11] tarafından araştırılıp incelenmiştir.

İdeal bir MIS yapıda, metal bir plakaya pozitif voltaj uygulanırsa yarıiletkende yük kaymaları meydana gelir. Bir yarıiletkende serbest hareketli yük yoğunluğu metale kıyasla daha az ve uygulanan harici besleme etkilidir. Yalıtkan/yarıiletken arayüzeyde uzay yükü oluşur ve oluşan bu yükler bandların bükülmesine sebep olur. Yarıiletken içerisinde metale kıyasla serbest olmayan yükler bulunduğu için uygulanan voltaja bağlı olarak yük, uzay yükü bölgesini veya arayüzey bölgesindeki yığılmaları oluşturur. Şekil 2.6.'da uygulanan harici besleme bağlı olarak ideal bir MIS yapının enerji bant diyagramları gösterilmiştir [28].



Şekil 2.6. İdeal bir *p*-tipi MIS yapıda $V \neq 0$ için enerji band diyagramları (a) biriktirme durumu (b) tüketme durumu (c) tersinim durumu [28]

P tipi yarıiletkenli MIS yapılarda metale negatif bir harici beslem ($V < 0$) uygulandığı zaman oluşan elektrik alan sebebiyle yarıiletkenin çoğunluk yük taşıyıcısı olan deşikler yarıiletkenin arayüzeyine doğru çeker. Yarıiletkendeki valans (değerlik) elektronları bandının tepesine doğru hareket eder ve bant bükülür (Şekil 2.6a). İdeal bir diyotta yük akışı olmadığı durumda Fermi enerji seviyesi yarıiletkende sabit kalır. Taşıyıcı yük yoğunluğu üstel olarak enerji değişimine ($E_f - E_v$) bağlı olduğundan dolayı bant bükülmesi yarıiletken yüzeyinin yakınında çoğunluk taşıyıcı olan deşiklerin yığılmasına sebep olur. Çoğunluk taşıyıcıların arayüzeyde yığılması sebebiyle bu durum biriktirme olarak adlandırılır.

P tipi yarıiletkenli MIS yapılarda metale küçük bir pozitif harici bslem ($V > 0$) uygulandığı zaman yalıtkan içerisinde oluşan elektrik alan yarıiletken arayüzeyindeki deşikler yüzeyden uzaklaştırır. Yarıiletken yüzeyindeki deşik yoğunluğu, yarıiletkenin iç kısımlarındaki deşik yoğunluğundan küçük hale gelir. Yarıiletken tarafta ise metale en yakın olan yarıiletkenin bantları aşağı doğru bükülür (Şekil 2.6b). İletim bandının yarıiletken yüzeyine yakın bölgelerinde, elektronlar biraraya gelmeye başlar. Yarıiletken yüzeyinde, uygulanan gerilimle değişen *W* eklem bölgesi genişliğinde bir bölgede deşiklerin azaldığı yeni bir tüketme bölgesi oluşur. Oluşan bu duruma tüketme durumu denir. Bu olayda bantlar aşağı doğru bükülürler ve çoğunluk yük taşıyıcısı deşikler arayüzey bölgesinde tükenir. Yarıiletken arayüzeyine uygulanan gerilim arttığında ise tüketme tabakası yük dengesi için çok sayıda alıcı iyonları sağlayarak genişler ve bu bölgede çoğunluk taşıyıcıları azalır.

Bu durum oluşan bu bölgede MIS kapasitesini, uzay yükü kapasitesini ve yalıtkan kapasitesini belirler. Yüksek frekansta gerilim aniden değiştirilecek olursa, azınlık taşıyıcıların tekrardan birleşme hızına bağlı olarak terslenim yükü daha geç birikir. Bu dengesiz bir durumdur ve derin tüketim olarak tanımlanır.

P tipi yarıiletkenli MIS yapılarında metal kısma büyük bir pozitif harici beslem ($V \gg 0$) uygulandığı zaman bantlar aşağı doğru daha fazla bükülür. Saf durumda bulunan enerji seviyesi E_i , Fermi enerji seviyesi E_f 'nin altına düşer (Şekil 2.6c). Bu durumda yarıiletken arayüzeyinde azınlık taşıyıcılar olan elektronlar artış gösterir ve elektron yoğunluğu deşik yoğunluğundan daha büyük olur ve sonuçta p tipi yarıiletken yüzeyi n tipi yarıiletken gibi davranır.

Metal/yalıtkan/yarıiletken yapılarında arayüzeyde bulunan yalıtkan tabaka nedeniyle metal/yarıiletken arasında bir kapasite oluşmaktadır. Oluşan bu kapasite MIS kapasitesi olarak adlandırılır. Tersinim durumunda MIS kapasitesi arayüzey durumlarının uygulanan ac sinyali takip edebilme özelliğiyle ile belirlenir. Uygulanan düşük frekanslı ac sinyali için arayüzey durumları sinyali takip edilebilir. Bu yüzden yapının kapasitesi artar. Yüksek frekanslarda arayüzey durumları sinyali takip edemez ve kapasite minimum yani en düşük değerini alır [28].

2.5. İnce Film Üretim Teknikleri

İnce filmler ilk cam ve seramikler üzerinde dekorasyon olarak kullanılmıştır. Daha sonra gümüş tuzları kullanılarak cam yüzeyler üzerinde gümüş filmleri elde edilmiştir. 19. yüzyıldan itibaren bilimsel çalışmalardaki artış daha yeni ve daha modern ince film elde etme yöntemlerini de beraberinde getirmiştir. İlk ince film, 1838'de "elektroliz" yöntemi ile elde edilmiş olup, daha sonra 1852'de Bunsen "kimyasal reaksiyon" yöntemiyle, Faraday "asal gaz içerisinde buharlaştırma" yöntemiyle, Nahrwold [29] ve Kundt [30] "Joule ısıtması" yöntemiyle yine ince film elde etmişlerdir. Daha sonra ince filmlerin üretim teknikleri, malzeme yüzeylerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değiştirilmesine imkan sağlayan depolama teknikleri, depolanacak olan malzemesinin bulunduğu fiziksel hale göre değişik

gruplara ayrılabilir. Bunlardan biri de çalışmamızda kullandığımız buhar fazda büyütme yöntemidir.

2.5.1. Buhar fazda büyütme

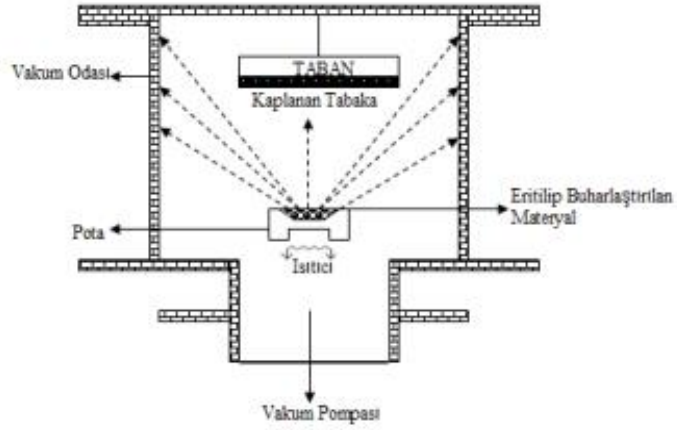
Kaplamaya veya taban malzemeye herhangi bir sınırlama belirtilmeden oluşan yüksek kalitede kaplamalar elde etmeyi sağlayan buhar fazında kaplama teknikleri iki gruba ayrılır. Bunlar, kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemleridir. Bu tez çalışmasında fiziksel buhar biriktirme yönteminde faydalanılmıştır.

2.5.1.1 Fiziksel buhar biriktirme

Bu yöntem vakum ortamında katı veya sıvı halde bulunan malzemelerin buharlaştırılarak veya sıçratılarak (sputtering) atomlarının yüzeyden koparılması ve kaplanacak olan alttaban malzemesi yüzeyine atomsal veya iyonik olarak biriktirilmesi esasına dayanır. Vakumlu bir ortamda, bir ısıtıcı yardımıyla kaplanacak olan malzeme ince bir film katmanı halinde alttabakaya biriktirilir. Bu işlem, kaplanacak olan katı haldeki malzemenin yüksek enerji ile iyonlaştırılarak ve reaktif gazlarla oluşturulmuş plazma haline getirilerek kontrollü bir şekilde alttabaka üzerine yapıştırılması şeklinde tanımlanabilir. Fiziksel buhar biriktirme tekniği, günümüzde mikroelektronik uygulamalardan dekoratif amaçlı çalışmalara kadar pek çok farklı alanda kullanılmaktadır [31, 36].

2.5.1.2 Buharlaştırma

Şekil 2.7.'de görülen bu teknikte ince bir film halinde kaplama yapmak istediğimiz bir malzeme buharlaştırmak için kullanılır [37, 38]. Vakum ortamında kaplanacak malzeme erime sıcaklığına kadar ısıtılır. Bu işlemler rezistans, indüksiyon, ark, elektron bombardımanı ve lazer ile buharlaştırma olarak gruplandırılmaktadır [31, 37-41].



Şekil 2.7. Buharlaştırma yönteminin şematik gösterilişi [37, 38]

2.5.2. Döndürme ile kaplama yöntemi (Spin coating)

Bu yöntem bir çözeltinin hızla dönen bir yüzey üzerine merkezkaç kuvveti etkisinin kullanılarak yaydırılması işlemidir. Şekil 2.8.'de döndürme ile kaplama yapan bir cihaz görülmektedir [42]. Kaplama yapılacak alttabaka dönen bir platforma vakum yardımıyla ile sabitlenir. Filmlerin kaplanması için sistem bir kapak yardımıyla dış ortama kapatılmıştır. Üretilen ince filmlerin homojen ve düzgün bir kalınlıkta olması, çözeltinin özelliklerine viskozite, yüzey gerilimi ve kuruma hızı gibi bazı önemli parametrelere bağlı olup, kalınlık genelde birkaç nanometre ile mikrometre arasında değişir.



Şekil 2.8. Döndürme ile kaplama yapan cihaz [42]

Kaplama işlemleri farklı aşamalarda olabilir. Örneğin dönen bir alttabakaya tam merkeze olacak şekilde çözelti uygulanabilir. Ancak bu aşamada çözelti içerisinde büyük parçacıklar olmaması ve yüzeye yapışabilir bir özellik taşıması gerekir.

Durgun bir alttabaka üzerine çözelti damlatılıp daha sonra alttabaka döndürülebilir. Burada çözelti merkezkaç kuvveti etkisiyle tüm yüzeye ince film şeklinde yayılacaktır.

2.6. Arayüzey Durumları

Schottky diyotlarda metal/yarıiletken arasında genellikle 0,5 ile 1 nm kalınlığında ince bir doğal oksit tabakası bulunur. Bu tabaka, kalın bir oksidin bant yapısı karakteristiklerine sahip olamayacak kadar ince bile olsa, bir yalıtkan olarak düşünülebilir. Oluşan yapı bir metal/yarıiletken (MS) yapısından daha çok metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) yapısı gibi olacaktır. Bu durumda üretilen Schottky diyot ideal olmaz. Arayüzey durumlarını üç grupta inceleyebiliriz:

- Kontak oluştuktan sonra yarıiletkenin yüzeyine yayılmış olan safsızlıkların varlığından dolayı meydana gelen yüzey durumları [3].

- Yarıiletkenin yüzeyinde ve gövdesinde bulunan kusurların oluşturduğu yüzey durumları
- Kimyasal reaksiyonların oluşturduğu yüzey durumlarıdır.

Bir metal, yarıiletkenin yüzeyine buharlaştırma yolu ile kaplandığında metal ile yarıiletken arasında bir kimyasal reaksiyon oluşur. Bu reaksiyon sonucunda yeni bir bileşik ve dolayısıyla da arayüzey durumları meydana gelebilir [17]. Metalden yarıiletkene doğru yük akışıyla oluşan bu yüzey durumlarına metalle uyarılan ara yüzey durumları adı verilir [43, 44]. Arayüzey durumları yoğunluğu teoriksel olarak yüzey atomlarının yoğunluğu seviyesinde, yani 10^{15}cm^{-2} civarındadır. Fakat deneysel sonuçlar bunun $10^{11} - 10^{12} \text{cm}^{-2}$ seviyesinde olduğunu göstermektedir [3].

Metal/yarıiletken arasında organik bileşikli bir tabaka kullanılarak elde edilen yapılarda arayüzey tabakası ideal bir yalıtkan gibi davranabilir. Organik bileşik/yarıiletken arayüzeyinde istenmeyen yükler ve ideallikten sapmalar oluşabilir. Bu ideal olmayan durumların nedeni; organik bileşik ile yarıiletken arasındaki arayüzey tuzak yükleri, sabit yükler, arayüzey tabakanın tuzak yükleri ve aygıtın imalatı sırasında meydana gelen hareketli iyonik yükler olabilir. Bu tür organik arayüzeyli yarıiletken yapıların arayüzey durumları, aygıtın elektronik özelliklerini önemli ölçüde etkiler.

2.7. Kapasitans-Gerilim (C-V) Karakteristikleri

Schottky kontaklarda metal tarafta bulunan negatif yükler ile yarıiletken tarafında bulunan iyonize olmuş alıcıların oluşturduğu tüketme bölgesi paralel levha kondansatör gibi davranır. Yapıya ters beslem uygulandığında yapının engel tabakası genişler ve bu tabakada yük değişimlerini meydana gelir. Bu durum kapasitede değişimlere sebep olur. Metal/yarıiletken yapılara ters beslem uygulandığında değişime uğrayan Schottky kapasitesinden önemli diyot parametreleri elde edilir. Bir yarıiletkende birim alan başına düşen yük yoğunluğu (2.5) denklemi ile verilir.

$$Q = qN_a W_D = \sqrt{2\epsilon_s q N_a (V_d + \phi)} \quad (2.5)$$

Q = Yarıiletkende oluşan yük yoğunluğu,

q = Elektronik yük, N_a = Taşıyıcı yük yoğunluğu,

W_D = Tükenme bölgesi genişliği, V_d = Difüzyon potansiyeli,

ϵ_s = Yarıiletkenin dielektrik sabiti, V = Uygulanan harici beslem

Yapıya küçük bir harici beslem uygulandığında yük değişimleri sonucu küçük bir sinyal kapasitesi oluşur. Bu kapasite, tüketme bölgesi kapasitesi olup 2.6 denklemi ile verilir.

$$C = \frac{dQ}{dV} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_a}{2(V_d + V)}} \quad (2.6)$$

(2.5) denkleminde olduğu gibi eklem kapasitesi taşıyıcı yoğunluğu ile doğru, uygulanan gerilim ile ters orantılıdır. Taşıyıcı yoğunluğu oranını arttırsak eklem kapasitesi de artacaktır. (2.6) denklemini ters çevrilip karesini alırsak (2.7) denklemini elde ederiz.

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_d + V)}{q\epsilon_s N_a} \quad (2.7)$$

Bu ifadeye göre C^{-2} - V eğrisinin düz bir doğru olması ve (2.8) denklemini sağlaması beklenir. Bu doğrunun eğimi bize taşıyıcı yoğunluğunu yani yarıiletkene yerleştirilmiş katkı atomlarının yoğunluğunu (N_a) verir (Denklem 2.8).

$$\frac{dC^{-2}}{dV} = \frac{2}{q\epsilon_s N_a} \quad (2.8)$$

C^{-2} - V eğrisinin gerilim eksenini kestiği nokta (V_0) ve (2.9) denkleminden yararlanılarak yapının difüzyon potansiyeli bulunur.

$$V_0 = V_d - \frac{kT}{q} \quad (2.9)$$

T = Kelvin cinsinden sıcaklık, k = Boltzman sabiti

2.8. Seri Direnç

Bir diyodun ideallikten sapmasının nedenlerinden biri de seri dirençtir. Ters beslem altında ideal bir diyot oldukça yüksek bir direnç gösterir. Düz beslemde uygulanan gerilim arttıkça direnç üstel olarak düşer. Bir yapıda meydana gelebilecek seri direnç farklı kaynaktan oluşur. Bunlar, yarıiletken gövde içerisinde düzgün olmayan safsızlık dağılımları, yarıiletkenin tüketme tabakası ve omik kontak arasındaki gövde direnci, yarıiletken gövde ile kontak arasına yerleşmiş kirli yüzeyler, omik kontakt ve diğer kontaklardan elektriksel ölçüm için alınmış teller olabilir. Yarıiletken içerisindeki düzensiz katkılar yüksek öz dirençli bölgeler meydana getirerek yavaş taşıyıcı yoğunluğunu oluşturur. Çoğunlukla yarıiletken gövdesindeki seri direnç etkisi küçük olduğundan dolayı ihmal edilir.

Seri direnç etkisi çeşitli tekniklerle azaltılabilir. Örneğin, numunelerin üretim aşamalarından biri olan omik kontakt oluşturulması sırasında omik kontakt direnci, ısısal bir işlem uygulanarak metalin yarıiletken yüzeyine çöktürülmesi suretiyle azaltılabilir. Ölçüm aşamasında da çeşitli teknikler kullanılarak seri direnç etkisi azaltılabilir. Böylece tayin edilecek temel diyot parametreleri daha doğru elde edilmiş olur.

2.9. Radyasyonun Madde Üzerine Etkileri

Radyasyon boşlukta yayılabilen bir enerji şekli olup çoğunlukla elektromanyetik dalga radyasyonu ve parçacık radyasyonu olarak iki şekilde incelenebilir. Radyasyon madde içerisinden geçerken malzemeye enerji aktarımı gerçekleşir. Bazı durumlarda ise madde içindeki elektron atom yörüngesinden ayrılabilmesi için gerekli enerjiyi alabilir. Sonuç olarak geride kalan atom veya molekül elektriksel olarak pozitif yüklü hale geçmiş olur. Yüksüz bir atomun veya molekülün elektriksel olarak yüklü hale gelmesi sonucu iyonlaşma oluşur. İyonlaşmaya sebep olan her radyasyon iyonlaştırıcı radyasyon olarak da bilinir. Alfa parçacığı, beta parçacığı, x ışını, gama ışınları doğrudan, nötronlar ise dolaylı iyonlaştırıcı radyasyon olarak bilinir.

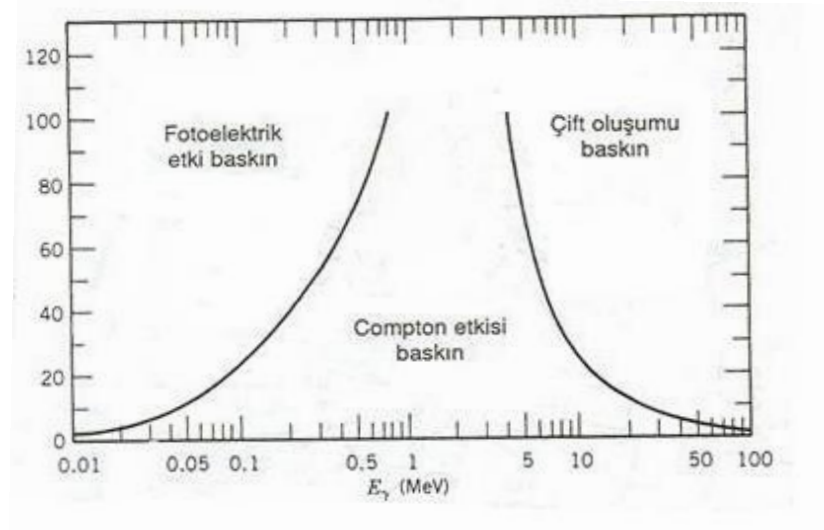
2.9.1 Gama radyasyonunun maddeyle etkileşmesi

Gama radyasyonu radyoaktif bozunmalar sonucunda bir atomun yeniden düzenlenmesi sırasında oluşur ve elektromanyetik dalga halinde yayınlanır. Gama radyasyonu yüksüz olup, elektrik ve manyetik alanda sapmaya uğramaz. Işık hızıyla hareket ettiği için kütlesi yoktur. Madde ile etkileşimleri sonucunda tam saçılma veya tam soğurma meydana gelir [45].

Gama ışınlarından yüklü parçacıklara iletilen enerji kinetik enerjidir. Gelen gama ışınının fotonu ile ikincil parçacıkların yönü arasındaki açısal ilişki enerjisi hakkında önemli bilgiler sağlar. Gama ışınının madde ile etkileşmesinde üç önemli mekanizma mevcuttur [46].

1. Fotoelektrik olay (0,01 MeV ile 0,5 MeV arası)
2. Compton ve Thomson saçılması (0,1 MeV ile 10 MeV arası)
3. Çift oluşumu (1,02 MeV ve yukarısı)

Şekil 2.9.'da üç gama ışını etkileşme işlemi ve bunların baskın olduğu bölgeler verilmiştir [47].



Şekil 2.9. Üç gama ışını etkileşme işlemi ve bunların baskın olduğu bölgeler [47]

2.9.1.1. Fotoelektrik etki

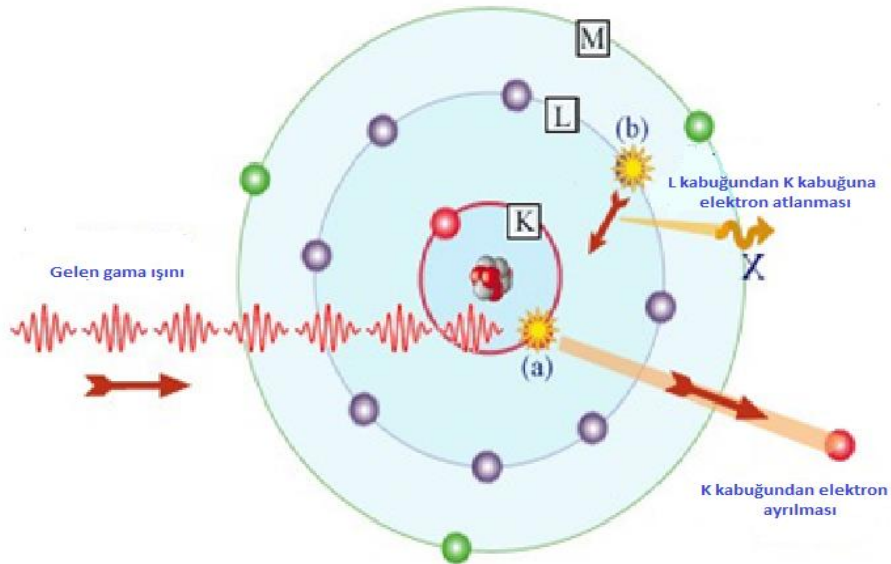
Fotoelektrik etki yeterli frekansa sahip bir gamma radyasyonunun enerjisini kaybederek atomdan elektron koparıp bir iyon çifti meydana getirmesi olayıdır. Bu olay sonucunda meydana gelen elektronlara fotoelektron adı verilir. Fotoelektrik etki sırasında gama ışınının bütün enerjisi kaybolur fakat bu enerji tamamen elektronlara kinetik enerji olarak aktarılmaz. Bir kısmı elektronu uyarmak için kullanılır. Fotoelektrik etki düşük radyasyon enerjisinde görülür. Gelen fotonun enerjisi denklem 2.10'da görüldüğü gibidir.

$$E_{\text{foton}} = E_b + E_k \quad (2.10)$$

E_{foton} = Gelen fotonun enerjisi, E_b = Elektronun bağlanma enerjisi,

E_k = Fotoelektronun kinetik enerjisi

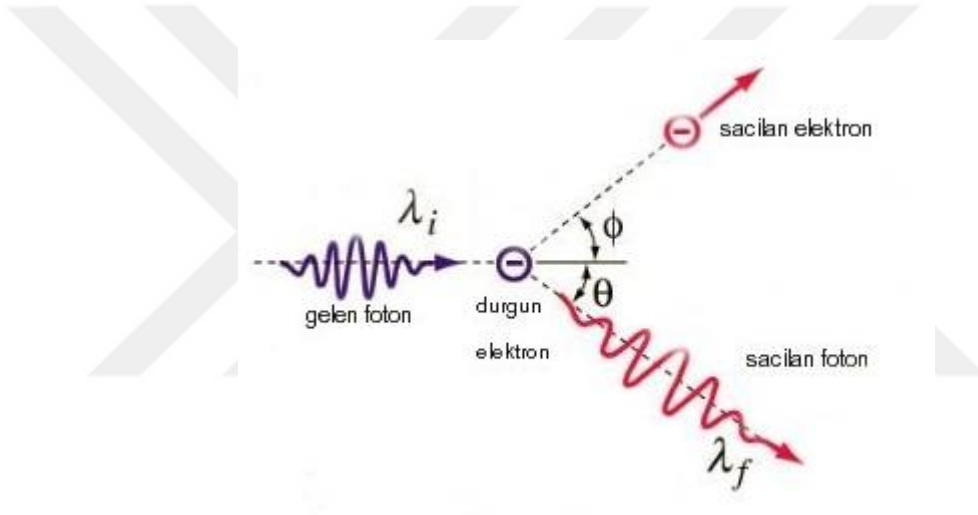
Şekil 2.10.'da bir fotoelektrik olayın şematik gösterimi verilmiştir [48]. Fotoelektronun atomdan ayrılmasından sonra, dış yörüngede bulunan bir elektron boşlukta bulunan yörüngeye geçer ve bu geçiş sonucu karakteristik x-ışınları oluşur.



Şekil 2.10. Fotoelektrik olayın şematik gösterimi [48]

2.9.1.2. Compton olayı

Compton olayı veya diğer adıyla Compton Saçılması bir elektronla etkileşime giren bir x-ışını veya gama ışını fotonunun enerjisindeki azalma anlamına gelir. Bu olay ilk defa 1923 yılında Arthur Holly Compton tarafından gözlenmiş ve $h\nu$ enerjili parçacıkların olduğu iddia edilmiştir. Compton ve Thomson saçılmasında gelen fotonun enerjisi 0,5 MeV'den büyük ise elektronlarla esnek çarpışma yapar. Gama ışını ile atomdaki elektron arasındaki çarpışma sonucunda gama ışını enerjisinin bir kısmını elektrona aktararak daha düşük enerji ile başka bir doğrultuda ilerler. Şekil 2.11.'de Compton olayı şematik olarak gösterilmiştir [49].



Şekil 2.11. Compton Saçılması [49]

Compton olayında foton etkileşme sonucu yok olmaz. Çarpışma esnek olup, parçacıklar birbirinden bağımsız hareket ederler ve enerji korunmuştur. Gelen fotonun enerjisinin bir kısmı elektrona aktarılmış, geriye kalan enerjiyle de kendisi saçılmıştır. Buna göre enerjinin korunum denklemi (2.11) denklemi ile verilir.

$$E_{\text{foton}} = E^i + E^e \quad (2.11)$$

E_{foton} = Gelen foton enerjisi, E^i = Saçılan foton enerjisi,

E^e = Geri tepen elektronun enerjisi

(2.11) denklemine göre gelen fotonun enerjisinde bir azalma meydana gelmiştir. Frekansa bağlı gama ışını enerjisi (2.12) denklemi ile verilir.

$$h \cdot \nu_{\text{gelen}} = h \cdot \nu_{\text{saçılan}} + E^e \quad (2.12)$$

ν_{gelen} = Gelen fotonun frekansı, h = Planck sabiti,
 $\nu_{\text{saçılan}}$ = Saçılan fotonun frekansı

(2.12) denkleminde gelen fotonun frekansı saçılan fotonun frekansından daha büyük olup, enerjisi (2.13) denklemi ile verilir.

$$E = h \cdot \nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.13)$$

c = Işık hızı, ν = Frekans, λ = Å cinsinden dalga boyu

2.13 denkleminde görüldüğü gibi frekans ile dalga boyu ters orantılıdır. Dalga boyları $\lambda_{\text{saçılan}} > \lambda_{\text{gelen}}$ için momentum 2.14 denklemindeki gibi korunmuş olup, gelen fotonun momentumu saçılan fotonun momentumundan büyüktür [47].

$$\vec{P}_{\text{gelen}} = \vec{P}_{\text{saçılan}} + \vec{P}_{\text{elektron}} \quad (2.14)$$

Fotonun dalga boyundaki değişim 2.15 denklemi ile verilir.

$$\Delta\lambda = \lambda_{\text{saçılan}} - \lambda_{\text{gelen}} = \frac{h}{m_e \cdot c} (1 - \cos\theta) \quad (2.15)$$

$\Delta\lambda$ = Saçılan ve gelen fotonun dalga boyları arasındaki fark,
 m_e = Elektronun kütlesi, θ = Fotonun saçılma açısı,
 $\lambda_{\text{saçılan}}$ = Saçılan fotonun dalga boyu, λ_{gelen} = Gelen fotonun dalga boyu

Gelen fotonun enerjisi ile saçılan fotonun enerjisi arasındaki ilişki 2.16 denklemi ile verilir.

$$E' = \frac{0,51}{1 - \cos\theta + \frac{0,51}{E}} \quad (2.16)$$

θ = Fotonun saçılma açısı

$\cos\theta = 1$ ise (2.17) denkleminde görüldüğü üzere gelen fotonun enerjisi yaklaşık olarak saçılan fotonun enerjisiyle aynı olur.

$$E_{\text{foton}} \cong E' \quad (2.17)$$

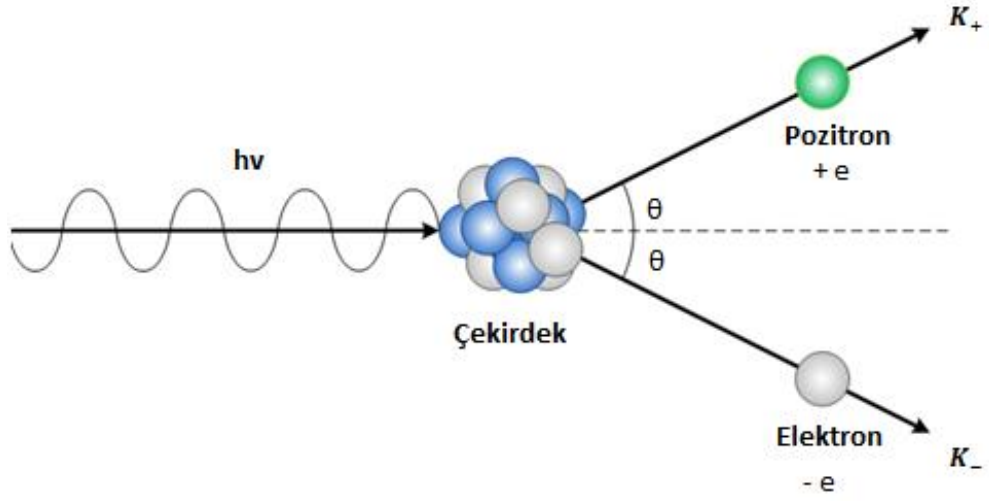
E_{foton} = Gelen fotonun enerjisi, E' = Saçılan fotonun enerjisi

Fotonun saçılma açısının 90° olması durumunda (2.18) denklemi elde edilir.

$$E' = \frac{0,51E}{E+0,51} < 0,51\text{MeV} \quad (2.18)$$

2.9.1.3. Çift oluşumu

Bir gama ışınının enerjisi 1,02 MeV'den daha büyük ise bu enerji çekirdek çevresinde bir pozitif ve bir negatif elektrona dönüşür. Enerji fazlalığı oluşan bu elektronların kinetik enerjilerine harcanır. Şekil 2.12'de çift oluşum olayının şematik gösterimi verilmiştir [50].



Şekil 2.12. Çift oluşumu [50]

Çift oluşumunda enerji ve momentum korunmaktadır. Bundan dolayı oluşan elektron ve pozitron bağımsız olarak hareket eder.

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kristal Temizliği

Bu tez çalışmasında üretilen metal/organik/inorganik yapılarında kullanılan alttabaka kristal *p* tipi, (100) düzleminde kesilmiş, 1,8 Ω -cm özdirençli, 300 μ m kalınlığında olup, yurt dışından temin edilmiştir (Şekil 3.1.). Kristal alttabakaların kimyasal temizleme işlemi ilk önce kristal üzerinde oluşmuş olabilecek yağ ve birtakım partikül kalıntılarının uzaklaştırılması ile olmuştur. Bunun için çeyrek büyüklükte kesilen kristaller trikloretilen içerisine konularak bir ultrasonik banyo (Şekil 3.2.) yardımıyla 10 dakika temizlendi. Daha sonra iki adet cam beher alınarak birisinin içerisine bir miktar aseton diğerine ise metanol konuldu. Aseton konulan bu beher yaklaşık 50 dereceye kadar ısıtıldı. Daha sonra silikon kristaller aseton dolu beher içine atılarak 5 dakika bekletildi. Beher içerisinden çıkartılan kristaller metanol konulmuş bir diğer beher içerisine atıldı ve burada da 5 dakika bekletildi. Metanol içerisinden çıkartılan kristaller bir deiyonize su sisteminden (Şekil 3.3.) elde edilen 18,2 M Ω -cm özdirençli deiyonize su ile bolca durulandı ve kuru azot ile kurutuldu.



Şekil 3.1. *p*-tipi Silisyum kristali



Şekil 3.2. Kristal temizliğinde kullanılan ultrasonik temizleyici



Şekil 3.3. Deiyonize su sistemi

Kristal üzerinde olası organik artıkları uzaklaştırmak için ikinci olarak ise RCA işlemine geçildi. Bunun için bir beher içerisinde 50 ml 27%'lik amonyum hidroksit (NH_4OH) ve 250 ml deiyonize su konularak bir manyetik karıştırıcı yardımıyla 70 dereceye kadar ısıtıldı (Şekil 3.4a). Isıtılmış bu karışımın içerisinde 50 ml 30%'luk

hidrojen peroksit (H_2O_2) eklenerek içerisinde kabarcıklar oluşana kadar beklendi. Solüsyondaki kabarcıklar oluşur oluşmaz yani etkileşme başlar başlamaz kristaller bu karışımın içine atıldı ve 10 dakika kadar beklendi (Şekil 3.4b). Bu işlemin sonunda silikon kristallere $18,2\text{ M}\Omega\text{-cm}$ dirençli deiyonize su kullanılarak durulama işlemi yapıldı.

Kimyasal temizleme işleminde son olarak silikon üzerinde meydana gelebilecek oksit tabakasını uzaklaştırma aşamasına geçildi. Bunun için %38'lik hidroflorik asit (HF) kullanıldı. Teflon bir beherin içerisine 480 ml deiyonize su ve 20 ml HF konularak silisyum kristaller bunun içerisine atıldı ve yaklaşık 2 dakika kadar bekletildi. Kristal üzerlerindeki oksit tabakasının uzaklaştığından emin olunduktan sonra silisyum kristalleri deiyonize su ile durulanıp azot gazı ile kurutuldu. Al/coronene/p-Si/Al yapılarının üretiminde kullanılacak olan alüminyum metalleri temizlemek için ise aynı kimyasal temizleme yöntemleri kullanıldı.



(a)



(b)

Şekil 3.4. Isıtıcıly manyetik karıştırıcı: a) $NH_4OH + H_2O$ çözeltisi, b) Kristal ile reaksiyona girmiş RCA çözeltisi

3.2. Al/coronene/*p*-Si/Al Yapılarının Hazırlanması

3.2.1. Omik kontağın oluşturulması

Al/coronene/*p*-Si/Al yapılarının üretiminde Şekil 3.5.'de görülen termal buharlaştırma sistemi kullanıldı. Bu sistemde, dönerik işleyen bir pompa ile bir turbo moleküler pompa mevcut olup termal buharlaştırma işlemleri vakum altında bilgisayar kontrollü olarak yapılmaktadır. Termal buharlaştırma işlemine geçilmeden önce omik ve doğrultucu ve kontakların oluşturulmasında kullanılacak olan maskeler belirlendi (Şekil 3.6a ve b).



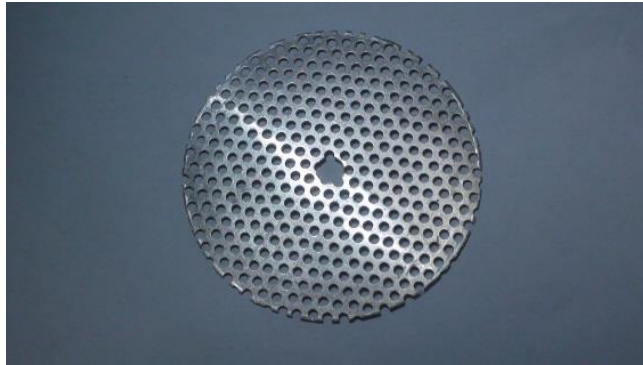
Şekil 3.5. Termal buharlaştırma sistemi

Termal buharlaştırma sistemi çalıştırılıp hazır hale getirildikten sonra silisyum kristalleri atmosfer ortamından alınıp sisteme yerleştirildi. Sistemin içerisine numune tutucularla birlikte omik kontak için seçilmiş maske ve üzerine de kaplanacak yüzeyi alt tarafa gelecek şekilde silisyum kristali yerleştirildi. Termal buharlaştırma sisteminin elektrotlarına kaplaması yapılacak malzeme için tungsten malzemeden yapılmış tel bir pota (Şekil 3.7.) ve potanın üzerine buharlaştırılması yapılacak olan %99,999'luk alüminyum metali yerleştirilerek üzerinde küçük bir cam pencere

bulunan metal vakum odasının kapağı kapatıldı. Rotary pompa tarafından meydana getirilen ön basınç değerinden sonra devreye turbo moleküler pompa alındı. Mevcut sistem ile inilebilecek en düşük basınç ($1,8 \times 10^{-6}$ Torr) seviyesine ulaşıldıktan sonra potanın bulunduğu elektrotta akım verilmeye başlandı. Termal buharlaştırma işleminin başlamasının ardından istenilen ve önceden sisteme tanımlanmış bir film kalınlığına ulaşıldığında ise bilgisayar tarafından kontrol edilen bir kesici kapak ile buharlaştırma işlemine son verilerek düşük dirençli omik kontaklar oluşturulmuştur. Buharlaştırma sırasında kaplanan alüminyum filminin kalınlığı $1500 \text{ \AA}$ ve biriktirme hızı $1 \text{ \AA/sn}$ dır.



(a)



(b)

Şekil 3.6. Kontaktların oluşturulmasında kullanılan maskeler: a) omik kontakt için, b) doğrultucu kontakt için



Şekil 3.7. Tungsten malzemedan yapılmış tel bir pota

Omik kontak için yapılan buharlaştırma işlemi sona erdikten sonra sisteme hava verilerek vakum odasının kapağı açıldı. Elektrotların arasındaki filaman çıkarıldıktan sonra yerine tungsten bir levha yerleştirmiş ve üzerine de Al kaplanmış tarafı üste gelecek şekilde silisyum kristali yerleştirilmiştir. Termal sistemin kapağı atmosfer ortamına kapatıldı. İstenilen vakum değerine ulaşıldığında metal levhaya akım verilerek alüminyum kaplı yüzeyin silisyum kristali içine çökmesi ve bu suretle omik kontakın meydana gelmesi sağlandı. Sistemin soğuması için bir süre beklemenin ardından termal sistemin kapağı açıldı. Bir önceki filaman tekrar elektrotlar arasına yerleştirildi ve çöktürülen alüminyum üzerine iyi bir elektriksel iletkenliğin sağlanabilmesi için tekrar 1500 Å kalınlığında alüminyum film oluşturuldu.

3.2.2. Coronene arayüzey tabakasının oluşturulması

Omik kontakt oluşturma işleminin ardından sıra arayüzey tabakasının oluşturulma işlemine gelmiştir. Bunun için tetrahidrofuran (THF) ve coronene tozundan oluşan 0,1mg/ml coronene çözeltisi oda sıcaklığında hazırlanmıştır (Şekil 3.8.). Hazırlanan bu çözeltiden döndürme ile kaplama yapan (spin coater) bir cihaza yerleştirilen silisyum kristali üzerine 50 µl damlatılmıştır. Bu işlem sırasında spin coater cihazı 20 saniyelik sürelerle önce dakikada 600 devirle daha sonra dakikada 1300 devirle döndürülmüştür. Spin coater cihazından alınan kristal bir süre oda sıcaklığında bekletilerek, çözücünün tamamen uçması ve yüzeyde sadece coronene tabakasının kalması sağlandı.



Şekil 3.8. Coronene çözeltisi

3.2.3. Doğrultucu kontağın oluşturulması

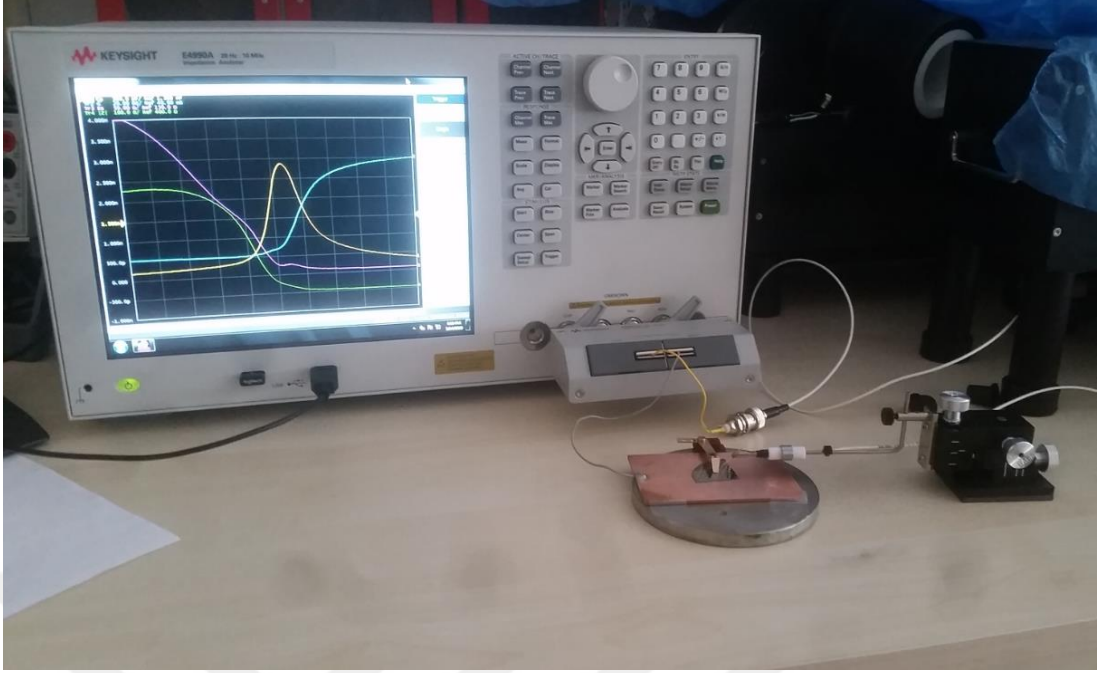
Üzerine coronene ince film kaplanmış silisyum kristali kaplanan yüzey alta gelecek şekilde 1,7 mm çapında delikleri olan metal maske (Şekil 3.6b) üzerine yerleştirildi. Bu maske numune tutucuyla birlikte termal buharlaştırma sistemine takıldı. Uygun vakum değerine erişildikten sonra 1500Å kalınlığında alüminyum kontaklar oluşturularak metal/organik/inorganik diyotları elde edilmiş oldu. Şekil 3.9a'da çeyrek bir wafer üzerinde üretilmiş çok sayıda Al/coronene/*p*-Si/Al diyotları, b'de ise yapıların şematik diagramları görülmektedir. Bu diyotların hepsinin ön analizleri yapılmış olup, içlerinden en iyi özellik gösteren diyot seçilmiş ve tüm karakterizasyon işlemleri onun üzerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.9. Al/coronene/*p*-Si/Al yapıları: a) Çeyrek wafer üzerinde, b) şematik diagram

3.3. Kullanılan Ölçüm Cihazları ve Düzenekleri

Üretilen Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky diyotlarının kapasitans-gerilim (*C-V*) ölçümleri için Keysight E4990A marka Impedance Analyzer cihazı kullanılmıştır. Şekil 3.10.'da ölçüm düzeneği görülmektedir. Yapılara gamma radyasyonu kullanılarak uygulanan ışınlama işlemleri Türkiye Atom Enerjisi Kurumu'nda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.10. “Keysight E4990A” marka Impedance Analyzer cihazı ve ölçüm düzeneği

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Üretilen Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapısının karakterizasyon işlemleri için geniş bir kapasitans spektroskopisi kullanılmıştır. Bunun için önce 30 mV'luk adımlarla -3 ile +3 volt doğru gerilim aralığında, kapasitans-gerilim ($C-V$), iletkenlik-gerilim ($G-V$), daha sonra 0 volt dc gerilim altında kapasitans-frekans ($C-f$) ve iletkenlik-frekans ($G-f$) ölçümleri alınmıştır. Gerilime bağlı yapılan ölçümlerde yapılar farklı frekanslarda (1MHz ve 1kHz) olmak üzere efektif değeri 40mV olan bir sinüzoidal gerilim uygulanmıştır. Frekansa bağlı olan ölçümlerde 20Hz ile 7MHz'lik bir frekans aralığı kullanılmıştır. Tüm ölçümler oda sıcaklığında ve karanlık ortamda yapılmıştır. Bu ölçümlerden elde edilen verilerin grafiklere aktarılması sonucunda elde edilen eğrilerden yapının temel aygıt parametreleri olan difüzyon potansiyeli (V_d), engel yüksekliği (Φ_B), taşıyıcı yoğunluğu (N_a), tüketim tabakası genişliği (W_D), yüzey durumları yoğunluğu (N_{ss}) ve seri direnç (R_s) gibi tayin edilmiştir. Daha sonra aygıt, 12 kGy'lik bir gamma radyasyonuna maruz bırakılmıştır. Her ışınlama sonrasında takiben yukarıda bahsedilen ölçümler ve karakterizasyon işlemleri tekrarlanmış olup, yapının elektriksel özelliklerindeki radyasyon sonrası meydana gelen değişimler karşılaştırılmıştır.

4.1. Kapasitans Spektroskopisi ve Temel Parametre Tayini

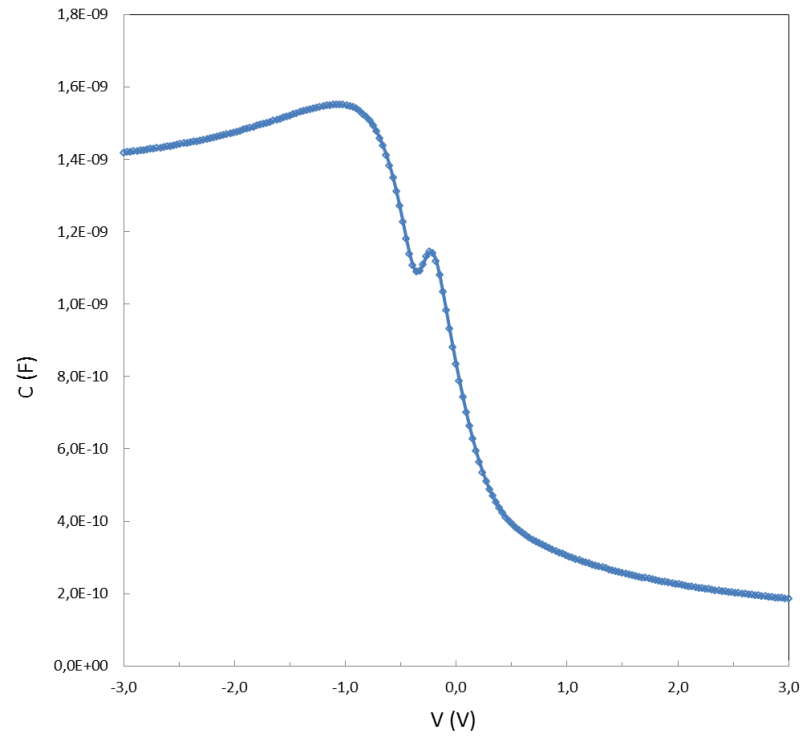
4.1.1. Gerilime bağlı ölçümler

Şekil 4.1a ve b'de üretilen Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapısının 1MHz sabit frekansta ve -3 ile +3 volt harici gerilim aralığında alınmış kapasitans-gerilim ($C-V$) ve iletkenlik-gerilim ($G-V$) grafikleri görülmektedir. Uzun zaman sabitine sahip arayüzey durumları yapıya uygulanan düşük frekanslı harici ac sinyali takip edip ölçülmüş kapasiteye katkıda bulunabilir. Elde edilen bu katkılı verilerden hesap

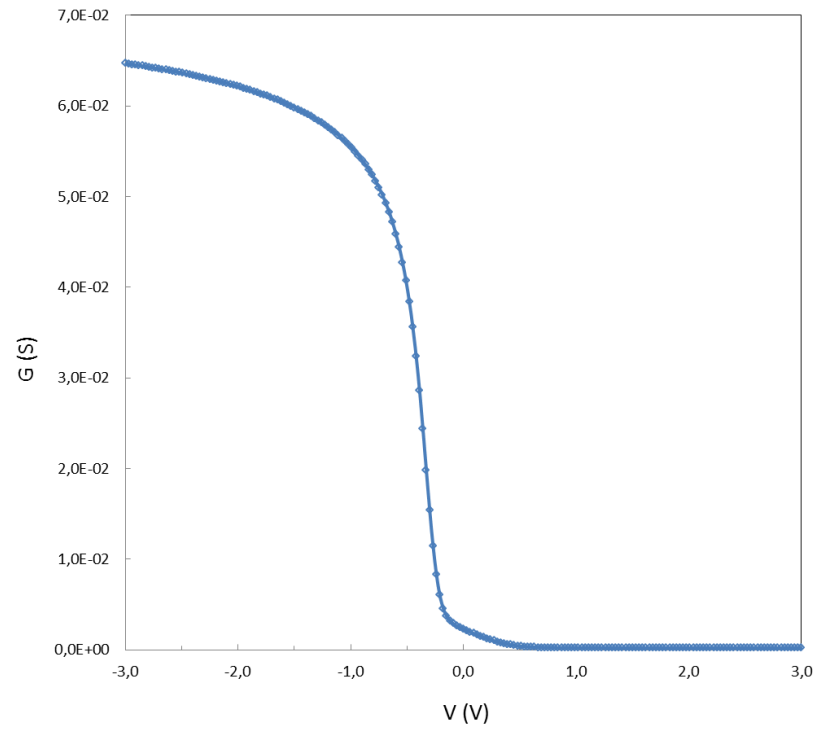
edilebilecek taşıyıcı yoğunluğu gerçek değeri yansıtmayacaktır. Bu yüzden aygıtın temel diyot parametrelerinin tayininde kullanılan ve yapıya uygulanan harici sinyalin frekansı yeterince yüksek (1MHz) tutulmuştur. Böylece arayüzey durumlarının kapasitans eğrilerine olası katkısı ve dolayısıyla da aygıt parametrelerine etkisi ihmal edilebilecektir [51].

Şekil 4.1a'da verilen eğri biriktirme, tüketme ve ters çevrilme şeklinde bir metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) tipi davranış göstermiştir. Schottky yapılarında arayüzey tabakası içerisinde tuzaklanmış dipoller yada yarıiletkenin gövdesinde oluşmuş görüntü yükleri, arayüzey durumlarına sebebiyet vererek $C-V$ eğrisini etkileyebilir [52]. Şekil 4.1a'da görüldüğü üzere, uygulanan harici gerilime bağlı kapasitans grafiği sıfır gerilim civarında pik verirken iletkenlik grafiği artan ters beslem ile artmaktadır. Kapasitans grafiğinin bu davranışı arayüzey durumlarının bu bölgede lokalize olduğunun bir göstergesidir.

Şekil 4.1b'de Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapısının 1MHz sabit frekansta voltaja bağlı iletkenlik eğrisi görülmektedir. İletkenlik metodu, bir metal/yalıtkan/yarıiletken aygıtta ac gerilim uygulandığında arayüzey durumları ile çoğunluk taşıyıcı bandı arasındaki geçişler sonucu oluşan iletkenlik kayıplarını esas alır [53, 54]. Diğer taraftan yapıya uygulanan ac gerilim, aygıtın fermi enerjisinde salınımına sebep olurken yapıya uygulanan bir dc gerilim de aygıtın tüketme bölgesindeki kontrolünü sağlar [55]. Şekil 4.1b'de verilen eğri biriktirme, tüketme ve ters çevrilme şeklinde bir metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) tipi davranış göstermiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.1. Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapısının 1MHz sabit frekansta çizilmiş eğrileri:
a) kapasitans-gerilim ve b) iletkenlik-gerilim

Diğer taraftan kapasitans grafiklerine tekrar bakıldığında özellikle artan ters beslemde biriktirme bölgesinde eğrinin aşağı doğru büküldüğü görülmektedir. Schottky aygıtlarının seri direnci onların elektriksel özelliklerine olumsuz yönde etkiyerek ideal davranıştan saptırır. Aygıt kapasitesi ve iletkenliği üzerindeki seri direnç etkisini ortadan kaldırmak için admittans tekniğinden yararlanılmış ve seri direnç tayini için 4.1’de verilen denklem kullanılmıştır [51].

$$R_s = \frac{G_{m,acc}}{(G_{m,acc}^2 + \omega^2 C_{m,acc}^2)} \quad (4.1)$$

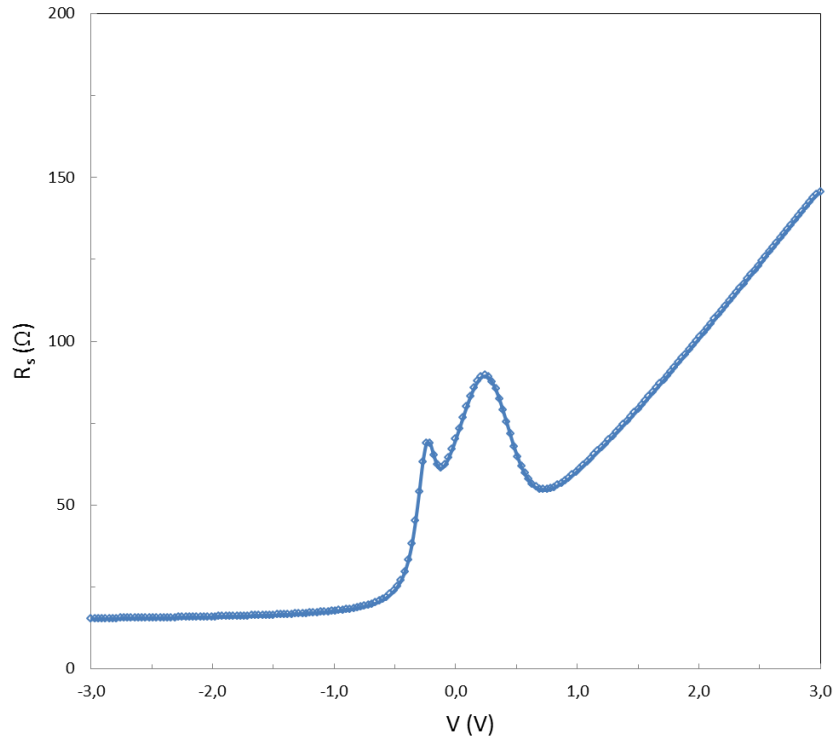
R_s = Seri direnç

$G_{m,acc}$ = Biriktirme bölgesinde elde edilmiş ölçümlerdeki iletkenlik değeri

$C_{m,acc}$ = Biriktirme bölgesinde elde edilmiş ölçümlerdeki kapasite değeri

ω = Açısai frekans

Şekil 4.2.’de aygıtın uygulanan harici voltaja bağlı seri direnç eğrisi görülmektedir. Şekil 4.2.’den görüldüğü üzere aygıtın seri direnç eğrisi arayüzey tuzaklarının lokalize olduğu sıfır harici voltaj civarlarında pikler vermektedir [56].



Şekil 4.2. Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapısının voltaja bağlı seri direnç eğrisi

Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapısının mevcut olan voltaja bağlı kapasitans ve iletkenlik eğrileri, (4.1) denklemi yardımıyla hesaplanan seri direncin etkisi de dikkate alınmak suretiyle (4.2), (4.3) ve (4.4) denklemleri kullanılarak tekrar elde edilmiştir.

$$C_c = \frac{(G_m^2 + w^2 C_m^2) C_m}{a^2 + w^2 C_m^2} \quad (4.2)$$

$$G_c = \frac{(G_m^2 + w^2 C_m^2) a}{a^2 + w^2 C_m^2} \quad (4.3)$$

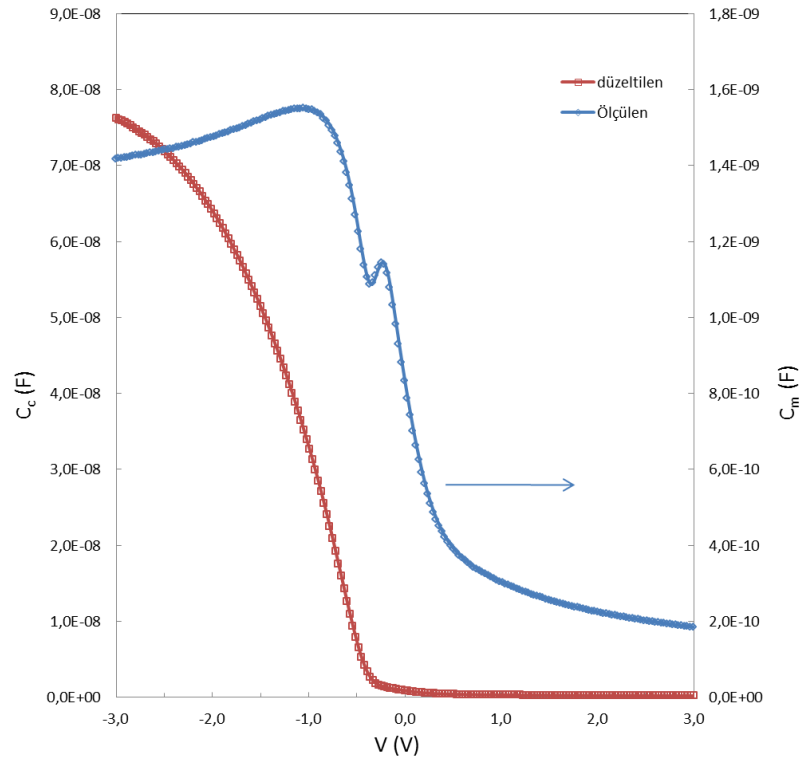
$$a = G_m - (G_m^2 + w^2 C_m^2) R \quad (4.4)$$

C_c = Düzeltilmiş kapasite değeri, G_c = Düzeltilmiş iletkenlik değeri,

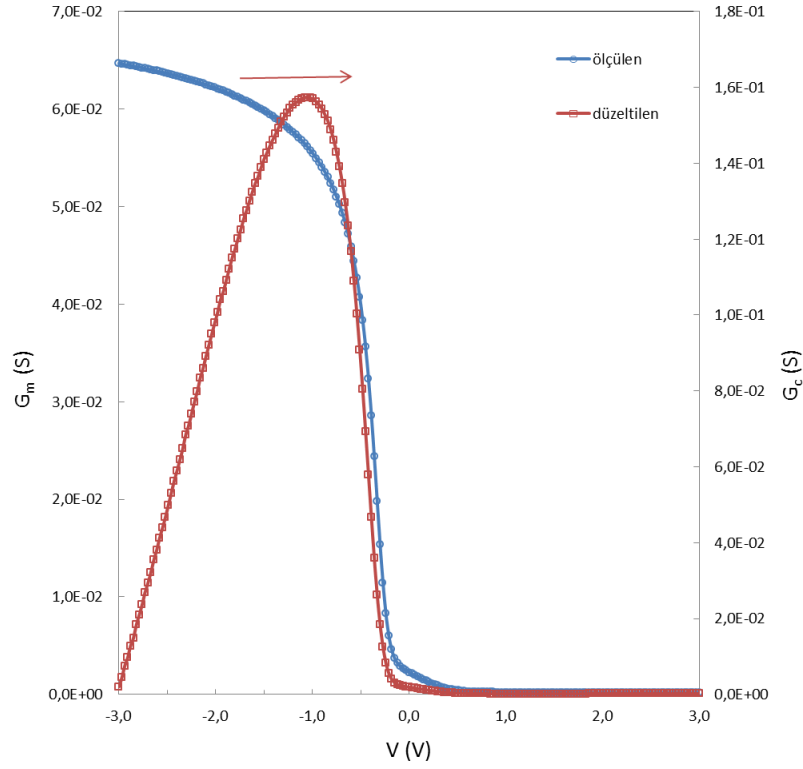
G_m = Deneysel olarak ölçülen iletkenlik, C_m = Deneysel olarak ölçülen kapasite,

R = Seri direnç

Şekil 4.3a ve b’de seri direnç etkisi dikkate alınarak yeniden elde edilmiş voltaja bağlı kapasitans ve iletkenlik eğrileri görülmektedir. Şekil 4.3b’den görüldüğü gibi, seri direnç etkisi dikkate alınarak yeniden çizilmiş iletkenlik eğrisinde bir pik oluşmuştur. Eğri incelendiğinde bu pikin yapıların tüketme bölgesinde meydana geldiği görülmektedir. Diğer taraftan voltaj eksenini boyunca oluşan kayma bize arayüzey durumlarının silisyum yarıiletkeninin yasak enerji bant aralığı boyunca dağılmış olduğu bilgisini vermektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.3. Seri direnç etkisi dikkate alınarak yeniden elde edilmiş voltaja bağlı; a) kapasitans, b) iletkenlik eğrileri

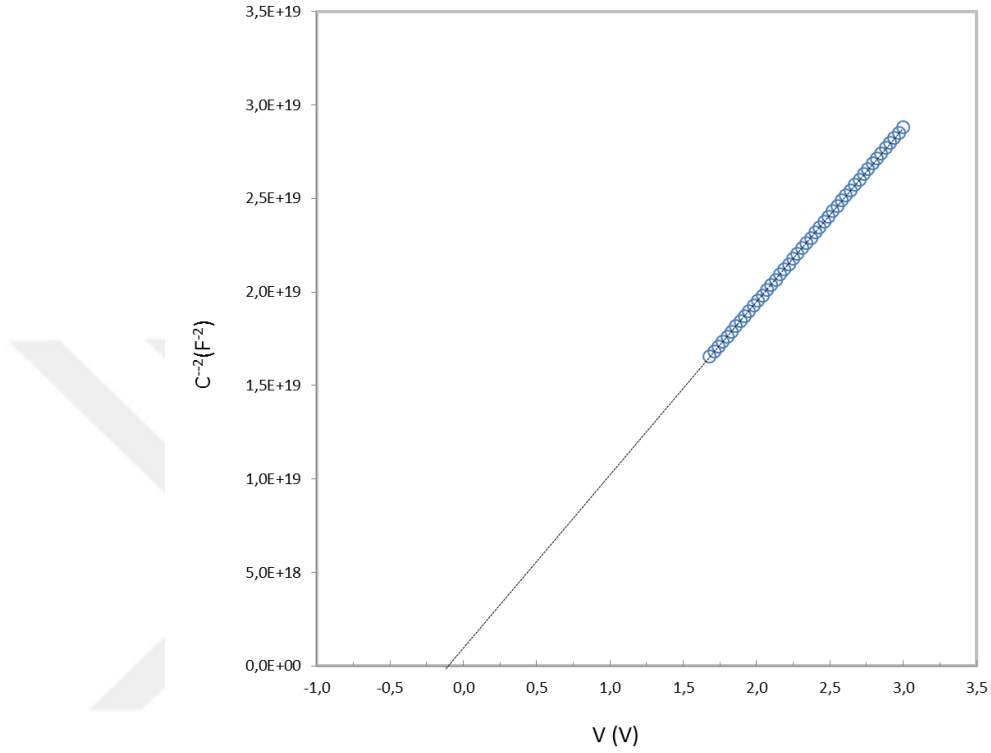
Şekil 4.4.'de Al/coronene/p-Si/Al Schottky yapısının seri direncin etkisi çıkarılarak elde edilmiş C^{-2} - V grafiği verilmiştir. Şekil 4.4.'den görüldüğü üzere eğrinin geniş bir voltaj aralığında lineer davranış göstermiştir. Arayüzey durumlarının varlığında V_o kesme voltajıyla yapı-içi potansiyeli V_{bi} (difüzyon potansiyeli) arasında aşağıdaki (4.5) ve (4.6) denklemleri mevcuttur [57].

$$V_o = \left(V_{bi} - \frac{kT}{q} \right) (1 + \alpha) \quad (4.5)$$

$$\alpha = qN_{ss} \delta / \epsilon_i \quad (4.6)$$

V_o = Kesme voltajı, V_{bi} = difüzyon potansiyeli, k = Boltzman sabiti,
 T = Kelvin cinsinden mutlak sıcaklık, q = elektronik yük, α = sabit,
 ϵ_i = Arayüzey tabakanın dielektrik sabiti, N_{ss} = Arayüzey durum yoğunluğu,
 δ = Arayüzey tabakası kalınlığı,

Şekil 4.4.'de verilen $C^{-2}-V$ grafiğinin gerilim ekseninin ekstrapole edilmesiyle yapının difüzyon potansiyeli elde edilmiştir.



Şekil 4.4. Al/coronene/p-Si/Al Schottky yapısının seri direncin etkisi çıkarılarak elde edilmiş $C^{-2}-V$ grafiği

Arayüzey durumlarının var olduğu dikkate alındığında N taşıyıcı yoğunluğu ile birlikte $C^{-2}-V$ eğrilerinin eğimi (4.7) ve (4.8) denklemleri ile verilir [11].

$$\frac{dC^{-2}}{dV} = \frac{2}{q \varepsilon_s A^2 N} (1+\alpha) \quad (4.7)$$

$$\alpha = \frac{q N_{ss} \delta}{\varepsilon_i} \quad (4.8)$$

$$\frac{dC^{-2}}{dV} = \text{Eğim}, \quad \varepsilon_i = \text{Arayüzey tabakanın dielektrik sabiti},$$

N_{ss} = Arayüzey durum yoğunluğu, δ = Arayüzey tabakası kalınlığı,

ε_s = Yarıiletkenin dielektrik sabiti, q = elektronik yük, α = sabit

N = taşıyıcı yoğunluğu, A = Diyot kontakt alanı

Diğer taraftan $(1 + \alpha)$ terimi C_2 ile temsil edilen bir sabite eşit olup, (4.7) denklemi yardımıyla (4.9) denklemine dönüşür.

$$C_2 = \frac{2}{q \varepsilon_s N_{\text{teorik}} \left(\frac{dC^{-2}}{dV} \right)} \cong \frac{N_{\text{deneysel}}}{N_{\text{teorik}}} \quad (4.9)$$

C_2 = sabit, N_{teorik} = Teorik taşıyıcı yoğunluğu,

N_{deneysel} = Deneysel taşıyıcı yoğunluğu,

Bu tez çalışmasında kullanılan $1,8 \Omega \cdot \text{cm}$ öz dirençli kristal için teorik taşıyıcı yoğunluğu (4.10) denkleminde hesaplanmıştır.

$$\rho = 1 / (q \mu_p N_{\text{teorik}}) \quad (4.10)$$

ifadesi yardımıyla $7,71 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulunmuştur. Burada p -tipi silisyum için mobilité $\mu_p = 450 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak alınmıştır [3]. Bu değer Şekil 4.4.'deki $C^{-2}-V$ grafiğinin eğiminden elde edilen $2,81 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ taşıyıcı yoğunluğu ile uyumludur. Yapıların tüketme tabakası genişliği (4.11) denklemi ile hesaplanmıştır.

$$W_D = \sqrt{\frac{2 \varepsilon_s \varepsilon_0 V_{bi}}{q N_{\text{deneysel}}}} \quad (4.11)$$

ε_0 = Boşluğun dielektrik sabiti

Bu tez çalışmasında kullanılan p tipi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi ile gerçek (katkısız) bir yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi arasındaki fark (4.12) denklemi ile verilir.

$$\phi_F = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_v}{N_{\text{deneysel}}} \quad (4.12)$$

N_v = Değerlik bandındaki etkin durumların yoğunluğu

Değerlik bandındaki etkin durumların yoğunluğu (4.13) denklemi ile verilir.

$$N_v = 4,82 \times 10^{15} T^{3/2} \left(\frac{m^*}{m_0} \right)^{3/2} \quad (4.13)$$

m^* = p tipi yarıiletkendeki deşiklerin etkin kütlesi, m_0 = Serbest elektron kütlesi,
 T = Kelvin cinsinden mutlak sıcaklık

Diyot parametrelerinin tayininde kullanılmak üzere değerlik bandındaki etkin durumların yoğunluğu, deşiklerin etkin kütlesi $0,55m_0$ alınarak [58] (4.13) denkleminde oda sıcaklığında $1,04 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Engel bölgesinde meydana gelen maksimum elektrik alanı (4.14) denklemi kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E(x=0) = E_m = \sqrt{\frac{2qN_{\text{deneysel}} V_{bi}}{\epsilon_s \epsilon_0}} \quad (4.14)$$

$E(x)$ = Schottky bölgesindeki elektrik alan, ϵ_0 = Boşluğun dielektrik sabiti

Schottky engel alçalması (4.15) denklemi kullanılarak elde edilmiştir.

$$\Delta\phi_B = \sqrt{\frac{q E_m}{4\pi\epsilon_s\epsilon_0}} \quad (4.15)$$

$\Delta\phi_B$ = Schottky engel alçalması

Al/coronene/p-Si/Al Schottky yapısının engel yüksekliği (4.16) denkleminde elde edilmiştir.

$$\Phi_B = V_{bi} + \Phi_F - \Delta\Phi_B \quad (4.16)$$

Φ_B = Schottky engel yüksekliği

Bir arayüzey tabakasının varlığı dikkate alındığında (4.16) denklemi, (4.17) denklemi şeklini alır [59]

$$\Phi_B = q(C_2 V_0 + \Phi_F) \quad (4.17)$$

Al/coronene/p-Si/Al Schottky yapısının C^2 - V grafiği yardımıyla elde edilen radyasyon öncesi yapı-içi potansiyeli (V_{bi}), engel yüksekliği (Φ_B), taşıyıcı yoğunluğu (N_a), maksimum elektrik alanı (E_m), tüketme tabakası genişliği (W_D) ve seri direnç (R_s) değeri Tablo 4.1.'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Al/coronene/p-Si/Al Schottky yapısının C^2 - V eğrilerinden elde edilen radyasyon öncesi V_{bi} , Φ_B , N_a , E_m , W_D ve R_s parametreleri

	V_{bi} (V)	Φ_B (eV)	N_a (cm ⁻³)	E_m (V/cm)	W_D (Å)	R_s (Ω)
Radyasyon öncesi	0,112	0,314	2,78x10 ¹⁵	0,86x10 ⁴	2001,5	14,71
Radyasyon sonrası	0,024	0,236	7,05x10 ¹⁵	0,76x10 ⁴	629,6	15,17

Schottky davranış gösteren eklemlerde geometrik kapasite kuvvetli biriktirme bölgesinde meydana gelir. Al/coronene/p-Si/Al Schottky yapısının arayüzey tabakasının kapasitesi C - V ve G - V ölçümleri yardımıyla (4.18) denklemi kullanılarak $1,53 \times 10^{-9}$ F olarak elde edilmiştir.

$$C_i = C_{m,acc} \left[1 + \left(\frac{G_{m,acc}}{w C_{m,acc}} \right)^2 \right] \quad (4.18)$$

C_i = Arayüzey tabakasının kapasitesi,

$C_{m,acc}$ = Biriktirme bölgesinde ölçülen kapasite,

$G_{m,acc}$ = Biriktirme bölgesinde ölçülen iletkenlik

Diğer taraftan arayüzey tabakasının kapasitesi yüksek frekans ve kuvvetli akümülyasyonda sabit olup sistemin maksimum kapasitesine (geometrik kapasite) eşittir ve (4.19) denklemi ile verilir.

$$C_i = \frac{\epsilon_0 \epsilon_i A}{\delta} \quad (4.19)$$

ϵ_0 = Boşluğun dielektrik sabiti,

ϵ_i = Arayüzey tabakasının dielektrik sabiti,

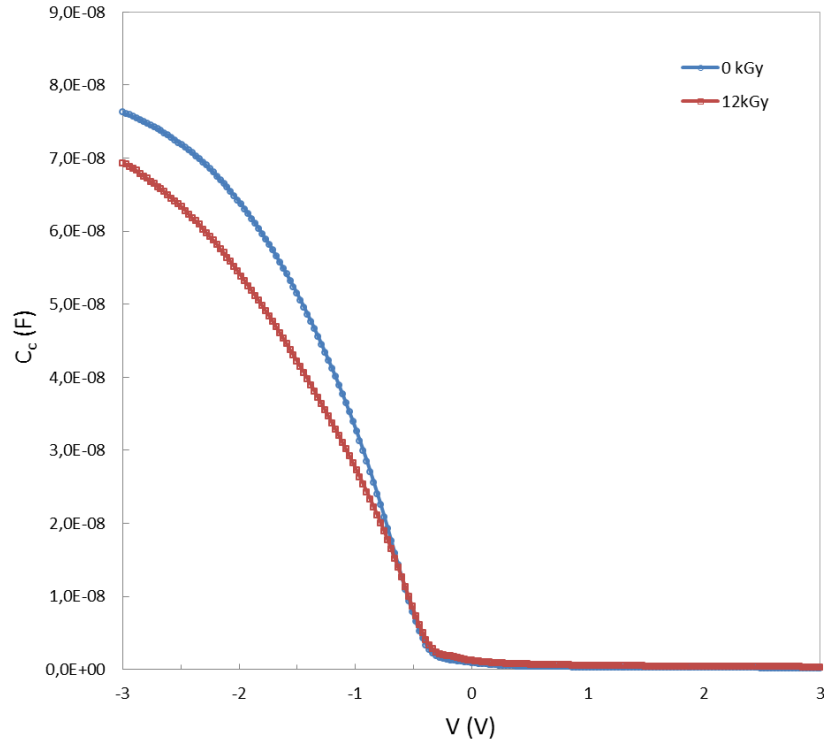
δ = Arayüzey tabakası kalınlığı,

A = Diyot kontakt alanı

Arayüzey tabakasının kalınlığı yüksek frekans (1MHz) C - V ölçümlerinden güçlü biriktirme bölgesi için (4.19) denklemi kullanılarak 35,7 nm olarak bulunmuştur. Burada $\epsilon_i = 2,89\epsilon_0$ [60] arayüzey tabakasının dielektrik sabitidir.

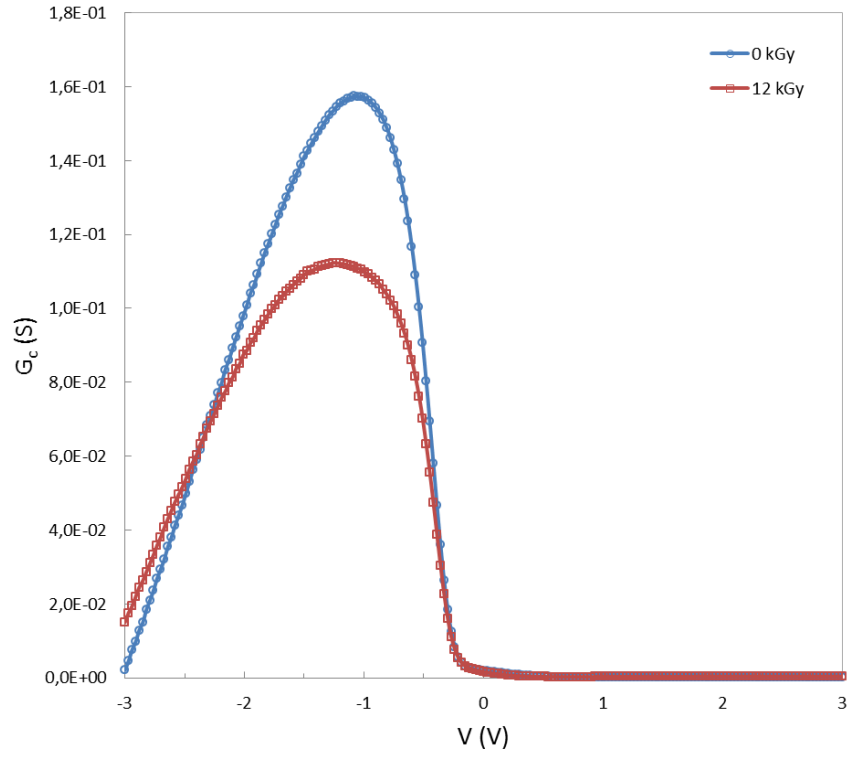
4.1.2. Radyasyon sonrası ölçümler

Üretilen Al/coronene/ p -Si/Al Schottky yapılarının temel karakterizasyon işlemlerinin ardından yapılar, 12 kGy'lik bir dozda gamma ışınına maruz bırakılmıştır. Elde edilen sonuçlar grafiklerle karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 4.5.'de Al/coronene/ p -Si/Al Schottky yapılarının oda sıcaklığında radyasyon öncesi ve sonrası voltaja bağlı kapasitans eğrileri verilmiştir. Aygıtlar radyasyon sonrası da biriktirme, tüketme ve ters çevrilme şeklinde bir metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) tipi davranış göstermiştir. Şekil 4.5.'e bakıldığında artan radyasyonla aygıt kapasitansının kuvvetli biriktirme bölgesinde azaldığı görülmektedir. Metal/yalıtkan/yarıiletken yapılarda seri direncin yalnızca biriktirme bölgesinde etki ettiği dikkate alındığında, bu durum iyonize radyasyonun meydana getirdiği seri direnç etkilerine atfedilebilir [61].



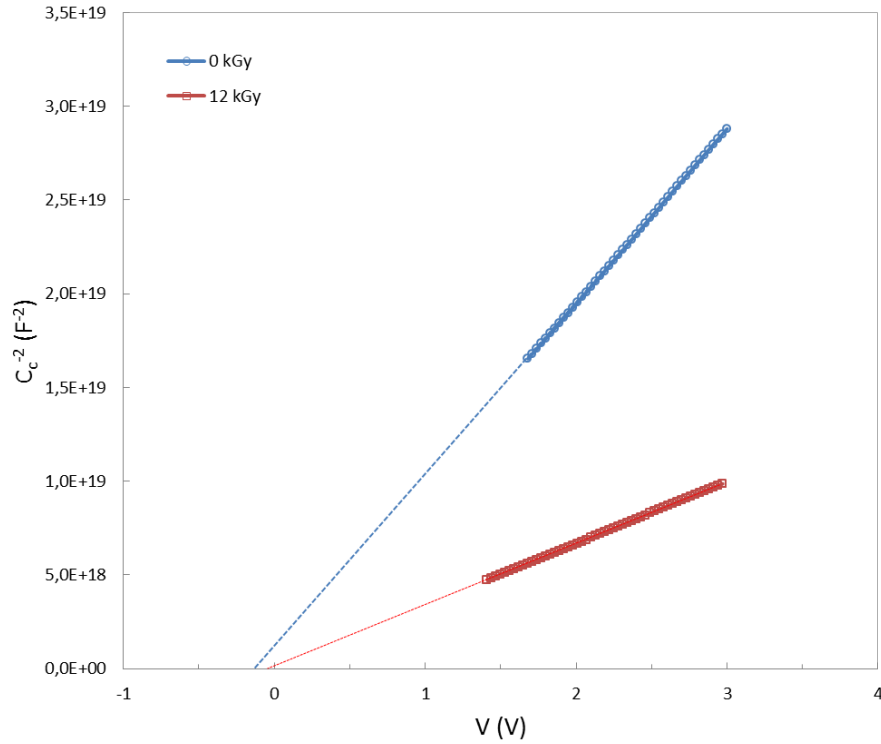
Şekil 4.5. Al/coronene/p-Si/Al Schottky yapılarının radyasyon öncesi ve sonrası kapasitans-gerilim eğrileri

Al/coronene/p-Si/Al Schottky yapılarının iletkenlik-gerilim eğrilerine gama radyasyonunun etkisi Şekil 4.6.'da verilmiştir. Yapının iletkenlik eğrileri biriktirme bölgesinde bir yarılma göstermiş ve aynı zamanda artan radyasyon dozu ile yapıların iletkenliği azalmıştır. Arayüzey durum yoğunluklarındaki değişimler iletkenlik eğrilerinde voltaj kaymalarına ve yarılmalara sebep olabilir. Diğer taraftan iletkenlik eğrilerindeki azalışa sebep olan unsurlar, arayüzey durumlarındaki ve seri dirençteki değişimlere atfedilebilir. Nitekim bazı çalışmalar, seri direncin metal/yalıtkan/yarıiletken yapıların elektriksel özelliklerinde değişimlere sebep olan aygıt gürültü oranlarının belirlenmesinde önemli bir rol oynadığını göstermiştir [62, 63].



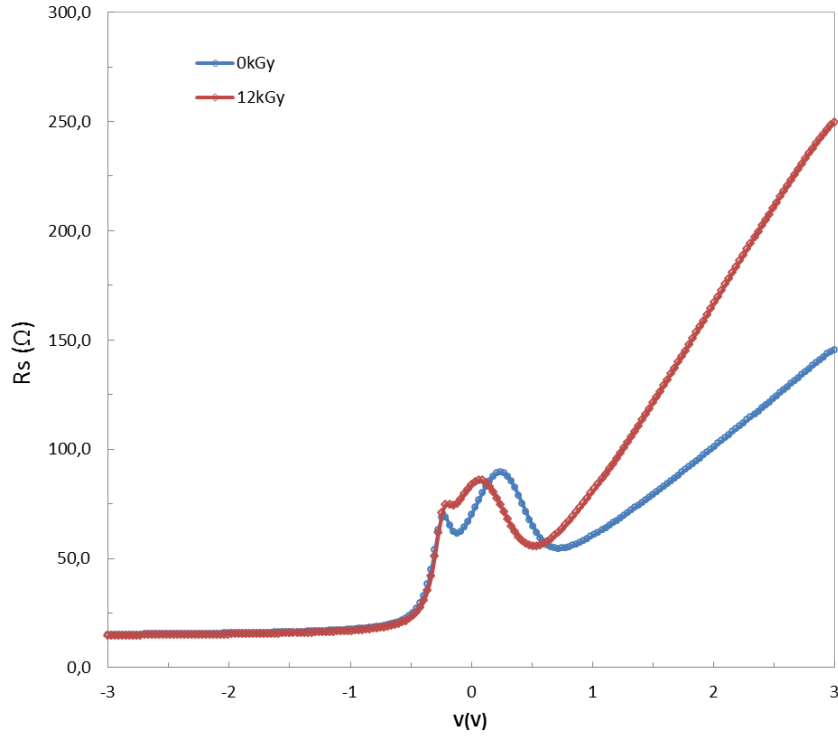
Şekil 4.6. Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapılarının radyasyon öncesi ve sonrası iletkenlik-gerilim eğrileri

Şekil 4.7.'de Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapılarının radyasyon öncesi ve sonrası C^{-2} - V grafiği verilmiştir. Şekil 4.4.'den görüldüğü üzere iyonize radyasyon sonrası eğrinin pozitif voltaj bölgesine doğru kaydığı ve geniş bir voltaj aralığında lineer bir davranış gösterdiği görülmektedir. Radyasyon sonrası elde edilen eğri yardımıyla hesaplanan temel diyot parametreleri parametreleri Tablo 4.1.'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapılarının radyasyon öncesi ve sonrası C^2 - V grafiği

Şekil 4.8.'de Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapılarının radyasyon öncesi ve sonrası voltaja bağlı seri direnç eğrileri verilmiştir. Şekil 4.8.'den görüldüğü gibi ters çevrilme bölgesinde uygulanan voltajdan etkilenmemiş ancak biriktirme bölgesinde radyasyon sonrası bir artış gözlenmiştir. Seri direncin bu voltaj bağımlılığı, arayüzey tuzak yükleri, oksit yükleri ve coronene/Si arayüzey sınırındaki oluşan parçacıkların bir sonucudur [62]. Diğer taraftan -0,3 ile 0,4 voltaj aralığında pikler görülmektedir. Seri direncin bu davranışı iyonize radyasyon tarafından oluşturulmuş arayüzey tuzak yüklerine ve uygulanan voltaja bağlı yük dağılımına atfedilebilir [62]. Şekil 4.8.'e bakıldığında iyonize radyasyon sonrası seri direnç değerinde bir artma görülmektedir. Bu artış radyasyonun meydana getirdiği alıcı benzeri arayüzey tuzaklarının oluşmasına atfedilebilir. İyonize radyasyona maruz kalan Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapılarının seri direnç değerleri radyasyon sonrası elde edilen 1MHz'lik C - V ve G - V eğrileri kullanılarak (4.1) denklemi yardımıyla belirlenmiş ve Tablo 4.1.'de verilmiştir.



Şekil 4.8. Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapılarının radyasyon öncesi ve sonrası voltaje bağlı seri direnç eğrileri

Metal/yalıtkan/yarıiletken yapılarda iyonize radyasyonun yapıya olan etkisinin incelenmesinde arayüzey durumları önemli bir parametredir. Ölçümlerden elde edilen gerileme bağlı kapasitans ve iletkenlik eğrileri kullanılarak iyonize radyasyon öncesi ve sonrası yapı içerisinde oluşmuş arayüzey durumları belirlenmiştir. Bunun için tek frekans yaklaşımını kullanan ve Hill-Coleman metodu adı verilen (4.19) denkleminde yararlanılmıştır [64].

$$D_{it} = \left(\frac{2}{qA} \right) \left[\frac{\frac{G_{m,maks}}{w}}{\left(\frac{G_{m,maks}}{wC_i} \right)^2 + \left(1 - \frac{C_m}{C_i} \right)^2} \right] \quad (4.19)$$

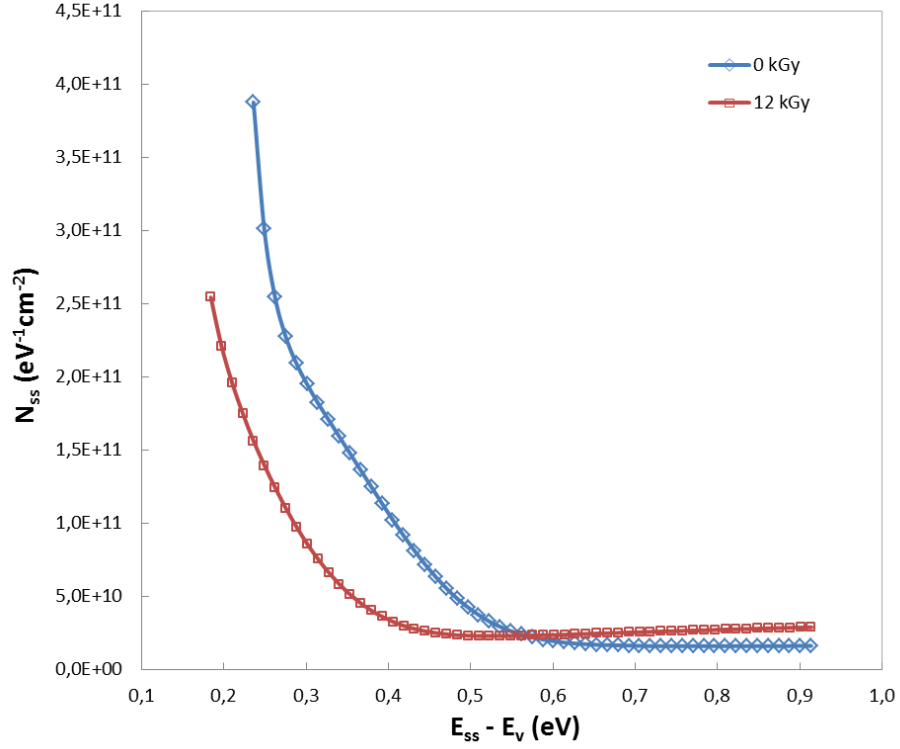
D_{it} = Arayüzey durumları, C_i = Arayüzey tabakanın kapasitesi,

w = Açısal frekans, $G_{m,maks}$ = Biriktirme bölgesinde ölçülen maksimum iletkenlik,

C_m = Maksimum iletkenlik değerine karşılık gelen kapasite,

A = diyot kontakt alanı, q = elektronik yük

Şekil 4.9.'da Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapısının Hill-Coleman metodu ile elde edilmiş iyonize radyasyon öncesi ve sonrası arayüzey durum yoğunluklarının enerjiye bağlı dağılımları verilmiştir.



Şekil 4.9. Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapısının iyonize radyasyon öncesi ve sonrası arayüzey durum yoğunluklarının enerjiye bağlı dağılımı

Şekil 4.9.'dan görüldüğü üzere Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapısının radyasyon öncesi arayüzey durum yoğunluk eğrisi bir süreklilik göstermekte olup, enerji bant aralığının ortasından E_v değerlik bandının üst kısmına doğru hızlı bir şekilde artmaktadır. Enerji dağılım profiline bakıldığında, arayüzey durumlarının $(0,23-E_v)$ ile $(0,58-E_v)$ enerji aralığında $3,87 \times 10^{11}$ 'den $0,20 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ değerine doğru değiştiği görülmektedir. Elde edilen arayüzey durumlarının değeri birçok metal/organik bileşik/yarıiletken aygıtlardan daha küçük çıkmıştır [65, 68].

İyonize radyasyon sonrası Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapıların arayüzey durumları Şekil 4.9.'dan görüldüğü gibi karmaşık bir davranış göstermiştir. Yapının arayüzey durumlarında önce bir azalma daha sonra da bir artış gözlenmiştir. Azalmanın özellikle değerlik bandının üst kısımlarında yerleşmiş donör benzeri aktif

arayüzey durumlarında olduğu görülmektedir. Bu durum oluşturulan coronene tabakası tarafından silisyum yüzeyinin pasifize edilmesi ve bunun sonucu olarak da yeniden birleşme merkezlerinin sayısının azaltılmasına atfedilebilir [62]. Diğer taraftan radyasyon sonrası iletkenlik bandının yakınlarında bulunan alıcı benzeri aktif yüzey durumlarda ise bir artış gözlenmiştir. Bu artışın ana sebebi coronene/Si arayüzeyinde radyasyon tarafından üretilmiş kusurlara atfedilebilir [69].

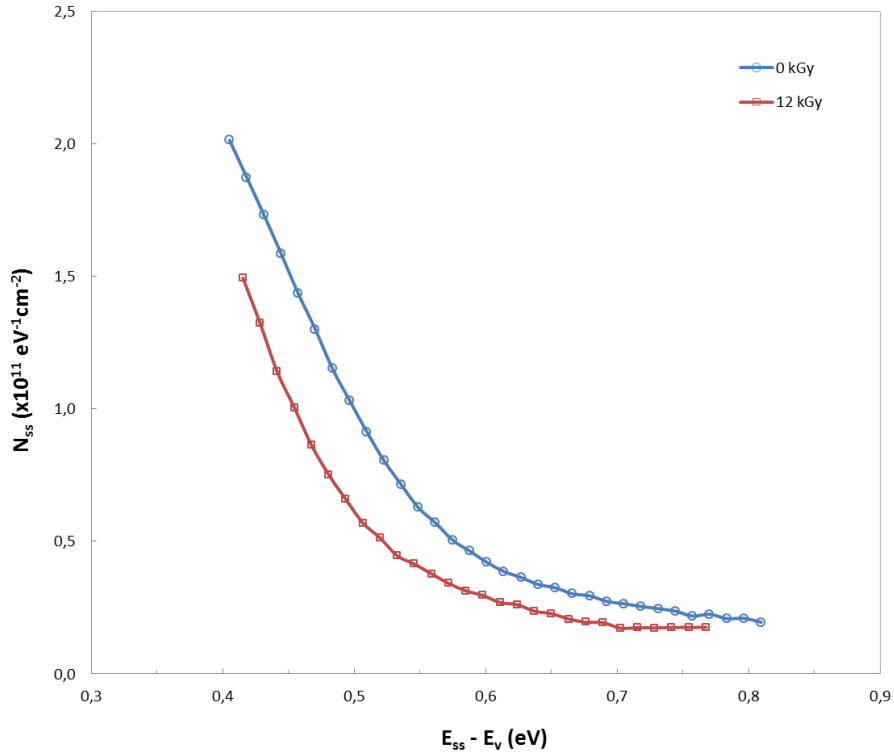
Kapasitans spektroskopisi kullanılarak arayüzey durumlarını belirleme tekniklerinden bir diğeri de yüksek frekans-düşük frekans kapasitans yöntemidir [70]. İki frekans yaklaşımının kullanıldığı bu bağıntı (4.20) denklemi ile verilir [70, 71].

$$N_{ss} = \frac{C_i}{qA} \left(\frac{C_{LF}}{C_i - C_{HF}} - \frac{C_{HF}}{C_i - C_{LF}} \right) \quad (4.20)$$

C_{LF} = Düşük frekansta alınmış kapasite ölçümleri,

C_{HF} = Yüksek frekansta alınmış kapasite ölçümleri,

Şekil 4.10.'da Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapısının yüksek frekans-düşük frekans kapasitans yöntemi ile elde edilmiş iyonize radyasyon öncesi ve sonrası enerjiye bağlı arayüzey durum yoğunluğu dağılımı verilmiştir. Burada 1MHz ve 1kHz frekanslarındaki kapasitans-gerilim ölçümleri kullanılmıştır. Şekil 4.10.'daki eğrilere bakıldığında Hill-Coleman yönteminden alınan sonuçlarla benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Tablo 4.2.'de kullanılan her iki metot için Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapısının radyasyon öncesi ve sonrası ortalama arayüzey durum yoğunlukları verilmiştir.



Şekil 4.10. Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapısının yüksek frekans-düşük frekans kapasitans yöntemi ile elde edilmiş enerjiye bağlı iyonize radyasyon öncesi ve sonrası arayüzey durum yoğunluğu dağılımı

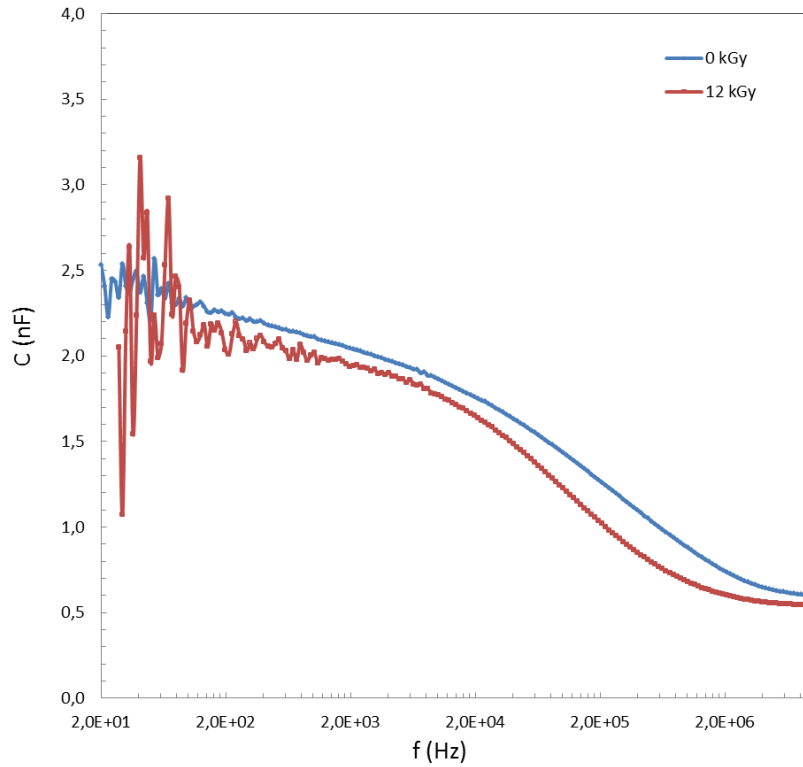
Tablo 4.2. Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapısının radyasyon öncesi ve sonrası ortalama arayüzey durum yoğunlukları

	Hill-Coleman Yön.	Alçak-düşük frekans Yön.
	N_{ss} ($\times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$)	N_{ss} ($\times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$)
Radyasyon öncesi	2,01	1,10
Radyasyon sonrası	1,39	0,83

4.1.3. Frekansa bağlı ölçümler

Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapısının kapasite-frekans ve iletkenlik-frekans ölçümleri oda sıcaklığında ve karanlık ortamda, 0 mV dc gerilim altında 20Hz ile 7MHz'lik bir frekans aralığında alınmıştır. Şekil 4.11.'de Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapısının iyonize radyasyon öncesi ve sonrası frekansa bağlı kapasitans eğrileri görülmektedir. Şekil 4.11.'de görüldüğü üzere düşük frekanslara doğru kapasitansın arttığı gözlenmiştir. Düşük frekanslardaki bu kapasitans artışı arayüzey

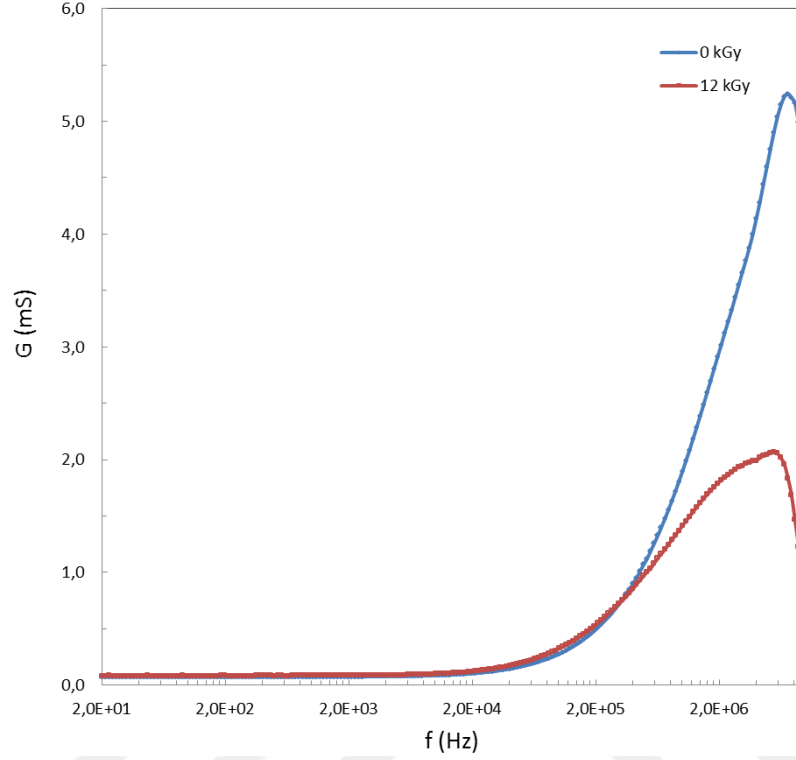
durumlarının uygulanan harici ac sinyali takip etmesine ve omik kontak direncine atfedilebilir [72]. Yüksek frekanslara doğru gidildikçe arayüzey durumları uygulanan harici ac sinyali takip edemediğinden dolayı kapasitans değerlerinde bir azalış görülmektedir. Diğer taraftan Şekil 4.11.'e bakıldığında artan radyasyon dozu ile kapasitansın azaldığı görülmektedir. Bu durum uygulanan radyasyon dozuna bağlı olarak azalan yüzey durumlarına atfedilebilir.



Şekil 4.11. Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapısının iyonize radyasyon öncesi ve sonrası frekansa bağlı kapasitans eğrileri

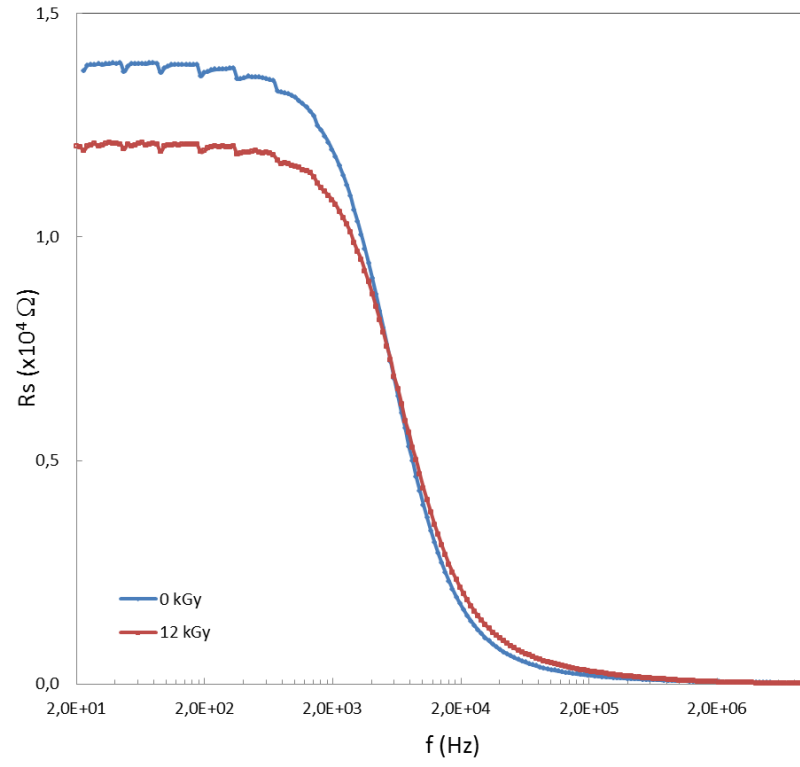
Şekil 4.12.'de Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapısının iyonize radyasyon öncesi ve sonrası frekansa bağlı iletkenlik eğrileri görülmektedir. Şekil 4.12.'ye bakıldığında iletkenlik eğrilerinin artan frekansla bir artış gösterdiği görülmektedir. Düşük frekanslarda arayüzey durumlarının (rekombinasyon merkezleri) etkili oluşu uzun zaman sabitli taşıyıcıların elektrotlara doğru hareketini engellemesine ve sonuçta iletkenliğin düşmesine sebep olmaktadır. Yüksek frekans değerlerine doğru rekombinasyon merkezleri etkisini yitirmekte ve iletkenlikte üstel bir artış gözlenmektedir. Diğer taraftan yapıların iletkenlikleri artan radyasyon dozu ile

azalmıştır. Bu durum radyasyona bağılı olarak yapıların seri dirençlerinin artmasına atfedilebilir.



Şekil 4.12. Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapısının iyonize radyasyon öncesi ve sonrası frekansa bağılı iletkenlik eğrileri

Şekil 4.13.'de Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapısının iyonize radyasyon öncesi ve sonrası frekansa bağılı seri direnç eğrisi görülmektedir. Şekil 4.13.'den görüldüğü gibi seri direnç eğrisi düşük frekanslardan yüksek frekanslara doğru bir eksponansiyel azalma göstermiştir. Seri direncin bu davranışı organik bileşik/Si arayüzeyinde lokalize olmuş arayüzey durumlarına atfedilebilir [3, 73, 74]. Şekil 4.13.'e bakıldığında radyasyon sonrası düşük frekanslarda yarıma ile birlikte bir azalma gözlenmiştir. Frekans arttıkça seri direncin radyasyona olan bağımlılığı azalmıştır.



Şekil 4.13. Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapısının iyonize radyasyon öncesi ve sonrası frekansa bağlı seri direnç eğrileri

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında, teknolojik öneme sahip Schottky diyotlarının organik arayüzeyli olanları üretilmiş ve iyonize radyasyona bağlı temel elektriksel parametrelerindeki değişimler incelenmiştir. Bunun için p tipi bir silisyum kristali üzerine coronene organik bileşiği kaplamak suretiyle çok sayıda Al/coronene/ p -Si/Al Schottky yapıları oluşturulmuş, bu yapılardan en iyi sonuç veren üzerinde karakterizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen Schottky diyotları gama radyasyonuna maruz bırakılmış, radyasyon öncesi ve sonrası kapasitans-gerilim ($C-V$) ve iletkenlik-gerilim ($G-V$) ölçümleri karanlık ortamda ve oda sıcaklığında alınmıştır. Bu ölçümlerle elde edilen veriler kullanılarak çeşitli yöntemler yardımıyla temel diyot parametreleri tayin edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Yapıların kapasitans-gerilim ve iletkenlik gerilim ölçümleri, yeterince yüksek bir frekansta (1 MHz) yapılmış olup, uygulanan ac sinyalinin arayüzey durumlarının takip etmesi mümkün olduğunca engellenmiştir. Böylece temel aygıt parametreleri tayininde yüzey durumlarından gelebilecek olası katkılar azaltılmıştır.

Kapasitans eğrilerinden görüldüğü üzere yapılar sıfır gerilim civarında pik verirken iletkenlikleri artan ters beslem ile artmıştır. Bu durum arayüzey durumlarının bu bölgede yerleşmiş olmasına atfedilmiştir.

Yapıların iletkenlik-gerilim eğrileri bir metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) tipi davranış göstermiş olup, biriktirme, tüketme ve ters çevrilme şeklinde davranışlar göstermiştir. Kapasitans eğrileri artan ters beslemle birlikte biriktirme bölgesinde aşağı doğru bükülme eğilimi göstermiştir. Buradan seri direncin biriktirme bölgesinde etkili olduğunu sonucuna varılmıştır.

Yapıların ölçüm verileri üzerindeki seri direnç etkisini minimuma indirmek için admitans tekniğinden faydalanılmıştır. Aygıtta uygulanan voltaja bağlı olarak elde edilen eğriler arayüzey tuzaklarının lokalize olduğu sıfır harici voltaj civarlarında pikler vermiştir. Admitans tekniği kullanılarak üretilen Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapısı için seri direnç değeri 15,17 Ω olarak bulunmuştur.

Yapıların iletkenlik ve kapasitans ölçüm verilerinin daha doğru elde edilebilmesi için seri direnç etkisinin bu ölçümlerden çıkarılması gerekir. Buradan hareketle Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapılarının tek frekanstaki kapasitans ve iletkenlik ölçümlerinden seri direncin etkisi admitans tekniği kullanılarak çıkarılmış ve voltaja bağlı kapasitans ve iletkenlik eğrileri yeniden elde edilmiştir. Elde edilen eğriler incelendiğinde iletkenlik eğrisinin tüketme bölgesinde pik ve gerilim eksenini boyunca da bir kayma olduğu gözlenmiştir. Bu pik bir Hill-Coleman piki olup bize, arayüzey durumlarının silisyumun yasak enerji bant aralığı boyunca dağılmış olduğu bilgisini vermiştir.

Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapılarının I/C^2 - V eğrileri geniş bir voltaj aralığında lineer bir davranış göstermiştir. Bu lineer bölge yardımıyla temel diyot parametreleri hesaplanmış, özellikle deneysel olarak elde edilmiş çoğunluk taşıyıcı yoğunluğu değeri ile teorik olarak elde edilmiş çoğunluk taşıyıcı yoğunluğu değeri birbiriyle uyumlu çıkmıştır.

Yapıların radyasyon sonrası kapasitans-gerilim ve iletkenlik gerilim ölçümleri alınmış ve karakterizasyon işlemleri tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar radyasyon öncesi ve sonrası şeklinde grafiklerle karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Aygıtların oda sıcaklığında radyasyon öncesi ve sonrası voltaja bağlı kapasitans eğrileri yine biriktirme, tüketme ve ters çevrilme şeklinde bir metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) tipi davranış göstermiş olup, artan radyasyonla kuvvetli biriktirme bölgesinde azaldığı görülmüştür. Bu durum, metal/yalıtkan/yarıiletken yapılarda seri direncin yalnızca biriktirme bölgesinde etki ettiği dikkate alınmış ve iyonize radyasyonun meydana getirdiği seri direnç etkilerine atfedilmiştir. Yapıların radyasyon sonrası gerilime

bağlı alınan kapasitans ve iletkenlik ölçümlerinden $C^{-2}-V$ eğrisi elde edilmiş ve karakterizasyon işlemleri tekrarlanmıştır. Tayin edilen temel diyot parametreleri radyasyon öncesi ve sonrası olmak üzere karşılaştırılmıştır.

Yapıların radyasyon sonrası seri direnç değerinde bir artma görülmüş olup, bu artış radyasyonun meydana getirdiği alıcı benzeri arayüzey tuzaklarının oluşmasına atfedilmiştir. Admitans tekniği kullanılarak üretilen Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapısı için radyasyon sonrası seri direnç değeri $15,17\Omega$ olarak bulunmuştur.

İyonize radyasyonun metal/yalıtkan/yarıiletken yapılara olan etkisinin incelenmesinde arayüzey durumları önemli bir parametredir. Buradan hareketle gerileme bağlı kapasitans ve iletkenlik ölçüm verileri kullanılarak iyonize radyasyon öncesi ve sonrası yapı içerisinde oluşmuş arayüzey durumları belirlenmiştir. Bunun için tek frekans yaklaşımının kullanıldığı Hill-Coleman metodundan yararlanılmıştır. Yapıların arayüzey durum yoğunluğu eğrileri bir süreklilik göstermiş olup, enerji bant aralığının ortasından değerlik bandının üst kısmına doğru hızlı bir şekilde artmıştır. Enerji dağılım profili (0,23-Ev) ile (0,58-Ev) enerji aralığında $3,87 \times 10^{11}$ 'den $0,20 \times 10^{11} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ değerine doğru değişmiş olup, birçok metal/organik bileşik/yarıiletken aygıttan daha küçük çıktığı görülmüştür. İyonize radyasyon sonrası arayüzey durumları önce azalarak daha sonra da artarak karmaşık bir davranış göstermiştir. Azalma değerlik bandının üst kısımlarında yerleşmiş donör benzeri aktif arayüzey durumlarında olmuş, bu durum silisyum üzerine oluşturulan coronene tabakası tarafından yüzeyinin pasifize edilmiş olmasına ve bunun sonucu olarak da yeniden birleşme merkezlerinin sayısının azalmasına atfedilmiştir. Diğer taraftan iletkenlik bandının yakınlarında bulunan alıcı benzeri aktif yüzey durumlarındaki artışın sebebi ise coronene/Si arayüzeyinde radyasyon tarafından üretilmiş kusurlara atfedilmiştir.

Bu çalışmada yapıların enerjiye bağlı arayüzey durum profilini elde etmek için iki frekans yaklaşımının kullanıldığı yüksek frekans-düşük frekans kapasitans yöntemi adı verilen bir başka yöntemden daha faydalanılmıştır. Düşük ve yüksek frekans olarak 1kHz ve 1MHz'lik kapasite verileri kullanılmış olup, radyasyon öncesi ve

sonrası elde edilmiş sonuçların, Hill-Coleman yönteminden alınan sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.

Yapıların frekansa bağlı kapasitans ve iletkenlik ölçümleri 20 Hz ile 7 MHz arasında ve sıfır dc beslemde alınmıştır. Radyasyon öncesi ve sonrası frekansa bağlı kapasitans eğrilerinde düşük frekanslara doğru artış gözlenmiştir. Düşük frekanslardaki bu kapasite artışı arayüzey durumlarının uygulanan harici ac sinyali takip etmesine ve omik kontak direncine atfedilmiştir. Yüksek frekanslara doğru gidildikçe arayüzey durumları uygulanan harici ac sinyali takip edememiş ve kapasite değerlerinde bir azalma görülmüştür. Bu durum uygulanan radyasyon dozuna bağlı olarak azalan yüzey durumlarına atfedilmiştir.

Yapıların iyonize radyasyon öncesi ve sonrası frekansa bağlı iletkenlik eğrilerinde artan frekansla bir artış görülmüştür. Düşük frekanslarda ise rekombinasyon merkezlerinin etkili olarak uzun zaman sabitli taşıyıcıların elektrotlara doğru hareketini engellediği ve sonuçta iletkenliğin düşmesine sebep olduğu sonucuna varılmıştır. Yüksek frekans değerlerine doğru ise rekombinasyon merkezlerinin etkisini yitirdiği ve sonuçta iletkenlik eğrisinde üstel bir artışa sebep olduğu görülmüştür. Bu durum radyasyona bağlı olarak yapıların seri dirençlerinin artmasına atfedilmiştir.

Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapısının iyonize radyasyon öncesi ve sonrası frekansa bağlı seri direnç eğrisi düşük frekanslardan yüksek frekanslara doğru bir eksponansiyel azalma göstermiştir. Seri direnci bu davranışı organik/Si arayüzeyinde lokalize olmuş arayüzey durumlarına atfedilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Rhoderick, E.H., Williams, R.H. Metal–Semiconductor Contacts, Clarendon Press, Oxford 1988.
- [2] Aydin, M.E., Yakuphanoglu, F., Eom, J.H. & Hwang, D.H., Electrical characterization of Al/MEH-PPV/P-Si Schottky diode by current-voltage and capacitance-voltage methods, *Physica B*, 387, 239-244, 2007.
- [3] Sze, S.M., *Physics of semiconductor devices*, 2nd ed. New York Wiley, 1981.
- [4] Rhoderick, E.H., *Metal–Semiconductor Contacts*, Oxford University Press, Oxford, 1978.
- [5] Braun, F., Ukey die Streikleitung durch Schwefelmetalle "Ann. Physik chem., 153, 556, 1874.
- [6] Bose, J.C., Detector for electrical disturbances, U.S. Patent 775, 840, 1904.
- [7] Wilson, A.H., The theory of electronic semi-conductors, *Proceedings of the Royal Society A*, 133, 822, 458, 1931.
- [8] Schottky, W., Halbleitertheorie der Sperrschicht, *Naturwiss.*, 26, 843, 1938.
- [9] Mott, N. F., Note on the contact between a metal and an insulator or semi-conductor, *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 34, 568-572, 1938.
- [10] Henisch, H.K., *Rectifying Semiconductor Contacts*, Oxford at the Clarendon Pres., Oxford, 1957.
- [11] Card, H. C., Rhoderick, E. H. Studies of Tunnel MOS Diodes I. Interface Effects In Silicon Schottky Diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4, 1589-160, 1971.
- [12] Yakuphanoglu F., Interface control and photovoltaic properties of n-type silicon/metal junction by organic dye, *Journal of Alloys and Compounds*, 494 (2), 451–455, 2010.

- [13] Sönmezoğlu, S., Şenkul, S., Taş, R., Çankaya, G., & Can, M., Electrical characteristics of an organic thin copolymer/p-Si Schottky barrier diode, *Thin Solid Films*, 518, 4375–4379, 2010.
- [14] Ocaka, Y.S., Kulakci, M., Kılıçoğlu, T., Turan, R., & Akkılıç, K., Current–voltage and capacitance–voltage characteristics of a Sn/Methylene Blue/p-Si Schottky diode, *Synthetic Metals*, 159, 1603–1607, 2009.
- [15] Forrest, S. R., Kaplan, M. L., Schmidt, P. H. Fddmann, W. L. & Yanowski, E. Organic-on-inorganic semiconductor contact barrier devices, *Applied Physics Letters*, 41, 90, 1982.
- [16] Sze, S. M., Crowell, C. R. & Kahng, D., Photoelectric Determination of the Image Force Dielectric Constant For Hot Electrons in Schottky Barriers, *Journal of Applied Physics*, 35, 2534, 1964.
- [17] Cowley, A. M., Sze, S. M. Surface States and Barrier Height of Metal-Semiconductor Systems. *Journal of Applied Physics*, 36, 3212-3220, 1965.
- [18] Barret, C., Vapaille, A. Interface states in a cleaved metal-silicon junction, *Journal of Applied Physics*, 50, 4217, 1979.
- [19] Rhoderic, E. M., Williams, R. H. *Metal Semiconductor Contacts*, 2nd Ed. Clarendon and Oxford, 1988.
- [20] Chattopadhyay, P., RayChaudhuri, B., Frequency dependence of forward capacitance-voltage characteristics of Schottky barrier diodes, *Solid-State Electronics*, 36, 4, 605-610, 1993.
- [21] Durlu, T. N. *Katıhal Fiziğine Giriş*, Zirve Ofset, Ankara, 1996.
- [22] Büget, U., Wright, G.T., Space-charge-limited current in silicon, *Solid-State Electronics*, 10, 3, 199-207, 1967.
- [23] Neamen D., *Semiconductor Physics and Devices*, University of New Mexico, Third Edition, Published by McGraw-Hill, 1992.
- [24] Ziel, A., *Solid-State Physical Electronics*, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1968.
- [25] Neamen, D., A., *Semiconductor Physics and Devices* 2nd ed., McGraw- Hill, New York, 420-450, 517-523 1997.
- [26] Cooke, M. J., *Semiconductor Devices*, Prentice Hall, New York, 294-308, 1990.

- [27] Fonash, S.J., The role of the interfacial Layer in Metal–Semiconductor Solar Cells, *Journal of Applied Physics*, 46, 1286-1289, 1975.
- [28] Sze, S.M., Kwok K. Ng., *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons, Inc., publication, 2006.
- [29] Berno, B., The preparation, characterization, and application of thin film devices, *Electronic Theses and Dissertations*, 1997.
- [30] Kundt, A., Ueber die Brechungsexponenten der Metalle, *Ann. Physik*, 34, 473, 1888.
- [31] Holmberg, K., Matthews, A., *Coatings Tribology, Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering*, Tribology Series, 28, 442, 1994.
- [32] Mattox, D., *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*, 792, William Andrew, 2010.
- [33] Smith, D., *Thin-Film Deposition: Principles and Practice*, 616, McGraw-Hill Professional, 1995.
- [34] Ohring, M., *Materials Science of Thin Films*, Academic Press, 794, 2001.
- [35] Dobkin, D.M., Zuraw, M.K., *Principles of Chemical Vapor Deposition*, Springer, 284, 2010.
- [36] Stefan, G., *Surface Engineering of Die Surfaces: Performance Evaluation And Characterization Of Physical Vapour Deposition (Pvd) Coatings*, LAP Lambert Academic Publishing, 120, 2009.
- [37] Smallman, R.E., Ngan, A.H.W., *Physical Metallurgy and Advanced Materials*, Seventh Edition, ButterworthHeinemann, 672, 2007.
- [38] John, E.M., *Physical Vapor Deposition of Thin Films*, Wiley-Interscience, 336, 2000.
- [39] Xiu-Tian, Y., Yongdong. X., *Chemical Vapour Deposition: An Integrated Engineering Design for Advanced Materials*, Springer, 341, 2010.
- [40] Eliezer, G., *Physical Electrochemistry: Fundamentals, Techniques and Applications*, Wiley-VCH, 394, 2011.
- [41] Gerhard, W., *Nanostructured Materials*, Elsevier Science, 384, 2009.

- [42] <https://www.spincoating.com.>, Eriřim Tarihi: 11.05.2019.
- [43] Tersoff, J., Schottky Barrier Heights and the Continuum of Gap States, Van der Waals Density Functional for General Geometries , 52, 465, 1984.
- [44] Rhoderick, E. H., The physics of Schottky barriers, Journal of Physics D, 1153, 1970.
- [45] Aygün, E., Zengin, D.M Atom ve Molekül Fizięi, 5. Baskı, Bilim Yayıncılık, Ankara, 2009.
- [46] Das, A., Ferbel, T., Introduction to Nuclear and Particle Physics, World Scientific Publishing Co. Ptc. Ltd., 2005.
- [47] Krane, K. S., Introductory Nuclear Physics, (Çeviri Editörü: Başar Şarer), Nükleer Fizik 1. Cilt , Palme Yayıncılık, Ankara, 2000.
- [48] <https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/interaction-radiation-matter/interaction-gamma-radiation-matter.>, Eriřim Tarihi: 07.05.2019.
- [49] <https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/interaction-radiation-matter/interaction-gamma-radiation-matter/compton-scattering/definition-of-compton-scattering> , Eriřim Tarihi: 01.05.2019.
- [50] <http://electrons.wikidot.com/pair-production-and-annihilation>, Eriřim Tarihi: 01.05.2019.
- [51] Nicollian, E. H., Brews, J. R., MOS Physics and Technology, Wiley, New York, 1982.
- [52] Morgan, D. V., Frey, J., Schottky barrier height: a design parameter for device applications, Solid-State Electronics, 22(10), 865-873, 1979.
- [53] Nicollian, E.H., Brews, J.R., MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology, Wiley & Sons, 2003.
- [54] Singh, A., Characterization of interface states at Ni/nCdF₂ Schottky barrier type diodes and the effect of CdF₂ surface preparation, Solid State Electronics, 28(3), 223, 1985.
- [55] Goetzberger, A., Nicollian, E.H., MOS conductance technique for measuring surface state parameters, Applied Physics Letters, 7, 216, 1965.

- [56] Maeda, K., Energy level broadening of defects causing nonideality in nearly ideal Si Schottky barriers, *Applied Surface Science*, 237, 165, 2004.
- [57] Akkal, B., Benamara, A., Gruzza, B. & Bideux, L., Characterization of Interface States at Au/InSb/InP(100) Schottky Barrier Diodes As A Function of Frequency Vacuum, 57, 219-228, 2000.
- [58] Jaros, M., *Physics and Applications of Semiconductor Microstructures*, Clarendon Press, Oxford, 1989.
- [59] Szatkowski, J., Sieranski, K., Interface Effects on Mg-Zn₃-P₂ Schottky Diodes. *Solid State Electronics*, 31, 257-260, 1988.
- [60] Barış, B., Karadeniz, S., Erdal & M. O., Preparation of coronene nanowires and its properties, *Materials Letters*, 205, 70–74, 2017.
- [61] Singh, V., Shashank, N., Sharma, S.K., Shekhawat, R.S., Kumar, D. & Nahar, R.K., Frequency dependence studies on the interface trap density and series resistance of HfO₂ gate dielectric deposited on Si substrate: Before and after 50 MeV Li³⁺ ions irradiation, *Nuclear Instrum Methods B*, 269, 2765, 2011.
- [62] Selcuk, A.B., Ocak, S.B., ⁶⁰Co γ -ray irradiation effects on the capacitance and conductance characteristics of tin oxide films on Si, *Nuclear Instrum Methods A*, 577, 719, 2007.
- [63] Tascioglu, I., Tataroglu, A., Ozbay, A. & Altindal, S., The role of ⁶⁰Co γ -ray irradiation on the interface states and series resistance in MIS structures, *Radiation Physics and Chemistry*, 79, 457, 2010.
- [64] Hill, W. A. Coleman, C. C., A single-frequency approximation for interface-state density determination, *Solid-State Electronics*, 23, 987, 1980.
- [65] Akkılıc, K., Ocak, Y.S., İlhan, S. & Kılıçoğlu, T., Effect of the binuclear Cu(II) complex interface layer on the calculation of electronic properties of Au/Cu(II) complex/n-Si organic–inorganic hybrid heterojunction, *Synthetic Metals*, 158, 969, 2008.
- [66] Akar, M. C, Türüt, A., Onganer, Y. J., Rectifying pyronine-B/p-type silicon junctions formed by sublimation of pyronine-B, *Mater. Sci.: Materials Electronics*, 15, 47, 2004.
- [67] Aydın, M. E., Türüt, A., The electrical characteristics of Sn/methyl-red/p-type Si/Al contacts, *Microelectronic Engineering*, 84, 2875, 2007.

- [68] Ebeoğlu, M. A., Kılıçoğlu, T. & Aydın, M.E., Low- and high-frequency C–V characteristics of the contacts formed by adding a solution of the nonpolymeric organic compound on p-type Si substrate, *Physica B* 395, 93, 2007.
- [69] Tugluoglu, N., ^{60}Co γ -ray irradiation effects on the interface traps density of tin oxide films of different thicknesses on n-type Si (1 1 1) substrates, *Nuclear Instrum Methods B*, 254, 118, 2007.
- [70] Castagne, R., Vapaille, A. Description of the SiO_2 -Si Interface Properties by Means of Very Low Frequency MOS Capacitance Measurements, *Surface Science*, 28, 157, 1971.
- [71] Kelberlau, U., Kassing, R. Nonequilibrium Properties of MIS-Capacitors. *Solid State Electronics*, 24, 321-327, 1981.
- [72] Batı, B., Nuhoğlu, Ç., Sağlam, N. & Türüt, A., On The Forward Bias Excess Capacitance at Intimate and MIS Schottky Barrier Diodes With Perfect Ohmic Back Contact. *Physica Scripta*, 53, 209-212, 2000.
- [73] Akkılıç, K., Ocak, Y.S., Kılıçoğlu, T., İlhan, S. & Temel, H., Calculation of current–voltage characteristics of a Cu (II) complex/n-Si/AuSb Schottky diode, *Current Applied Physics*, 10, 337, 2010.
- [74] Uslu, H., Altındal, S., Tunç, T., Uslu, I. & Mammadov, T.S., The illumination intensity and applied bias voltage on dielectric properties of au/polyvinyl alcohol (Co, Zn-doped)/n-Si Schottky barrier diodes, *Journal of Applied Polymer Science*, 120, 322, 2011.

ÖZGEÇMİŞ

Tuba ÖZTÜRK 1989 yılında Giresun’da doğdu. İlk, Orta ve Lise öğrenimini Giresun’da tamamladı. 2008 yılında Giresun Üniversitesi Fizik bölümünü kazandı. Fizik bölümünden Şubat 2014 yılında mezun oldu. 2015 yılında pedagojik formasyon eğitimini tamamladı. Aynı yıl girdiği Giresun Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği alanında Yüksek Lisans eğitimine başladı.

