

**Ni/*n*-4H-SiC ve Ni/*n*-6H-SiC TABANLI SCHOTTKY ve Au/Ni/*n*-4H-SiC ve Au/Ni/*n*-6H-SiC
OMİK KONTAKLARDA YÜKSEK ENERJİLİ ve DÜŞÜK DOZLU ELEKTRONLARLA
IŞINLAMANIN ETKİSİ**

Kübra ÇINAR

Yüksek Lisans Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Cevdet COŞKUN

2008

Her Hakkı Saklıdır

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ni/*n*-4H-SiC ve Ni/*n*-6H-SiC TABANLI SCHOTTKY ve Au/Ni/*n*-4H-SiC ve Au/Ni/*n*-6H-SiC OMİK KONTAKLARDA YÜKSEK ENERJİLİ ve DÜŞÜK DOZLU ELEKTRONLARLA IŞINLAMANIN ETKİSİ

Kübra ÇINAR

FİZİK ANABİLİM DALI

ERZURUM
2008

Her Hakkı Saklıdır

Doç. Dr. Cevdet COŞKUN danışmanlığında, Kübra ÇINAR tarafından hazırlanan bu çalışma ..10../..07../2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından, Fizik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Doç. Dr. Cevdet COŞKUN

İmza : 

Üye: Doç. Dr. Sadiir AYDOĞAN

İmza : 

Üye: Yrd. Doç. Dr. Tevhit KARACALI

İmza : 

Yukarıdaki sonucu onaylarım

(imza)

Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL
Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Ni/*n*-4H-SiC ve Ni/*n*-6H-SiC TABANLI SCHOTTKY VE Au/Ni/*n*-4H-SiC ve Au/Ni/*n*-6H-SiC OMİK KONTAKLARDA YÜKSEK ENERJİLİ ve DÜŞÜK DOZLU ELEKTRONLARLA IŞINLAMANIN ETKİSİ

Kübra ÇINAR

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Cevdet COŞKUN

Ni/*n*-4H-SiC ve Ni/*n*-6H-SiC Schottky ve Au/Ni/4H-SiC and Au/Ni/6H-SiC omik kontaklarda 6, 12 ve 15 MeV enerjili aşamalı elektron ışınlamasının etkileri ortaya çıkarıldı. Au/Ni/*n*-4H-SiC ve Au/Ni/*n*-6H-SiC omik kontakların özdirenç değerleri, artan ışınlama enerjisiyle azaldı. Işınlanmadan önce Au/Ni/*n*-4H-SiC ve Au/Ni/*n*-6H-SiC omik kontakların özdirenç değerleri sırasıyla $(17,1 \pm 0,71) \times 10^{-5} \Omega\text{-cm}^2$ ve $(5,41 \pm 2,89) \times 10^{-5} \Omega\text{-cm}^2$ 'dir. Elektron radyasyonundan önce düz beslem *I-V* ölçümlerinde, Ni/*n*-4H-SiC ve Ni/*n*-6H-SiC Schottky diyotlar için idealite faktörü sırasıyla 1.586 ve 1.125 hesaplandı. Elektron ışınlama enerjisi artarken idealite faktörü her iki kontak için arttı. Ni/*n*-4H-SiC için artan ışınlama enerjisi ile engel yüksekliği yaklaşık olarak 0.80 eV olduğu gözlemlendi. Ancak, Ni/*n*-6H-SiC Schottky kontakta ışınlamayla beraber engel yüksekliği 0.656- 0.730 eV'luk bir artış gözlemlendi. Aynı zamanda *C-V* ölçümleri kullanılarak engel yüksekliği Ni/6H-SiC ve Ni/4H-SiC sırasıyla 1.128 ve 1.410 eV olarak belirlendi. Ni/4H-SiC ve Ni/6H-SiC için donör konsantrasyonları sırasıyla 2.12×10^{15} ve $1.09 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ olarak hesaplandı. İdealite faktöründeki artış her iki diyotta elektron ışınlamayla bant aralığı içerisinde oluşan kusurlar nedeniyle termoiyonik emisyon teorisinden sapmasıyla açıklandı.

2008, 85 sayfa

Anahtar Kelimeler: Schottky diyod, omik kontak, elektron ışınlanması, 4H-SiC, 6H-SiC

ABSTRACT

Master Thesis

THE INFLUENCE OF HIGH ENERGY and LOW DOSE ELECTRON
IRRADIATION ON Ni /n-4H-SiC and Ni /n-6H-SiC BASED SCHOTTKY and Au/Ni
/n-4H-SiC and Au/Ni /n-6H-SiC OHMIC CONTACTS

Kübra ÇINAR

Atatürk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Supervisor: Assoc Prof. Dr. Cevdet COŞKUN

The effects of sequential electron irradiation (EI) with energies of 6, 12, 15 MeV on Ni/4H-SiC and Ni/6H-SiC Schottky and Au/Ni/4H-SiC and Au/Ni/6H-SiC ohmic contacts were investigated. Resistivity values of Au/Ni/n-4H-SiC and Au/Ni/n-6H-SiC ohmic contacts decrease with increasing electron irradiation. Before electron irradiation (EI), the resistivity values for Au/Ni/4H-SiC and Au/Ni/6H-SiC ohmic contacts are $(1,71 \pm 0,71) \Omega\text{-cm}^2$ and $(5,41 \pm 2,89) \Omega\text{-cm}^2$ respectively. The forward bias (current-voltage) *I-V* measurements result in ideality factors of 1.586 and 1.125 for Ni/4H-SiC and Ni/6H-SiC before EI, respectively. While the energy of EI is increasing, the ideality factor values increase for both SCs. Nearly constant barrier height about 0.80 eV was observed with the increasing energy of EI for the Ni/4H-SiC. However, the Ni/6H-SiC SC shows the increasing barrier height from 0.656 to 0.730 eV with EI. The donor concentrations were calculated 2.12×10^{15} and $1.09 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ Ni/4H-SiC SC and Ni/6H-SiC SC, respectively. The increase in ideality factor depicts that the both diodes deviate from the thermionic emission theory in charge transport mechanism, possibly increasing tunneling mechanism due to defects formed the band gap with EI.

2008, 85 pages

Keywords: Schottky diode, ohmic contact, electron irradiation, 4H-SiC, 6H-SiC

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma Atatürk Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde hazırlanmıştır. Çalışmalarım sırasında her türlü desteğini esirgemeyen kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. Cevdet COŞKUN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Schottky kontak hesaplamalarındaki desteğinden dolayı Sayın Doç. Dr. Şakir AYDOĞAN'a ve Sayın Yrd. Doç. Emre GÜR'e çok teşekkür ederim. Radyasyon aşamasında sistemin kullanılması ve gerekli ayarlamaların yapılmasında desteğini esirgemeyen Sayın Korkmaz ŞERİFOĞLU'na teşekkür ederim. Bu çalışmanın gerçekleşmesine imkan sağlayan Atatürk Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünün değerli öğretim üyelerine ve Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünün değerli yöneticilerine teşekkürlerimi sunarım.

Kübra ÇINAR

10.07.2008

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	3
2.1. SiC.....	3
2.2. SiC'in Diğer Yarıiletkenlere Göre Sahip Olduğu Üstün Özellikleri.....	4
2.3. SiC'in Politipliliği.....	5
2.4. SiC'in Büyütme Metotları.....	8
2.4.a. Süblimleşme metodu.....	8
2.4.b. Acheson metodu.....	9
2.4.c. Lely büyütme metodu.....	9
2.4.d. Fiziksel buhar taşıma metodu.....	9
2.4.e Sıvı faz epitaksi metodu.....	10
2.5. SiC'in Kimyasal Temizliği.....	10
2.6. Metal/ Yarıiletken Kontaklar.....	12
2.6.1. Doğrultucu (Schottky) kontaklar.....	12
2.4.2. İdeal kontak özellikleri.....	16
2.6.3. İdeal olmayan engel yüksekliğinin etkileri.....	17
2.6.4. Akım-gerilim (I - V) ölçümleri.....	20
2.7. Metal/ Yarıiletken Omik Kontaklar.....	26
2.7.1. İdeal doğrultucu olmayan engel.....	26
2.7.2. Tünelleme engeli.....	30
2.7.3. Spesifik kontak direnci.....	31
2.7.4. Omik kontak karakterizasyonu.....	32
2.8. Schottky Kontakların Karakterizasyonu.....	34

2.8.1. Akım-gerilim (I - V) ölçümleri.....	34
2.8.2. Cheung fonksiyonları yardımıyla Schottky diyot parametrelerinin belirlenmesi.....	35
2.8.3. İdeal bir diyot nasıl olmalıdır?.....	37
2.9. Yarıiletken Malzemelerde Radyasyon Etkileri.....	37
2.9.1. İyonizasyon zararı.....	38
2.9.2. Yerdeğiştirme zararı.....	39
2.9.3 Elektron radyasyonu.....	40
2.9.4. Lineer hızlandırıcılar.....	41
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	42
3.1. Giriş.....	42
3.2. Gölge Maskeler.....	43
3.3. Omik Kontak Direnci Ölçümleri İçin Prop Düzeneğinin Hazırlanması.....	44
3.4. Işınlamada Kullanılan Lineer Elektron Hızlandırıcı (Siemens-Primus).....	46
3.5. Numunelerin Hazırlanması.....	48
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	50
4.1. Omik Kontak Direnci Ölçüm Sonuçları.....	50
4.2. Schottky Kontak Ölçümleri.....	52
4.2.1. 6 MeV ışınlama.....	55
4.2.2. 12 MeV ışınlama.....	59
4.2.3. 15 MeV ışınlama	62
4.3 Cheung Fonksiyonları Kullanılarak Elde Edilen Seri Direnç Hesaplamaları.....	66
5.SONUÇ ve TARTIŞMA.....	73
5.1 Giriş.....	73
5.2 Omik Kontak Ölçümlerinin Tartışılması.....	74
5.3 Schottky Kontak Ölçümlerinin Tartışılması.....	75
KAYNAKLAR.....	83
ÖZGEÇMİŞ.....	86

SİMGELER DİZİNİ

A	Diyodun etkin alanı
A^*	Richardson sabiti
C-V	Kapasite-gerilim
DI	Deiyonize
E_F	Fermi enerji seviyesi
e	Elektronun yükü
$I - V$	Akım-gerilim
k	Boltzmann sabiti
R_m	Omik kontak direnci
SEM	Scanning Electron Microscopy
TLM	Transmission Line Method
T	Sıcaklık
V_{dif}	Difüzyon potansiyeli
LD	Lazer diyot
LED	Işık yayan diyot
χ	Elektron ilgisi
I_o	Saturasyon akımı
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
L_T	Transfer uzunluğu
ρ_c	Spesifik omik kontak öz direnci
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
R_c	Omik kontak direnci
N_d	İyonize olmuş donör konsantrasyonu
N_c	Yarıiletkenin iletkenlik bandındaki etkin hal yoğunluğu
n	İdaelite faktörü
Φ_b	Schottky engel yüksekliği,
ϵ_o	Boşluğun dielektrik sabiti

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Si, GaAs, InP ve SiC'in hız ve elektrik alan ilişkisi.....	4
Şekil 2.2. 3C SiC'in kristal yapısı.....	6
Şekil 2.3. C ve Si atomları arasında Zinc-blende ve Wurtzite bağlanma üçlü tetrahedral bağlar, kübik durumda ve hegzagonal durumda aynadaki yansımaları 60 derece döndürülerek elde edildiği şekil.....	6
Şekil.2.4. a) 4H-SiC'in kristal yapısı. Atomların yarısı kübik diğer yarısı da hegzagonal bağlıdır. b) 6H-SiC'in kristal yapısı. Örgünün üçte ikisi kübik ve üçte biri hegzagonaldır.....	7
Şekil 2.5. Bir 3C/6H-SiC heteroeklemin gösterimi.....	8
Şekil 2.6. 6H-SiC'in (0001) _{Si} yüzeyinin yapısı.....	11
Şekil 2.7. a) Kontak yapılmadan önce metal ve yarıiletkenin enerji bant diyagramı, b) $\Phi_m > \Phi_s$ için metal- <i>n</i> tipi yarıiletken kontağın ideal enerji bant diyagramı.....	13
Şekil 2.8. a) Ters beslem durumunda, b) Düz beslem durumunda bir metal-yarıiletken kontağın ideal enerji bant diyagramı.....	15
Şekil 2.9. a) Bir metal-dielektrik arayüzeyde imaj yük ve elektrik alan çizgileri, b) sıfır elektrik alan, c) sabit bir elektrik alan uygulandığı durumu gösterir.....	19
Şekil 2.10. İmaj azalma etkisi içeren bir doğru beslenmiş metal-yarıiletken kontağın enerji bant diyagramı.....	22
Şekil 2.11. Bir Schottky diyot ve bir <i>p-n</i> eklem diyot arasındaki doğru beslem durumunda <i>I-V</i> karakteristiklerinin karşılaştırılması.....	26
Şekil 2.12. $\Phi_m < \Phi_s$ durumunda bir metal- <i>n</i> -tipi yarıiletken kontak için a) kontakdan önce, b) kontakdan sonraki ideal enerji-bant diyagramı.....	27
Şekil 2.13. a) Metale pozitif voltaj uygulandığında, b) Yarıiletkene pozitif voltaj uygulandığında bir metal <i>n</i> -tipi yarıiletken omik kontağın ideal enerji-bant diyagramı.....	28
Şekil 2.14 $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda bir metal- <i>p</i> -tipi yarıiletken kontak için a) kontakdan önceki ve b) kontakdan sonraki durumu.....	29

Şekil 2.15. Metal-yoğun katkılı n -tipi -yarıiletken kontağın enerji bant diyagramı.....	30
Şekil 2.16. Spesifik omik kontak ölçümünde kullanılan basamaklı yapı.....	32
Şekil 2.17. Potansiyel konum grafiği.....	33
Şekil 2.18. a) iyonizasyon, b) Compton Saçılması.....	38
Şekil2.19.Hedef materyal ile yüksek enerjili foton etkileşmesi.....	39
Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan omik ve Schottky gölge maskeler.....	43
Şekil 3.2. Omik kontak ölçüm paterninin SEM filmi.....	44
Şekil 3.3. Prob istasyonu ve kullanımı.....	45
Şekil 3.4. Omik kontak direnci ölçümünde kullanılan deneysel düzenek.....	45
Şekil 3.5. Siemens-Primus doğrusal lineer hızlandırıcı	47
Şekil 4.1. Au/Ni/ n -4H-SiC spesifik omik kontak özdirencinin ışınlamaya bağlı değişimine ait grafik.....	51
Şekil 4.2. Au/Ni/ n -6H-SiC Spesifik omik kontak özdirencinin ışınlamaya bağlı değişimi.....	51
Şekil 4.3. Işınlanmadan önce Ni/ n -4H-SiC diyodunun I - V grafiği.....	52
Şekil 4.4. Işınlanmadan önce Ni/ n -4H-SiC diyodunun $f=50$ kHz' de C - V grafiği.....	53
Şekil 4.5. Işınlamadan önce Ni/ n -4H-SiC diyodunun $1/C^2$ - V grafiği.....	53
Şekil 4.6. Işınlanmadan önce Ni/ n -6H-SiC diyodunun I - V grafiği.....	54
Şekil 4.7. Işınlanmadan önce Ni/ n -6H-SiC diyodunun 50 kHz' de C - V grafiği.....	54
Şekil 4.8. Işınlamadan önce Ni/ n -6H-SiC diyodunun $1/C^2$ - V grafiği.....	55
Şekil 4.9. 6 MeV'de ışınlanan Ni/ n -4H-SiC diyodunun I - V grafiği.....	56
Şekil 4.10. 6 MeV'de ışınlanan Ni/ n -4H-SiC diyodunun $f=50$ kHz'de C - V grafiği.....	56
Şekil 4.11. 6 MeV'de ışınlanan Ni/ n -4H-SiC diyodunun $1/C^2$ - V grafiği.....	57
Şekil 4.12. 6 MeV'de ışınlanan Ni/ n -6H-SiC diyodunun I - V grafiği.....	57
Şekil 4.13. 6 MeV'de ışınlanan Ni/ n -6H-SiC diyodunun 50 kHz' de C - V grafiği.....	58
Şekil 4.14. 6 MeV'de ışınlanan Ni/ n -6H-SiC diyodunun $1/C^2$ - V grafiği.....	58
Şekil 4.15. 12 MeV'de ışınlanan Ni/ n -4H-SiC diyodunun I - V grafiği.....	59
Şekil 4.16. 12 MeV'de ışınlanan Ni/ n -4H-SiC diyodunun C - V grafiği.....	60
Şekil 4.17. 12 MeV'de ışınlanan Ni/ n -4H-SiC diyodunun $1/C^2$ - V grafiği.....	60
Şekil 4.18. 12 MeV'de ışınlanan Ni/ n -6H-SiC diyodunun I - V grafiği.....	61

Şekil 4.19. 12 MeV’de ışınlanan Ni/n-6H-SiC diyodunun 50 kHz’ de C-V grafiği.....	61
Şekil 4.20. 12 MeV’de ışınlanan Ni/n-6H-SiC diyodunun $1/C^2$ -V grafiği.....	62
Şekil 4.21. 15 MeV’de Ni/n-4H-SiC diyodunun I-V grafiği.....	63
Şekil 4.22. 15 MeV’de ışınlanan Ni/n-4H-SiC diyodunun f=50 kHz’ de C-V grafiği....	63
Şekil 4.23. 15 MeV’de ışınlanan Ni/n-4H-SiC diyodunun $1/C^2$ -V grafiği.....	64
Şekil 4.24. 15 MeV’ de ışınlanan Ni/n-6H-SiC diyodunun I-V grafiği.....	64
Şekil 4.25. 15 MeV’de ışınlanan Ni/n-6H-SiC diyodunun f=50 kHz’ de C-V grafiği...	65
Şekil 4.26. 15 MeV’de ışınlanan Ni/n-6H-SiC diyodunun $1/C^2$ -V grafiği.....	65
Şekil 4.27. Ni/n-4H-SiC diyodunun dV/dln(I) ve H(I)’nın I’ya karşı değişimi.....	66
Şekil 4.28. 6 MeV’de ışınlanan Ni/n-4H-SiC diyodunun dV/dln(I) ve H(I)’nın I’ya karşı değişimi.....	67
Şekil 4.29. 12 MeV’de ışınlanan Ni/n-4H-SiC diyodunun dV/dln(I) ve H(I)’nın I’ya karşı değişimi.....	67
Şekil 4.30. 15 MeV’de ışınlanan Ni/n-4H-SiC diyodunun dV/dln(I) ve H(I)’nın I’ya karşı değişimi.....	68
Şekil 4.31 Ni/n-6H-SiC diyodunun dV/dln(I) ve H(I)’nın I’ya karşı değişimi.....	69
Şekil 4.32. 6 MeV’de ışınlanan Ni/n-6H-SiC diyodunun dV/dln(I) ve H(I)’nın I’ya karşı değişimi.....	70
Şekil 4.33. 12 MeV’de ışınlanan Ni/n-6H-SiC diyodunun dV/dln(I) ve H(I)’nın I’ya karşı değişimi.....	70
Şekil 4.34. 15 MeV’de ışınlanan Ni/n-6H-SiC diyodunun dV/dln(I) ve H(I)’nın I’ya karşı değişimi.....	71
Şekil 5.1. Işınlamalar sonucu elde edilen Au/Ni/n-4H-SiC ve Au/Ni/n-4H-SiC diyodlarının omik kontak ölçüm grafiği.....	74
Şekil 5.2. Işınlamalar sonucu elde edilen Ni/n-4H-SiC diyodunun I-V grafiği.....	76
Şekil 5.3. Işınlamalar sonucu elde edilen Ni/n-4H-SiC diyodunun f=50 kHz’ de C-V grafiği.....	77
Şekil 5.4. Işınlamalar sonucu elde edilen Ni/n-4H-SiC diyodunun $1/C^2$ -V grafiği.....	77
Şekil 5.5. Işınlamalar sonucu elde edilen Ni/n-6H-SiC diyodunun I-V grafiği.....	79

Şekil 5.6. Işınlamalar sonucu elde edilen Ni/n-6H-SiC diyodunun f=50 kHz'de C-V grafiği.....	79
Şekil 5.7. Işınlamalar sonucu elde edilen Ni/n-6H-SiC diyodunun $1/C^2$ -V grafiği.....	80
Şekil 5.8. Ni/n-4H-SiC kontağının idealite faktörü ve donör konsantrasyonuna karşılık ışınlama enerjisinin değişimi.....	81
Şekil 5.9. Ni/n-4H-SiC kontağının engel yüksekliği ve difüzyon potansiyeline karşılık ışınlama enerjisinin değişimi.....	81
Şekil 5.10. Ni/n-6H-SiC kontağının idealite faktörü ve donör konsantrasyonuna karşılık ışınlama enerjisinin değişimi.....	82
Şekil 5.11. Ni/n-6H-SiC kontağının engel yüksekliği ve difüzyon potansiyeline karşılık ışınlama enerjisinin değişimi.....	82

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Oksijen plazma ve flourinli gaz RIE (Reaktif iyon kimyasal temizleme) için SiC kimyasal temizleme sonuçları. Kenar profil oranı, düşey kimyasal temizleme oranının yanal temizleme oranına bölümünü temsil eden değerler.....	10
Çizelge 2.2. Birkaç elementin iş fonksiyonu.....	12
Çizelge 2.3. Birkaç elementin elektron yakınlığı.....	12
Çizelge 4.1. Ni/n-4H-SiC spesifik omik kontak değerleri.....	53
Çizelge 4.2. Ni/n-6H-SiC spesifik omik kontak değerleri.....	53
Çizelge 4.3. Ni/n-4H-SiC diyodunun $dV/d\ln(I)$ 'nın I 'ya karşı değişimi ile elde edilen seri direnç ve idealite faktörünün değerleri.....	71
Çizelge 4.4. Ni/n-4H-SiC diyodunun $H(I)$ 'nın I 'ya karşı değişimi ile elde edilen seri direnç ve engel yüksekliği değerleri.....	72
Çizelge 4.5. Ni/n-6H-SiC diyodunun $dV/d\ln(I)$ 'nın I 'ya karşı değişimi ile elde edilen seri direnç ve idealite faktörünün değerleri.....	75
Çizelge 4.6. Ni/n-6H-SiC diyodunun $H(I)$ 'nın I 'ya karşı değişimi ile elde edilen seri direnç ve engel yüksekliği değerleri.....	75
Çizelge 5.1. Işınlamalar sonucu elde edilen Ni/n-4H-SiC için Schottky kontak değerleri.....	79
Çizelge 5.2. Işınlamalar sonucu elde edilen Ni/n-6H-SiC için Schottky Kontak değerleri.....	81

1. GİRİŞ

1900 yılında Max Planck'ın ortaya attığı ‘‘kuantum hipotezi’’ ile fizikte yeni bir çağ açıldı. Kuantum mekaniği, mekanik ve elektromanyetizmanın klasik kuramlarının atomik yapı ve elektromanyetik ışınının bazı özelliklerini açıklamadaki yetersizliğine cevap olarak geliştirildi. Kuantum teorisi, fiziğin pek çok dalında büyük ilerlemeler sağladı. Bu ilerlemeler katı maddelerin mekanik, elektriksel, manyetik ve optik özelliklerini inceleyen katıhal fiziğinde de görüldü. Böylece, günümüzde katıhal fiziği kuantum teorisinin en önemli uygulama alanlarından birisi haline gelmiştir. Katı maddelerin seçiminde etkili olan elektriksel iletkenlik, katıhal fiziğinde geniş yer buldu ve iletkenliklerine göre katıları yalıtkan, yarıiletken ve iletken şeklinde ayırarak detaylı bir inceleme alanı oluşturdu. Yarıiletkenlerin elektronikte kullanılması, katıhal fiziğinin 20. yy teknolojisine getirdiği belki de en büyük katkıdır.

Yarıiletken elektroniğinin gelişmesi, 1940'lı yılların sonlarına doğru J. Bardeen, W. Brattain ve W. Shockley tarafından keşfedilen yarıiletken transistörün ortaya çıkmasından sonra elektronik endüstrisinde büyük değişiklikler meydana getirmiştir. Diyot, transistör gibi çok sayıda devre elemanından oluşan, tek bir yarıiletken taban malzemenin yüzeyinde hazırlanan, entegre devre adı verilen ve elektromanyetik sinyalin dönüşümü, depolanması gibi amaçlar için kullanabilen devreler oluşturulmuştur. Bu devreler, önceki yılların tüplü devreleriyle kıyaslandığında daha küçük ve hafif olmaları, ısıtıcı gereksinimi veya ısıtıcıdan kaynaklanan kayıpların olmaması, daha sağlam yapıda ve daha verimli olmaları ve ısınma süresine gerek duymamaları nedeniyle pek çok avantaj sağlamıştır. Entegre devreler bilgisayar ve televizyon teknolojisi, ulaşım sistemleri, otomasyon ve endüstri tekniği, uzay araçları, savunma ve insan vücudunun incelenmesi gibi pek çok alanda kullanılmaktadır.

Bu çalışmada radyasyon, sıcaklık, basınç ve aşınma gibi kötü çevre şartlarına dayanıklı geniş bant aralığına sahip SiC yarıiletken külçe malzeme kullanıldı (Masri 2002). Bu yarıiletken malzeme üzerine omik ve Schottky kontaklar yapılarak radyasyona karşı dayanıklılığı incelendi. Radyasyon öncesi ve sonrasında I - V ve C - V ölçümlerinden

yararlanarak temel kontak parametreleri belirlendi ve radyasyonun kontaklar üzerine nasıl bir değişim yaptığı incelendi.

Bu çalışmanın birinci bölümü; konu ile ilgili literatür çalışması ve bu konunun amacı ile önemini belirten “Giriş”, ikinci bölümü; “Kuramsal Temeller”, üçüncü bölümü; numune hazırlanması ve deneylerde kullanılan sistemleri açıklayan “Materyal ve Yöntem”, dördüncü bölümü; Transmission Line Method (TLM) kullanılarak hesaplanan omik kontak parametreleri ve $I-V$ ve $C-V$ ölçümlerinden faydalanılarak bulunan temel diyot parametrelerini içeren “Araştırma Bulguları” ve beşinci bölümü; ölçümlerin değerlendirilmesi sonucunda elde edilen parametre ve bilgilerin yorumlanmasını içeren “Tartışma ve Sonuç” kısımlarından oluşmaktadır.

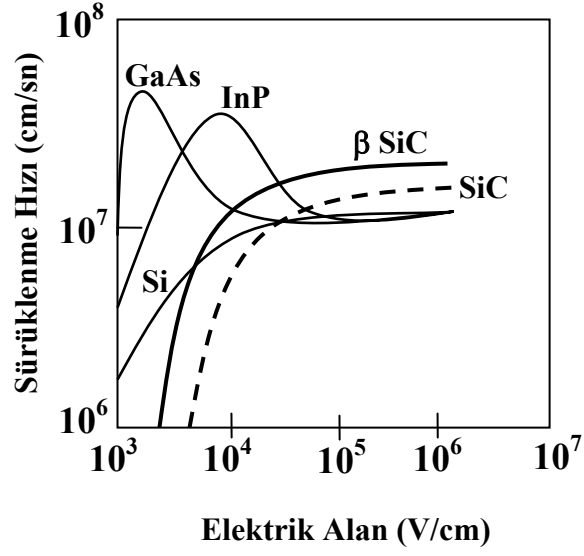
2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. SiC

Son yıllarda SiC, GaN, ZnO ve ZnSe gibi geniş bant aralığına sahip yarıiletkenlerin her biri, aygıt uygulamaları için büyük ilerlemeler katetmiştir. SiC, GaN ve ZnO termal ve kimyasal özellikleri sebebiyle yüksek sıcaklıklarda ve kötü çevre şartları altında da çalışılabilirler. SiC ve GaN, ZnO'nun bu özellikleri, onları yüksek güçte çalışmak için daha etkili yapar. SiC, hegzagonal wurtzite (α) ve kübik zincblende (β) kristal yapılarının 200'den fazla birleşimini gösteren indirekt geniş bant aralıklı IV-VI bileşik yarıiletken ailesinin bir üyesidir (McDaniel *et al.* 2004).

Günümüzde SiC ve GaN malzemelerden çoklu transistörler yapılmaktadır. SiC transistörlerin mikrodalga karakteristikleri ve yüksek sıcaklıkta çalışma performansı da iyi bilinmektedir. SiC, ZnSe ve GaN malzemeleri, yeşil, mavi ve morötesi (UV) bölgede çalışan optik yayıcılar ve dedektör üretmek için çalışılmıştır. Mavi ışık yayan SiC LED'lerle birlikte, UV ve mavi GaN tabanlı LED'ler de son birkaç yıldır teknolojiye yerini almıştır. Bu ürünler, tüm renklerin elektronik gösterimi (full colour display) ve diğer teknolojilerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Son zamanlarda SiC ve GaN yarıiletken malzemelerinden UV fotodedektörler yapıldı (Morkoç *et al.* 1994).

SiC, aşırı yüksek sıcaklık, yüksek güç kapasitesi ve yüksek radyasyon şartları altında kullanılabilen geniş bant aralıklı bir yarıiletkendir (Masri *et al.* 2002). SiC'in bant aralığı 3C için 2,403 eV, 6H için 3,101 eV, 4H için 3,285 eV'dir. SiC'in termal iletkenliği ise 3C için $3,2 \text{ Wcm}^{-1} \text{ K}^{-1}$, 6H için $3,6 \text{ Wcm}^{-1} \text{ K}^{-1}$, 4H için $3,7 \text{ Wcm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ dir (Masri *et al.* 2002).



Şekil 2.1. Si, GaAs, InP ve SiC'in hız ve elektrik alan ilişkisi (Morkoç et al. 1994)

Şekil 2.1 Si, GaAs, InP ve SiC yarıiletkenleri için elektron hız-alan ilişkisini göstermektedir. Büyük doyum hızlarında SiC, daha büyük optik fonon enerjilerine katkı sağlar. SiC'in geniş bant aralığı, oldukça düşük sızıntı akımları oluşturur ve yüksek sıcaklıklarda aygıt çalışmasına izin verir. FET (alan etkili transistör), oluşum kolaylığı nedeniyle, hızlı anahtarlama uygulamaları için uygundur. SiC kullanılarak, FET'lerin birkaç tipi, MOSFET (metal oksit yarıiletken alan etkili transistör), JFET (eklem alan etkili transistör) ve MESFET (metal yarıiletken alan etkili transistör)' ler üretilmektedir (Morkoç *et al.* 1994).

2.2. SiC'in Diğer Yarıiletkenlere Göre Sahip Olduğu Üstün Özellikleri

SiC mükemmel elektriksel özelliklere, yüksek elektron sürüklenme hızına ve yüksek termal iletkenliğine sahip olan geniş bant aralıklı bir yarıiletkendir (Chang *et al.* 2005). Bu özellikleri sayesinde SiC; yüksek frekans, yüksek sıcaklık ve yüksek güçte çalışan yarıiletken aygıtlar için bir taban malzeme olarak kullanılmaktadır (Perez *et al.* 2005). Bant aralığı Si'ye göre üç kat dah geniş, elektrik alan kuvveti altı kat daha yüksektir.

Termal iletkenliği bakırinkiyle benzerdir ve yüksek elektron doyum dalgalanma hızına sahiptir (Vang *et al.* 2006).

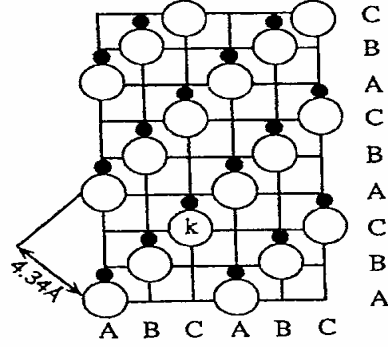
SiC aygıtların büyük başarısı, yüksek akım sürüşü ve aygıtı daha az güç kaybında tutmak için düşük omik kontak direncine sahip olmasından ve dayanıklılığından kaynaklanır (Chang *et al.* 2005). SiC'in, (002) GaN'a daha yakın örgü uyumu nedeniyle, GaN tabanlı optoelektronik aygıtlar için altlık malzeme olarak kullanımı uygundur (Basak *et al.* 2003). Farklı metalik kontaklar son yıllarda çalışılmasına rağmen (Al, Co, Pd, W), Ni ve Ti hem doğrultucu hem de omik kontak oluşturduğu için SiC Schottky diyot teknolojisinde şu anda yaygın bir şekilde kullanılır (Perez *et al.* 2005).

Yarıiletken aygıtların güç dağılımı, anahtarlama hızı ve kontak direncine güçlü bir şekilde bağlıdır. Bu yüzden, yüksek performanslı SiC aygıtlar üretmek ve düşük kontak direncini geliştirmek temel amaçlardan biridir. Son zamanlarda SiC aygıtların performansı, özellikle *p*-tipi kontakların yüksek direnci nedeniyle sınırlıdır. *p*-tipi malzemede aliminyum ya da aliminyum tabanlı alaşımlar kullanmak daha iyi performans sağlar (Vang *et al.* 2006).

2.3 SiC'in Politipliliği

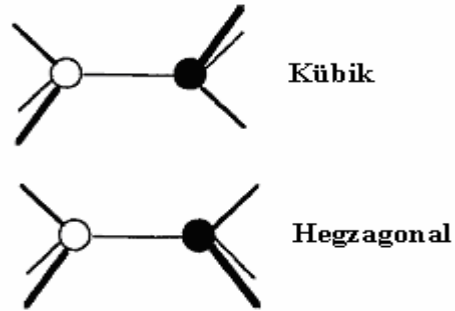
Günümüzde bilinen 170'den fazla SiC çeşidi vardır (Goldberg). 3C, 2H, 4H, 6H, 15R, 21R en çok bilinen çeşitleridir. Farklı çeşitleri farklı fiziksel özelliklere sahiptir. Her bir SiC tipinin bant aralığı farklıdır. Bant genişliği 3C-SiC için 2,3 eV, 6H-SiC için 2,9 eV, 2H-SiC için 3,3 eV, 4H-SiC için 3,2 eV'dir (Morkoç *et al.* 1994). SiC politipleri, özel bağlanma uzunlukları ve yerel atomik yapılarda hemen hemen bütün kristal simetrisinin periyodik bir dizilimiyle belirlendiği gibi, tetrahedral bir şekilde bağlanan Si-C çift tabakaların dizilimiyle de belirlenir. Kristalin tetrahedral bağlanma şeklini devam ettiren her bir SiC çift tabaka, örgüyle ilgili olası üç duruma uyabilir. Bunlar rasgele

belirlenmiş A, B, C sembolleridir. Şekil 2.2 bu şekilde sembollerle ifade edilen 3C-SiC'in kristal yapısını göstermektedir.



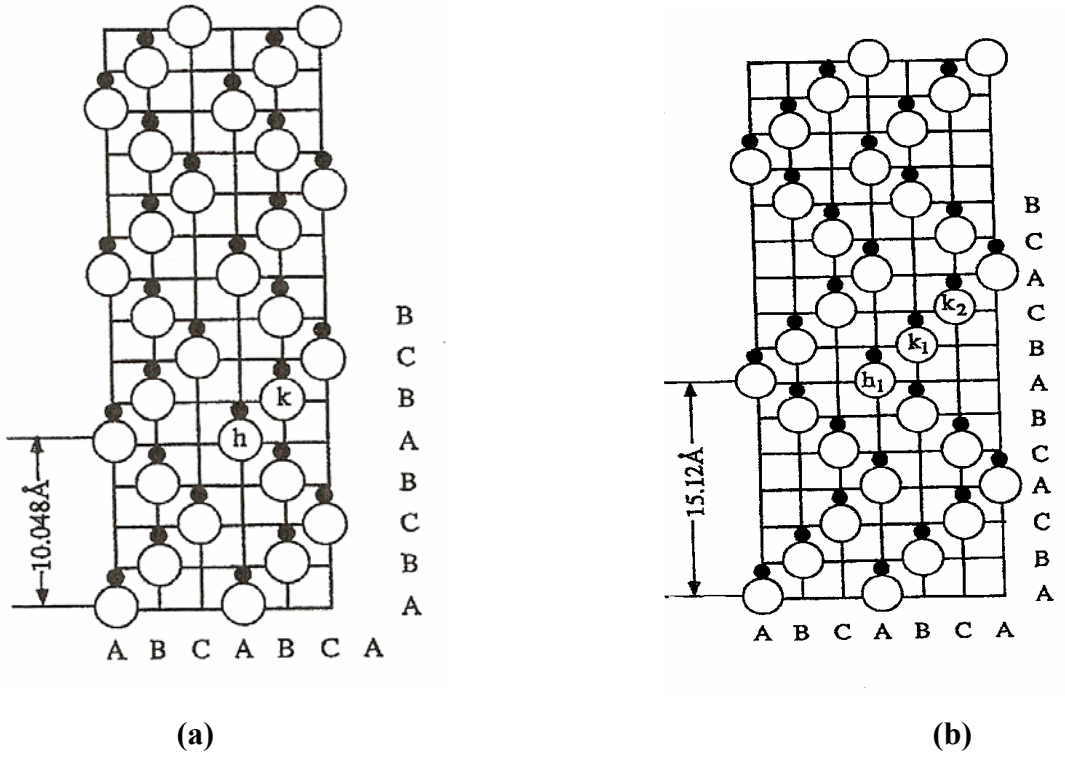
Şekil 2.2. 3C SiC'in kristal yapısı

Dizilim sırasına bağlı olan yakın çift tabakalarda, Si ve C atomları arasında bağlanma ya kübik (zinc-blende) ya da hegzagonal (wurtzite) yapıdadır. Şekil 2.3'te görüldüğü gibi kübik bağlanmalar, hegzagonal bağlanmaların aynadaki görüntüsünün 60 derece döndürülmesiyle elde edilir.



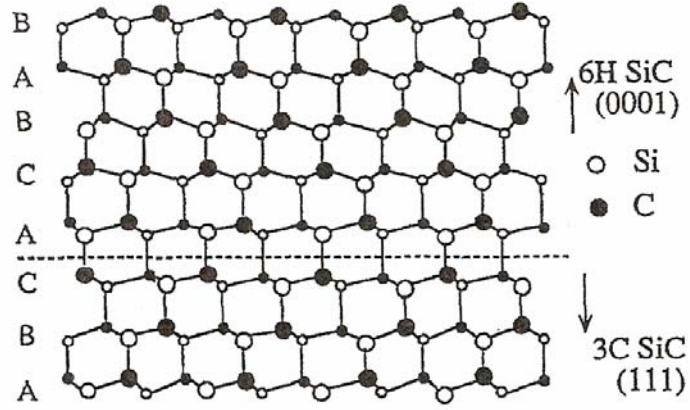
Şekil 2.3. C ve Si atomları arasında Zinc-blende ve Wurtzite bağlanma üçlü tetrahedral bağlar, kübik durumda ve hegzagonal durumda aynadaki yansımaları 60 derece döndürülerek elde edilir

Eğer dizilim ABCABC... ise yapı kesinlikle kübik yapıdır ve yaygın bir şekilde 3C-SiC (ya da beta)'dir. Wurtzite ABAB....dizilimi hegzagonal simetridir ve 2H-SiC'i gösterir. Diğer politiplilerin hepsi, esas olarak kübik ve hegzagonal bağlanmaların karışımlarıdır. 4H-SiC ve 6H-SiC daha karmaşık dizilimlere sahiptir.



Şekil.2.4. a) 4H-SiC'in kristal yapısı. Atomların yarısı kübik diğer yarısı da hegzagonal bağlıdır. **b)** 6H-SiC'in kristal yapısı. Örgünün üçte ikisi kübik ve üçte biri hegzagonaldır

Şekil 2.4. a) ve b) sırasıyla 4H-SiC ve 6H-SiC kristal yapısını göstermektedir. 4H-SiC, tamamen eşit kübik ve hegzagonal bağlarla oluşturulur. 6H-SiC ise üçte ikisi kübik üçte biri hegzagonaldır. Kübik elementlere rağmen her biri hegzagonal kristal simetriye sahiptir. Hegzagonal politiplilerin tamamı α -SiC olarak adlandırılır. 15R ve 21R ise rombohedral yapıdadır. SiC politiplileri, tek faz malzemesi geliştirmek için SiC'i önemli yapar. Kristal gelişim metotlarının, etkili bir şekilde geliştirilmesi çoklu homo/hetero eklemlerin (junction) yapımında kolaylık sağlar. Bu metotlar kullanılarak oluşturulan yapılardan biri Şekil 2.5'te görüldüğü gibi 6H/3C-SiC heteroeklemdir.



Şekil 2.5. Bir 3C/6H-SiC heteroeklemin gösterimi

2.4. SiC Büyütme Metotları

İndirekt geniş bant aralığına sahip olan SiC yarıiletkenini büyütmek için pek çok teknik kullanılmaktadır. Bu tekniklerin başında,

- Süblimleşme metodu
- Acheson metodu
- Lely metodu
- Fiziksel buhar taşıma metodu
- Sıvı faz epitaksi (LPE) metodu gelir (Pierre Masri 2002).

2.4.a. Süblimleşme metodu

Bu büyütme tekniği ile kalın epitaksiyel tabakalar büyütmek mümkündür (100 mikrometre kalınlığında). Büyütme oranları 2 ile 100 $\mu\text{m/sa.}$ arasında değişir. Bu metotla, altlığın kalitesine benzer ince tabaka büyütmek mümkündür. Büyütülen tabakada en yaygın kirlilikler N (donor), Al, B (akseptör)'dir. Bu kirlilikler aygıt yapımında kullanılan katkı atomlarıdır. Bu kirlilik tabakaları aygıt oluşumu için gereklidir.

2.4.b. Acheson metodu

1950'lerin ortalarında SiC büyüme metotlarının bir sanat olduğunu söyleyebiliriz. Bu dönemde SiC'i kesme ve öğütme ihtiyaçları için Acheson metodu kullanılırdı. Bu metotun, SiC üretimi için elektronik uygulamalarda iki dezavantajı vardır: Bu metotla, küçük boyutta kristaller daha az saflıkta üretiliyordu. Bunu önlemek için elektronik fırınlarda ısıtılan Si ve C (Si %50 ve C %40) karıştırılır. 2700°C kadar yüksek sıcaklıklara çıkılır ve daha sonra yavaş yavaş sıcaklık düşürülür.

2.4.c. Lely metodu

1955'te Lely, Acheson metodunu daha da geliştirerek büyütme yaptı. Lely yüksek seviyede üretim endüstrisi için SiC büyütülmesini geliştirdi. Bu metot, yüksek kalitede ve yüksek kontrolle daha büyük SiC bulk malzemeler üretebilen gelişmiş bir metottur. Bu metot için yüksek kristal kalitesi önemlidir. Kristaller genellikle hegzagonal düzensiz şekillere sahiptir. Bu metotla büyük kristaller elde edilemez. Diğer bir dezavantajı, politip kontrolünün yapılmamasıdır. Pek çok uygulamalarda politiplilik kontrolü gerekli olduğu için bu çok ciddi bir sınırlamadır. Yine de yüksek kaliteli kristaller, başlangıçta büyütülen ince tabakalı SiC'i altlık olarak kullanmada avantajlı yapar.

2.4.d. Fiziksel buhar taşıma metodu

Son zamanlarda bulk halde SiC kristali büyütmek için kullanılan bir metottur. Süblimleşme metodunun bir parçasıdır ve Lely metodunun bütün dezavantajlarının üstesinden gelir. Bu metotta büyüme oranı, büyüme sıcaklığı sıcaklık gradyenti, kaynak ve tohum arasındaki malzemenin, pota içerisindeki basıncın ve SiC tozunun tane büyüklüğüne bağlı olarak değişir. Bu metotla 1600°C ve 2000°C sıcaklıkta 2 µm/saat ve 2 mm/saat arasında çeşitli oranlarda büyüme yapılabilir. Kusur yoğunlukları X-ışını kırınımı, optik ve elektron mikroskobu tekniği kullanılarak belirlenir. Bu

metotla katkılama kontrol edilebilir. Malzemedeki kirlilikleri belirlemenin bir yolu da düşük sıcaklıkta fotoluminesans kullanmaktır.

2.4.e. Sıvı faz epitaksi metodu

Sıvı faz epitaksi büyütme metodunda, istenilen epitaksiyel tabaka için malzeme çözeltide eritilir ve sıvı fazdadır. Bu metot SiC *p-n* eklemi oluşturmak için uygundur. Temel mekanizma, aşırı doygun çözeltide bir yarıiletkenin kristalleşmesidir.

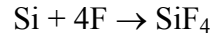
2.5. SiC Kimyasal Temizliği

Modern yarıiletken aygıt oluşumunda kimyasal temizleme teknikleri, yarıiletken temizleme teknolojisinin önemli bir aşamasını oluşturur. Yabancı maddelerden kurtulmak için büyütme öncesi kimyasal temizleme yapmak gerekir. Çizelge 2.1 SiC'in çeşitli gazlarla kimyasal temizleme oranını göstermektedir.

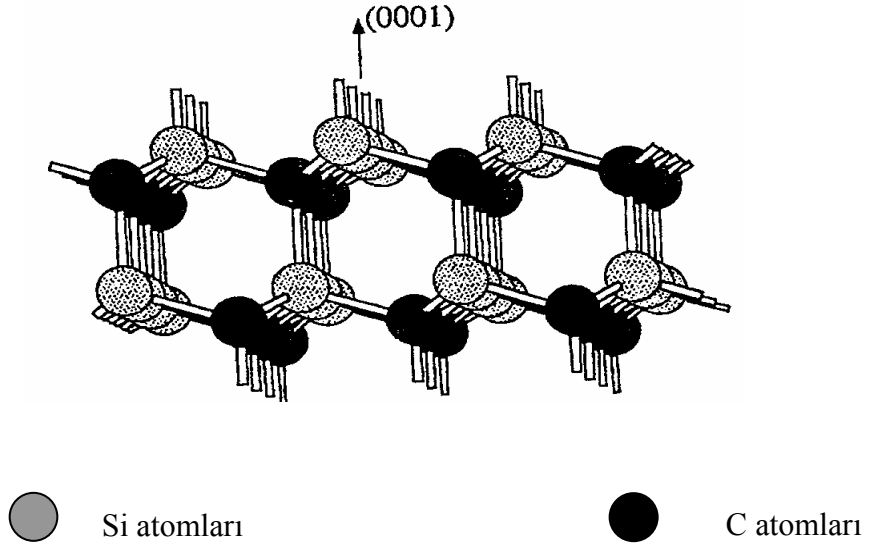
Çizelge 2.1. Oksijen plazma ve flourinli gaz RIE (Reaktif iyon kimyasal temizleme) için SiC kimyasal temizleme sonuçları. Kenar profil oranı, düşey kimyasal temizleme oranının yanıl temizleme oranına bölümünü temsil eder (Morkoç *et al.* 1994)

Gaz	Güç (w)	Basınç (mTorr)	Kenar profil oranı	Seçicilik (SiC:Si)	SiC'in kimyasal temizleme oranı(nm/dk)
CHF ₃ +%90 O ₂	200	20	12.5:1	2.0:1	41.7
	200	74	5.5:1	1.9:1	53.3
	300	20	17.0:1	2.0:1	75
CBrF ₃ +%75 O ₂	200	20	6.3:1	2.0:1	37.5
	200	72	7.6:1	1.8:1	39
	300	20	4.0:1	1.3:1	50
					50
SF ₆ +%35 O ₂	200	20	10.3:1	1,26	53.3
	200	200	...	1.267	20
SF ₆ +%90 O ₂	200	20	11.0:1	1:1.8	40
CHF ₃ ...	200	20	...	1:3.6(:SiO ₂)	
CHF ₃ +%80 O ₂	200	20	...	1.3:1	

SiC'in güçlü bağ yapısı, onu kimyasal temizleme için oldukça zor bir malzeme yapar. Si atomları oldukça kolay çözünürken, C atomları çok daha zor çözünür. Aygıt oluşumu için reaktif iyon kimyasal temizleme (RIE) iyi sonuç vermez. Pan ve Steckl, SF₆, CBrF₃ ve CHF₃'ü oksijenle karıştırarak reaktif iyon kimyasal temizliğini (RIE) gerçekleştirmişler ve iki temel kimyasal temizleme mekanizması belirlemişlerdir.



Kimyasal temizleme seçimi, SiC/SiO₂ oluşum metotları için önemlidir. Çünkü rf plazmada iyonlar yüzeye zarar verir. Dahası SiC doğal oksit yapısı nedeniyle büyütme öncesi termal biriktirme oluşturmak imkansızdır. Büyütme odalarında vakum transferinden önce SiC dilimler 1000°C de bir HCl kimyasal buhar temizliğine maruz bırakılır. Daha sonra HCl:H₂O:HNO₃ ve son olarak HF kullanılır.



Şekil 2.6. 6H-SiC'in (0001)_{Si} yüzeyinin yapısı

2.6. Metal Yarıiletken Kontaklar

2.6.1. Doğrultucu (Schottky) kontaklar

Metal–yarıiletken kontak 1900’lü yılların başında kullanılan ilk yarıiletken aygıtlardan biridir. Metal-yarıiletken diyotlar, üretilmelerinin zor olması ve mekanik olarak güvenli olmamalarından dolayı 1950’lerde diyotların yerini $p-n$ eklemleri almıştır. Günümüzde yarıiletken ve vakum teknolojisi, kolay üretilebilir ve güvenli metal-yarıiletken kontaklar oluşturmak için kullanılmaktadır. Pek çok durumda doğrultucu kontaklar n -tipi yarıiletkenler üzerine yapılır.

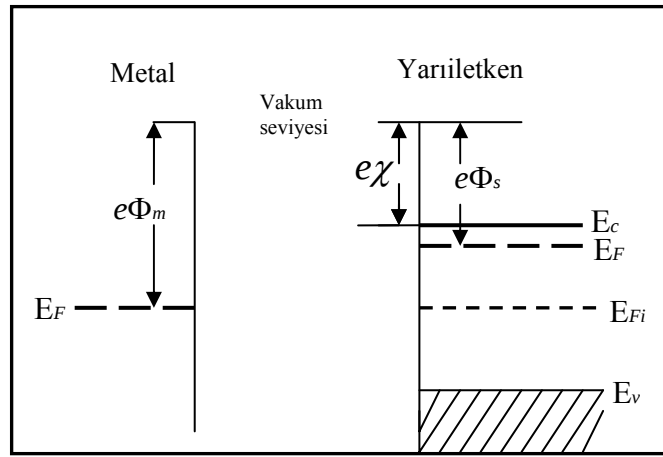
Çizelge 2.2. Birkaç elementin iş fonksiyonu

Element	İş fonksiyonu(ϕ_m)(eV)
Ag	4,26
Al	4,28
Au	5,10
Cr	4,50
Mo	4,60
Ni	5,15
Pd	5,12
Pt	5,65
Ti	4,33
W	4,55

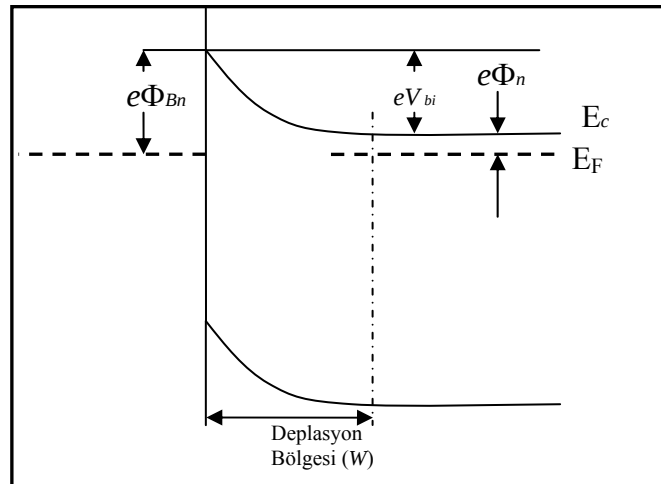
Çizelge 2.3. Birkaç elementin elektron yakınlığı

Element	Elektron yakınlığı(eV)
Ge	4,13
Si	4,01
GaAs	4,07
AlAs	3,5

Şekil 2.7.a kontak yapılmadan önce bir metal n -tipi yarıiletken kontağın ideal enerji bant diyagramını gösterir. Vakum seviyesi referans seviyesi olarak kullanılır. Φ_m parametresi metalin iş fonksiyonudur, Φ_s yarıiletkenin iş fonksiyonu ve χ elektron yakınlığı olarak bilinir. Çizelge 2.2’de çeşitli metallerin iş fonksiyonu verilmektedir. Çizelge 2.3’te ise çeşitli yarıiletkenlerin elektron yakınlığı verilmektedir (Neamen 1992).



(a)



(b)

Şekil 2.7. a) Kontak yapılmadan önce metal ve yarıiletkenin enerji bant diyagramı, b) $\Phi_m > \Phi_s$ için metal- n tipi yarıiletken kontağın ideal enerji bant diyagramı

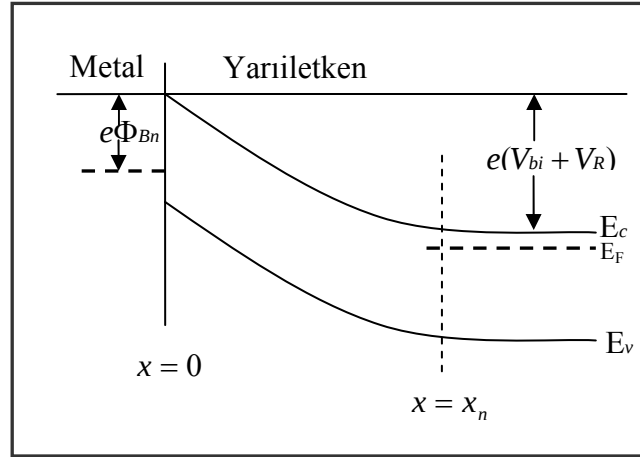
Şekil 2.7.a $\Phi_m > \Phi_s$ olduğu durumu göstermektedir. Şekil 2.7.b termal denge durumunda metal yarıiletken kontağın ideal enerji bant diyagramını göstermektedir. Kontak oluşmadan önce, yarıiletkendeki Fermi enerji seviyesi, metalin Fermi enerji seviyesinin üzerindedir. Termal denge durumunda Fermi enerji seviyeleri eşitlenir ve elektronlar yarıiletkenden metalin düşük enerjili durumlarına doğru hareket eder. Pozitif olarak yüklenen donör atomları, bir yüzey yükü bölgesini oluşturan yarıiletkende kalır. Φ_{Bn} parametresi yarıiletken kontağın engel yüksekliğidir. Engel yüksekliği,

$$\Phi_{Bn} = (\Phi_m - \chi) \quad (2.1)$$

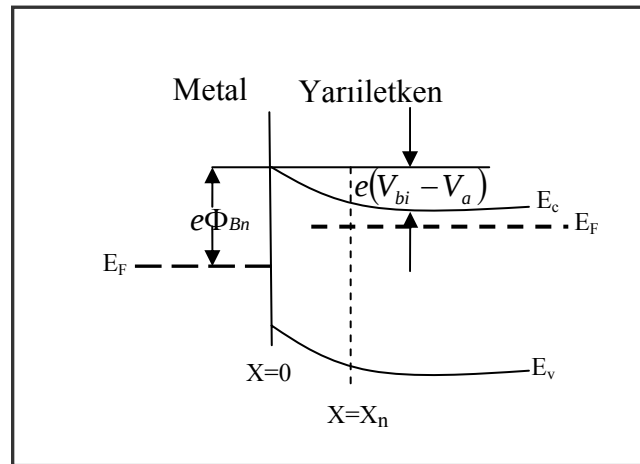
ile verilir. Yarıiletken tarafı üzerinde V_{bi} built-in (dahili) potansiyel engelidir. Bu engel, metale doğru hareket eden elektronlar tarafından karşılaşılan engeldir. Built-in (dahili) potansiyeli,

$$V_{bi} = \Phi_{Bn} - \Phi_n = (\Phi_m - \Phi_s) \quad (2.2)$$

dir. Eğer metale göre yarıiletken tarafa pozitif voltaj uygulanırsa, yarıiletkenin engel yüksekliği artar. Bu beslem durumu ters beslem durumudur. Metale pozitif voltaj uygulanırsa, yarıiletkenin engel yüksekliği azalır. Engel yüksekliği azaldığı için elektronlar kolay bir şekilde yarıiletkenden metalin içine doğru hareket eder. Bu beslem durumu düz beslem durumudur. Şekil 2.8.a ve Şekil 2.8.b ters beslem ve düz beslem durumunda enerji bant diyagramlarını gösterir. V_R ters beslem voltaj değeri, V_a düz beslem voltaj değeridir. Şekil 2.8'de gösterilen metal yarıiletken kontak için voltaja bağlı enerji bant diyagramları p - n eklemlerinkine çok benzerdir. Bu benzerlik nedeniyle Schottky ve p - n eklemlerinin akım voltaj karakteristiklerinin çok benzer olduğunu söyleyebiliriz. Schottky engel diyotta akım çoğunluk taşıyıcılarla sağlanır. Düz beslem durumunda yarıiletkende elektronlar tarafından görülen engel, yarıiletkenden metal içine kolay bir şekilde çoğunluk taşıyıcı elektronları aktığı için azalır. Düz beslem akımı metalden yarıiletkene doğrudur. Düz beslem akımı, düz beslem voltajı V_a 'nın eksponansiyel bir fonksiyonudur.



(a)



(b)

Şekil 2.8. a) Ters beslem durumunda, b) Düz beslem durumunda bir metal-yarıiletken kontağın ideal enerji bant diyagramı

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV_a}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

Bu ifadede $eV_a \gg nkT$ olması durumunda, 1 rakamı diğer terimin yanında çok çok küçük olduğu için ihmal edilebilir. O zaman akım değeri,

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{eV_a}{nkT} \right) \right] \quad (2.4)$$

olur. $V_a = 0$ 'da düşey eksenini kestiği nokta ise I_0 doyma akım değerini verir. Bu değer,

$$I_0 = AA^* T^2 \exp \left(\frac{-e\Phi_b}{kT} \right) \quad (2.5)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada A^* , Richardson sabitidir. T Kelvin cinsinden sıcaklık değeridir. k , Boltzmann sabiti.

2.6.2. İdeal kontak özellikleri

p - n eklemünde olduğu gibi, aynı şekilde kontağın elektrostatik özelliklerini belirleyebiliriz. Uzak yükü bölgesinde elektrik alan Poisson eşitliği ile belirlenir.

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_s} \quad (2.6)$$

ile verilir. Burada $\rho(x)$ uzak yükü hacim yoğunluğu, ϵ_s 'de yarıiletkenin elektriksel geçirgenliğidir. Eğer yarıiletken katkısının aynı olduğunu farz edersek (2.6) eşitliğini,

$$E = \int \left(\frac{eN_d}{\epsilon_s} \right) dx = \frac{eN_d}{\epsilon_s} x + c_1 \quad (2.7)$$

olarak elde ederiz. Burada c_1 integral sabitidir. Elektrik alan, yarıiletkenin uzak yükü bölgesinde çok küçük olduğundan sıfırlanabilir. Bu yüzden integral sabiti,

$$(2.8)$$

olur. Elektrik alan yeniden yazılırsa,

$$E = -\frac{eN_d}{\epsilon_s}(x_n - x) \quad (2.9)$$

ifade edilir. Elektrik alan metal içinde sıfır olduğundan negatif bir yüzey yükü metal yarıiletken kontakta metal içindedir. Uzay yükü bölgesi genişliği W ,

$$W = x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V_R)}{eN_d}} \quad (2.10)$$

ile ifade edilir. Burada V_R , uygulanan ters beslem voltajının değeridir. Kontak kapasitansı,

$$C' = \frac{eN_d x_n}{dV_R} = \sqrt{\frac{e\epsilon_s N_d}{2(V_{bi} + V_R)}} \quad (2.11)$$

(2.11) eşitliği düzenlenirse,

$$\left(\frac{1}{C'}\right)^2 = \frac{2(V_{bi} + V_R)}{e\epsilon_s N_d} \quad (2.12)$$

elde edilir. Burada N_d donör konsantrasyonudur.

2.6.3. İdeal olmayan engel yüksekliğinin etkileri

İlk etki Schottky etkisi ya da potansiyel engelinin azalmasını içeren imaj kuvvet etkisidir. Metalden x mesafe uzaklıktaki bir mesafedeki bir dielektrikteki elektron, bir elektrik alan oluşturacaktır. Elektrik alan çizgileri, metal yüzeyine dik olmalıdır ve bu çizgiler metalin yüzeyinden iç kısma doğru x kadarlık bir mesafede yerleşmiş bir $+q$

imaj yükününkü ile aynı olacaktır. Bu imaj etkisi Şekil 2.9.a'da gösterilmiştir. İmaj yükü ile Coulumb etkileşmesinden dolayı elektron üzerine etki eden kuvvet,

$$F = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_s(2x)^2} = -eE \quad (2.13)$$

olarak ifade edilir. Potansiyel,

$$-\Phi(x) = +\int_x^\infty E dx' = +\int_x^\infty \frac{e}{4\pi\epsilon_s 4(x')^2} dx' = -\frac{e}{16\pi\epsilon_s x} \quad (2.14)$$

ifadesi ile verilir. x' , integral değişkenidir, $x = \infty$ da potansiyel sıfır kabul edilmektedir. Elektronun potansiyel enerjisi $-e\Phi(x)$ değişimi hiç elektrik alanın olmadığı kabul edilen potansiyel enerji bölgesidir ve bu durum Şekil 2.9.b'de gösterilmiştir. Bir elektrik alan dielektrikteki bölgede olduğunda potansiyel,

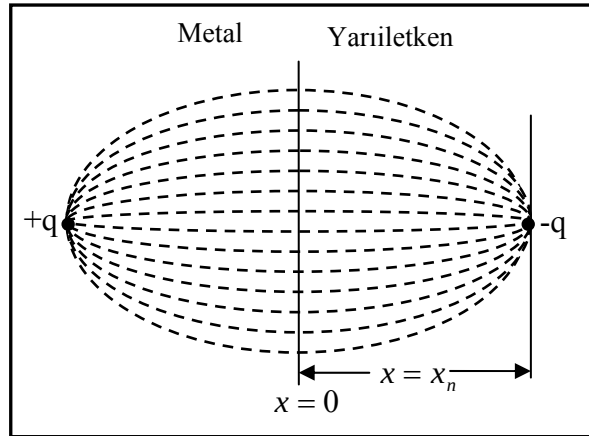
$$-\Phi(x) = -\frac{e}{16\pi\epsilon_s x} - xE \quad (2.15)$$

olarak ifade edilir ve bu durum Şekil 2.9.c'de bir elektrik alan etkisinde olan elektronun potansiyel enerjisini gösterir. Burada potansiyel engelinin azalması Schottky etkisi ya da imaj kuvveti etkisidir. Schottky engel azalması ($\Delta\Phi$) ve maksimum engel durumu (x_m),

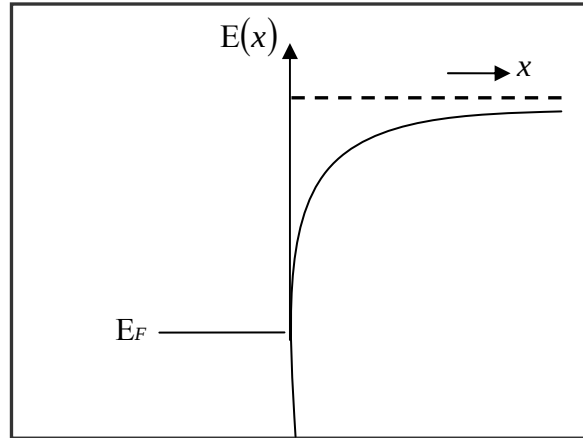
$$\frac{d(e\Phi(x))}{dx} = 0 \quad (2.16)$$

şartını dikkate alarak,

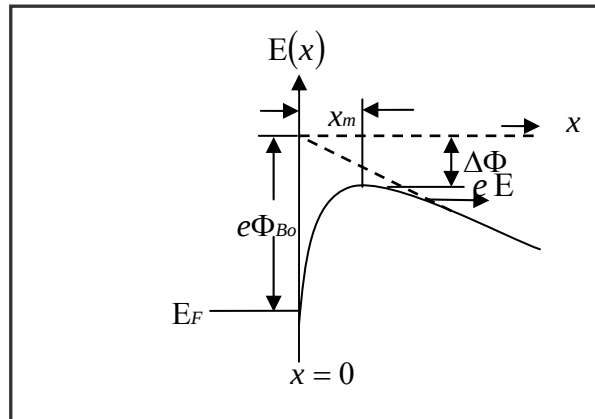
$$x_m = \sqrt{\frac{e}{16\epsilon_s \pi E}} \quad (2.17)$$



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.9. a) Bir metal-dielektrik arayüzeyde imaj yük ve elektrik alan çizgileri, b) sıfır elektrik alan, c) sabit bir elektrik alan uygulandığı durumu gösterir

$$\Delta\Phi = \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_0}} \quad (2.18)$$

olarak belirlenir. Metal yarıiletken kontağın engel yüksekliği, metalin iş fonksiyonu ve yarıiletken yüzey ve arayüzey durumlarıyla belirlenir.

2.6.4. Akım-gerilim (I - V) ölçümleri

Metal yarıiletken kontakta akım iletimi çoğunluk taşıyıcılarla gerçekleşir. n -tipi yarıiletkenle yapılan bir doğrultucu kontakta termal süreç, termiyonik emisyon teorisiyle belirlenen potansiyel engel üzerinden elektronların taşınmasıyla oluşur. Termiyonik emisyon özellikleri, engel yüksekliğinin Maxwell-Boltzmann yaklaşımı uygulanması için kT 'den çok daha büyük olduğu yaklaşımı kullanılarak belirlenir ve termal denge bu süreçten etkilenmez. Şekil 2.10 bir doğru beslem voltajı (V_a) uygulandığındaki durumdaki engeli ve metalden yarıiletken, yarıiletkenden metale geçen elektronlar için akım yoğunluğu bileşenlerini gösterir. Metal içine elektronların akışı nedeniyle elektron akım yoğunluğu $J_{s \rightarrow m}$ dir. Yarıiletken içine metalden elektronların akışı nedeniyle akım yoğunluğu ise $J_{m \rightarrow s}$ dir. Akımların yazılımları elektronların akış yönelimlerini gösterir. Genel olarak akım yönelimi, elektron akışına zıttır. Akım yoğunluğu $J_{s \rightarrow m}$, engel üzerinden x -yönelimindeki etkili hızlara sahip olan elektronların konsantrasyonunun bir fonksiyonudur. Akım yoğunluğunu,

$$J_{s \rightarrow m} = e \int_{E_c'}^{\infty} v_x dn \quad (2.19)$$

olarak yazılır. Burada E_c' , metal içerisinde termiyonik emisyon için gerekli olan minimum enerjidir ve e ise elektronun yüküdür. Artan elektron konsantrasyonu,

$$dn = g_c(E) f_F(E) dE \quad (2.20)$$

ile verilir. $g_c(E)$, iletkenlik bandındaki durum yoğunluğudur $f_F(E)$ ise Fermi-Dirac ihtimaliyet fonksiyonudur. Maxwell-Boltzmann yaklaşımları uygulandığında,

$$dn = \frac{4\pi^3 \sqrt{2m_n^*}}{h^3} \sqrt{E - E_c} \exp\left[-\frac{(E - E_F)}{kT}\right] dE \quad (2.21)$$

olur. E_c üzerindeki elektronun enerjisinin hepsi kinetik enerjiye dönüşebileceği kabul edilirse,

$$\frac{1}{2} m_n^* v^2 = E - E_c \quad (2.22a)$$

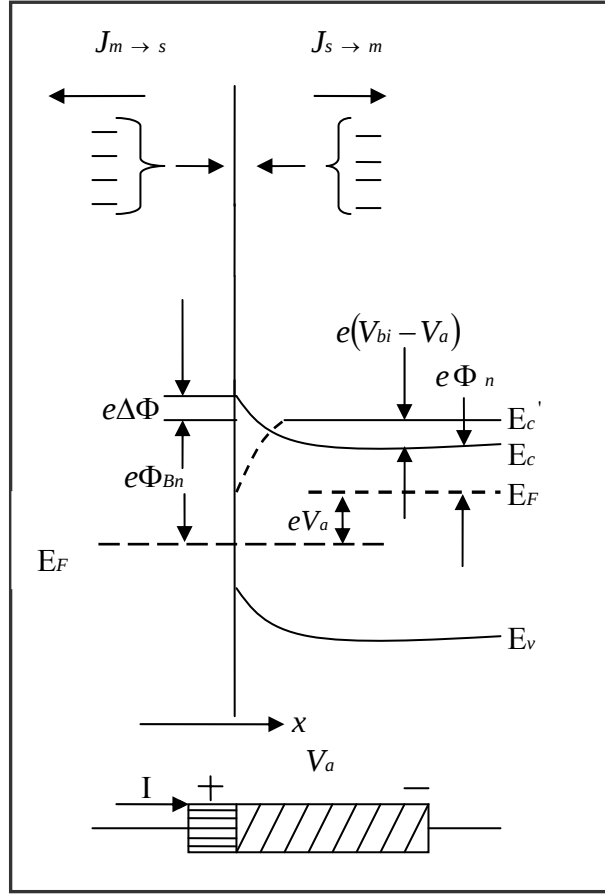
$$dE = m_n^* v dv \quad (2.22b)$$

ve

$$\sqrt{E - E_c} = v \sqrt{\frac{m_n^*}{2}} \quad (2.22c)$$

(2.22b) eşitliği yeniden düzenlenirse,

$$dn = 2 \left(\frac{m_n^*}{h} \right)^3 \exp\left(\frac{-e\Phi_n}{kT}\right) \exp\left(-\frac{m_n v^2}{2kT}\right) 4\pi v^2 dv \quad (2.23)$$



Şekil 2.10. İmaj azalma etkisi içeren bir doğru beslenmiş metal-yarıiletken kontağın enerji bant diyagramı

(2.23) eşitliği, tüm yönelimler üzerine dağılan v ile $v + dv$ arasındaki hızlara sahip olan birim hacimdeki elektron sayısını verir. Hızlar bileşenlerine aşağıda verildiği gibi ayrılabilir.

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$$

$dv_x dv_y dv_z$ diferansiyelini $4\pi v^2$ diferansiyel hacmine taşınırsa ve daha sonra (2.16) eşitliğini yeniden düzenlenirse,

$$J_{s \rightarrow m} = 2e \left(\frac{m_n^*}{h} \right)^3 \exp \left(\frac{-e\Phi_n}{kT} \right) \int_{v_{ox}}^{\infty} v_x \exp \left(\frac{-m_n^* v_x^2}{2kT} \right) dv_x \times \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(\frac{-m_n^* v_y^2}{2kT} \right) dv_y \times \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(\frac{-m_n^* v_z^2}{2kT} \right) dv_z \quad (2.24)$$

şeklinde ifade edilir. v_{ox} hızı, potansiyel engelinin üzerine çıkmak için x-yöneliminde gerekli minimum hızdır. (2.20) eşitliğindeki ifadeler,

$$\frac{m_n^* v_x^2}{2kT} = \alpha^2 + \frac{e(V_{bi} - V_a)}{kT} \quad (2.25a)$$

$$\frac{m_n^* v_y^2}{2kT} = \beta^2 \quad (2.25b)$$

$$\frac{m_n^* v_z^2}{2kT} = \gamma^2 \quad (2.25c)$$

eşittir.

$$\frac{1}{2} m_n^* v_{ox}^2 = e(V_{bi} - V_a) \quad (2.26)$$

ile gösterilen denklemde engeli aşmak için x-yönelimindeki gerekli minimum hız v_{ox} tir.

$$v_x \rightarrow v_{ox} \Rightarrow \alpha = 0 \quad (2.26a)$$

$$v_x dv_x = \left(\frac{2kT}{m_n^*} \right) \alpha d\alpha \quad (2.26b)$$

Akım yoğunluğunu (2.24) eşitliğinden,

$$J_{s \rightarrow m} = 2e \left(\frac{m_n^*}{h} \right)^3 \left(\frac{2kT}{m_n^*} \right)^2 \exp \left(\frac{-e\Phi_n}{kT} \right) \exp \left[\frac{-e(V_{bi} - V_a)}{kT} \right] \times$$

$$\int_0^\infty \alpha \exp(-\alpha^2) d\alpha \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-\beta^2) d\beta \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-\gamma^2) d\gamma \quad (2.27)$$

yazarız ve integral dönüşümünden sonra (2.27) eşitliği,

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[\frac{-e(\Phi_n + V_{bi})}{kT} \right] \exp \left(\frac{eV_a}{kT} \right) \quad (2.28a)$$

ya da

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[\frac{-e\Phi_{Bn}}{kT} \right] \exp \left(\frac{eV_a}{kT} \right) \quad (2.28b)$$

dönüşür. Metalden yarıiletken elektron akım yoğunluğu $J_{m \rightarrow s}$, uygulanan beslem sıfır olduğunda $J_{s \rightarrow m}$ ile aynıdır. Daha sonra,

$$J_{m \rightarrow s} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left(\frac{-e\Phi_{Bn}}{kT} \right) \quad (2.29)$$

olur. Metal yarıiletkendeki net akım yoğunluğu,

$$J = J_{s \rightarrow m} - J_{m \rightarrow s} \quad (2.30)$$

olarak yazılabilir.

$$J = A^* T^2 \exp \left[-\frac{e\Phi_{Bn}}{kT} \right] \exp \left[\left(\frac{eV_a}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.31)$$

$$A^* = \frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \quad (2.32)$$

Akım yoğunluğu yeniden yazılırsa,

$$J = J_{ST} \exp \left[\left(\frac{eV_a}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.33)$$

elde edilir. Burada J_{ST} , ters doyma akım yoğunluğudur ve,

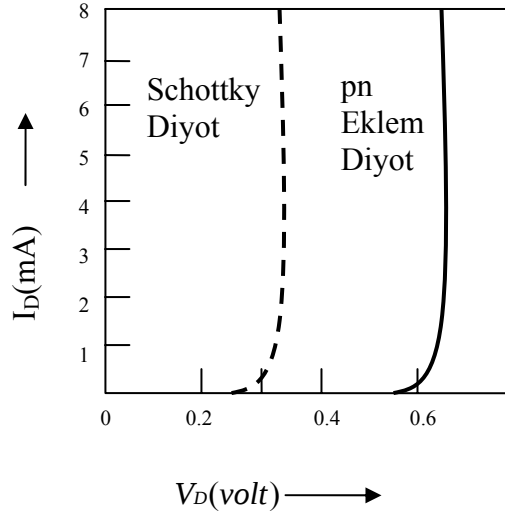
$$J_{ST} = A^* T^2 \exp \left(\frac{-e\Phi_{Bn}}{kT} \right) \quad (2.34)$$

olarak ifade edilir. Burada Φ_{Bn} , Schottky engel yüksekliği olarak adlandırılır.

($\Phi_{Bn} = \Phi_{Bo} - \Delta\Phi$) olduğundan (2.34) eşitliği,

$$J_{ST} = A^* T^2 \exp \left(-\frac{e\Phi_{Bo}}{kT} \right) \exp \left(\frac{e\Delta\Phi}{kT} \right) \quad (2.35)$$

olarak düzenlenir. Engel yüksekliğindeki değişim ($\Delta\Phi$), elektrik alanda bir artışla artacaktır ya da ters beslem voltajı uygulandığında artacaktır. Şekil 2.11 Schottky diyodunun ve p - n eklem diyodunun tipik I - V karakteristiğini gösterir. Schottky diyodunun çalışma voltajlarındaki (turn-on) etki p - n eklem diyodunkinden daha azdır. Çalışma voltajlarındaki gerçek fark metal-yarıiletken kontağın engel yüksekliğinin ve p - n eklemindeki katkı konsantrasyonunun bir fonksiyonudur. Schottky engel diyot ve p - n eklemi arasındaki ikinci büyük farklılık, frekans ya da anahtarlama özelliklerindeki farklılıktır. Schottky diyotlarda anahtarlama süresi piko saniyelerde iken, p - n eklem diyotlarda bu süre nano saniyelerdedir. Schottky engel diyot bir çoğunluk taşıyıcı aygıtıdır. p - n eklem diyod ise bir azınlık taşıyıcı aygıtıdır. Doğru beslenmiş Schottky diyotta difüzyon kapasitansı yoktur. Difüzyon kapasitansının olmayışı Schottky diyodu daha yüksek frekanslarda çalışan bir aygıt yapar (Neamen 1992).



Şekil 2.11. Bir Schottky diyot ve bir p - n eklem diyot arasındaki doğru beslem durumunda I - V karakteristiklerinin karşılaştırılması

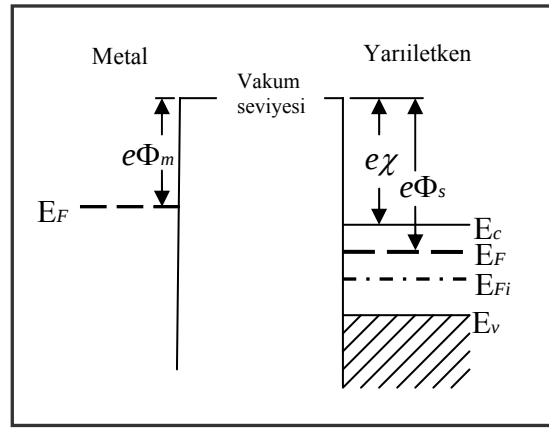
2.7. Metal Yarıiletken Omik Kontaklar

Omik kontaklar, metal ve yarıiletken arasında her iki yönde de iletimi sağlayan düşük dirençli kontaklardır. İdeal olarak omik kontaklar boyunca akım, uygulanan voltajın lineer bir fonksiyonudur ve uygulanan voltaj çok küçük olmalıdır (Neamen 1992). Omik kontakların iki genel tipi mümkündür. İlki ideal doğrultucu olmayan engeldir, ikinci tipi tünelleme engelidir.

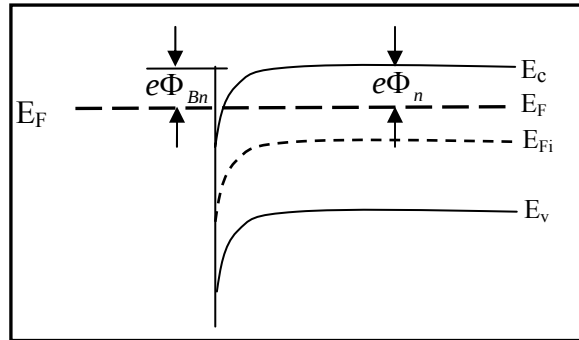
2.7.1. İdeal doğrultucu olmayan engel

Şekil 2.12. (a) ve (b) $\Phi_m < \Phi_s$ durumunda sırasıyla bir metal n -tipi yarıiletken kontağın, kontakta önce ve sonraki ideal enerji bant diyagramını göstermektedir. Bu kontakta termal denge oluşturmak için elektronlar metalden, yarıiletkende düşük enerji durumlarına akar. n -tipi yarıiletkende artık elektron yükü, temelde bir yüzey yük yoğunluğundur. Metale pozitif bir voltaj uygulandığında, yarıiletkenden metal içine akan elektronlar için hiç bir engel yoktur. Eğer pozitif voltaj yarıiletkene uygulanırsa, metalden yarıiletken içine akan elektronlar için etkin engel yüksekliği yaklaşık $\Phi_{Bn} = \Phi_n$ olacaktır. Bu beslem durumu için elektronlar kolay bir şekilde metalden

yarıiletken içine akar. Şekil 2.13.a yarıiletkene göre, metale pozitif bir voltaj uygulandığında enerji bant diyagramını gösterir. Elektronlar yarıiletkenden metale kolay bir şekilde akar. Şekil 2.13.b ise metale göre yarıiletkene pozitif bir voltaj uygulandığı durumu gösterir. Elektronlar yarıiletkenden metal içine kolay bir şekilde akarlar. Elektronlar kolay bir şekilde metalden yarıiletken içine engel üzerinden akabilir. Bu kontak şekli bir omik kontağa örnektir.



(a)

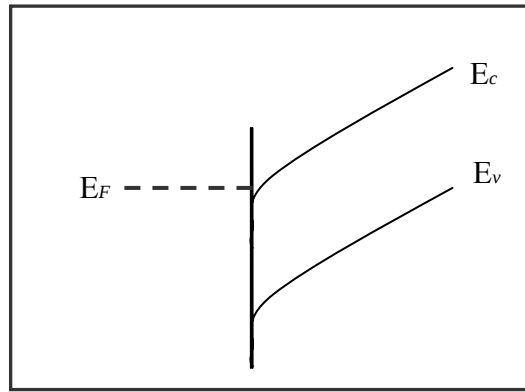


(b)

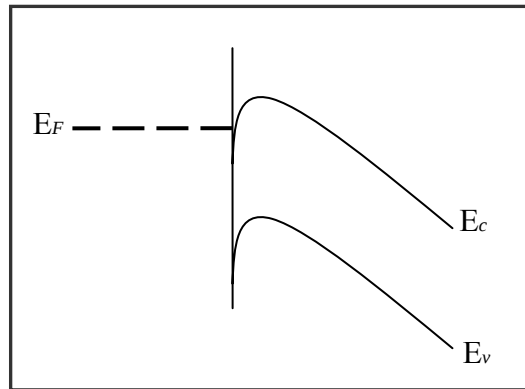
Şekil 2.12. $\Phi_m < \Phi_s$ durumunda bir metal-*n*-tipi yarıiletken kontak için a) kontakdan önce, b) kontakdan sonraki ideal enerji-bant diyagramı

Bir metal ve bir *p*-tipi yarıiletken arasında oluşan ideal doğrultucu olmayan kontağı inceleyelim. $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda kontak oluşmadan önce durum Şekil 2.14.a'daki gibidir. Kontak oluştuğunda yarıiletkenden elektronlar, daha fazla boş durumlar ya da

holler bırakarak, termal dengeyi oluşturmak için metalin içine akar. Yüzeydeki hollerin artık yoğunluğu, yarıiletkenin yüzeyini daha çok *p*-tipi yapar. Metalden elektronlar kolay bir şekilde yarıiletkendeki boş durumlara hareket edebilir. Bu yük hareketi yarıiletkenden metal içine akan hollere karşılık gelir. Metalden yarıiletken içine akan hollerde olabilir. Bu kontak da bir omik kontaklıdır.



(a)

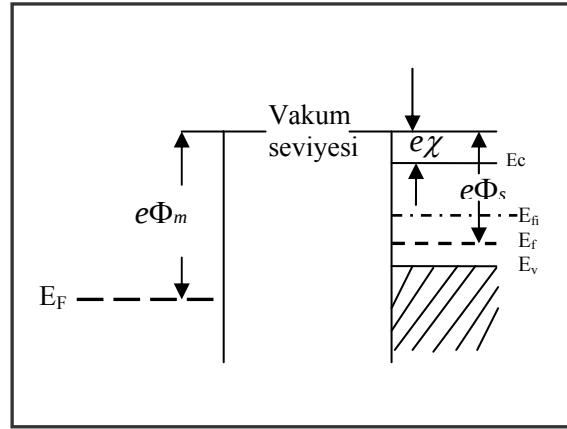


(b)

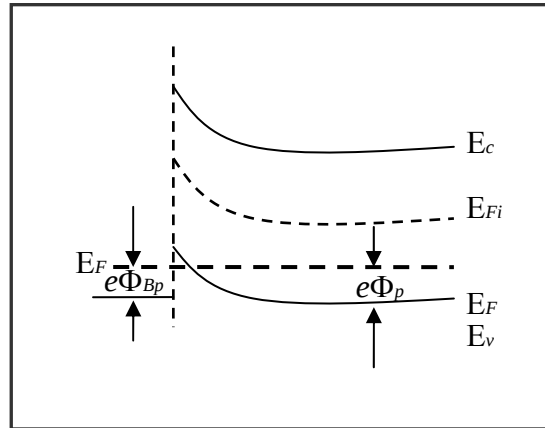
Şekil 2.13. a) Metale pozitif voltaj uygulandığında, b) Yarıiletkene pozitif voltaj uygulandığında bir metal *n*-tipi yarıiletken omik kontaklın ideal enerji-bant diyagramı

Şekil 2.12 ve Şekil 2.14’de gösterilen ideal enerji bant diyagramlarında yüzey durumlarının etkisi dikkate alınmaz. Akseptör yüzey durumlarının bant aralığının ortasının daha üzerinde olduğunu farzederek, bütün akseptör durumları Şekil 2.12.b’de görüldüğü gibi E_F ’nin altındadır. Bu yüzey durumları negatif olarak yüklenecektir ve

enerji bant diyagramını değiştirir. Benzer şekilde, donör yüzey durumları bant aralığının ortasının daha altında ise bütün donör durumları şekil 2.14.b'deki gibi pozitif olarak yüklenir. Pozitif olarak yüklenen yüzey durumları da enerji bant diyagramını değiştirir. Bu yüzden metal *n*-tipi yarıiletken kontak için $\Phi_m > \Phi_s$ ve metal *p*-tipi yarıiletken kontak için $\Phi_m < \Phi_s$ olduğunda iyi bir omik kontak oluşturulamayabilir (Neamen 1992).



(a)



(b)

şekil 2.14 $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda bir metal-*p*-tipi yarıiletken kontak için a) kontakdan önceki ve b) kontakdan sonraki durumu

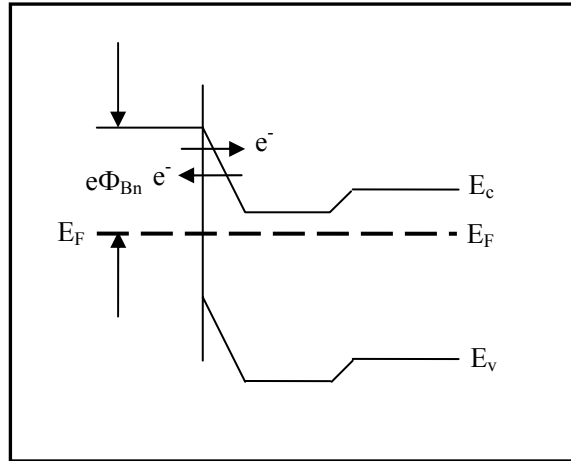
2.7.2. Tünelleme engeli

Bir doğrultucu metal yarıiletken kontakta uzay yükü bölgesinin genişliği, yarıiletkenin katkı miktarı ile orantılıdır. Yarıiletkende katkı yoğunluğu arttığında deplasyon bölgesi genişliği azalır. Katkı konsantrasyonu arttığında engel boyunca tünelleme ihtimali artar (Neamen 1992). Şekil 2.15, aşırı katkılanmış metal- *n*-tipi yarıiletken kontağın enerji bant diyagramını gösterir. Tünelleme akım yoğunluğu J_t ,

$$J_t \propto \exp\left(-\frac{e\Phi_{Bn}}{E_\infty}\right) \quad (2.36)$$

$$E_\infty = \left(\frac{e\hbar}{2}\right) \left[\frac{N_d}{\epsilon_s m_n^*}\right] \quad (2.37)$$

olarak ifade edilir. Tünelleme akımı exponansiyel olarak katkı konsantrasyonu ile artar.



Şekil 2.15. Metal-yoğun katkılı *n*-tipi -yarıiletken kontağın enerji bant diyagramı

2.7.3. Spesifik kontak direnci

Omik kontakların özelliklerinden biri spesifik kontak direncidir ve R_c ile gösterilir. Bu parametre sıfır beslemde ortaya çıkan voltajla ilgili olarak akım yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak belirlenir.

$$R_c = \left(\frac{\partial J}{\partial V} \right)^{-1} \Big|_{V=0} \text{ (ohm-cm}^2\text{)} \quad (2.38)$$

Omik kontak direnci R_c 'nin mümkün olduğu kadar küçük olması gerekir. Akım voltaj ilişkisi,

$$J_n = A^* T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_{Bn}}{kT}\right) \exp\left[\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1\right] \quad (2.39)$$

şeklinde verilir. Buna bağlı olarak omik kontak direnci yeniden düzenlenirse,

$$R_c = \frac{\left[\left(\frac{kT}{e}\right)\right] \exp\left(\frac{e\Phi_{Bn}}{kT}\right)}{A^* T^2} \quad (2.40)$$

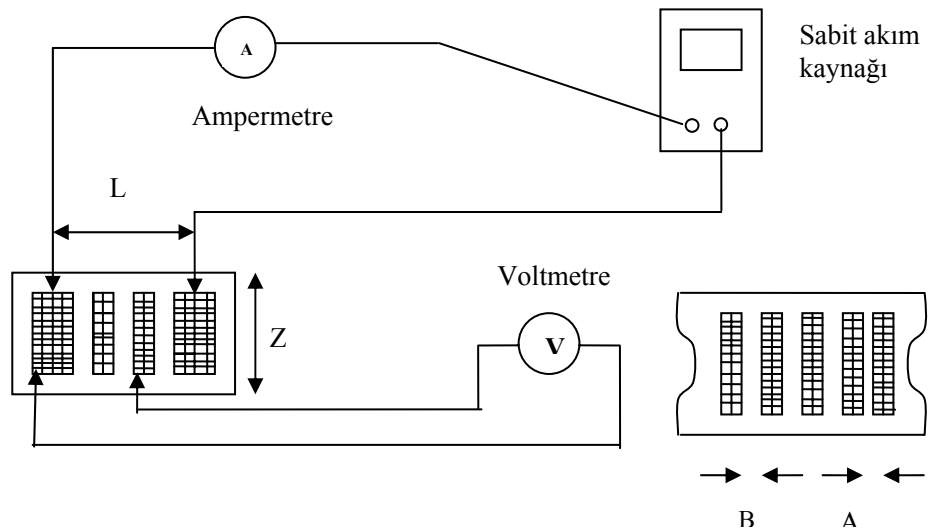
olur. Spesifik kontak direnci engel yüksekliği azaldığında hızlı bir şekilde azalır. Yüksek kirlilik katkı konsantrasyonuna sahip bir metal yarıiletken kontak için tünelleme süreci baskındır. 10^{19} cm^{-3} değerinden daha büyük donör konsantrasyonları için R_c , N_d değerine eksponansiyel olarak bağlıdır.

$$R_c \propto \exp\left[\frac{2\sqrt{\epsilon_s m_n^*}}{\hbar} \frac{\Phi_{Bn}}{\sqrt{N_d}}\right] \quad (2.41)$$

İyi bir omik kontak oluşturmak için düşük bir engel ve yüzeyi yoğun katkılı yarıiletken kullanmak gerekir. Geniş bant aralıklı malzemeler üzerine iyi omik kontaklar oluşturmak çok zordur. Genelde yüzeyde yoğun katkılı yarıiletkenler, tünelleme kontak oluşturmada kullanılabildiği için düşük engel oluşturmak imkansızdır. Bir tünelleme kontak oluşumu difüzyon, iyon ekleme, ince tabaka büyütme işlemleri gerektirir. İyi bir omik kontak elde etmeden önce genellikle iyi bir inceleme süreci gereklidir (Neamen 1992).

2.7.4. Omik kontak karakterizasyonu

İlk olarak Schokley tarafından 20. yy başlarında ortaya atılan basamaklı ölçüm metoduna göre, bir kontak için spesifik kontak direnci sabittir ve akım yoğunluğundan bağımsızdır. Bu metot, düşük potansiyel farkların ölçümündeki problemleri de ortadan kaldırır. Omik kontaklar arasına sabit bir I akımı sağlamak için sabit bir akım kaynağı bağlanır. Yüksek empedanslı bu voltmetrenin problemlerinden biri akımın verildiği kontağa diğeri ise numune üzerindeki kontaklara dokundurulur. Bu bize konum-potansiyel grafiğinin çizilmesini sağlar. Şekil 2.16'da görüldüğü gibi küçük yüzey alanına sahip kontak, A kontak genişliği ve B de her bir kontak arası mesafe olarak ifade edilmiştir.



Şekil 2.16. Spesifik omik kontak ölçümünde kullanılan basamaklı yapı

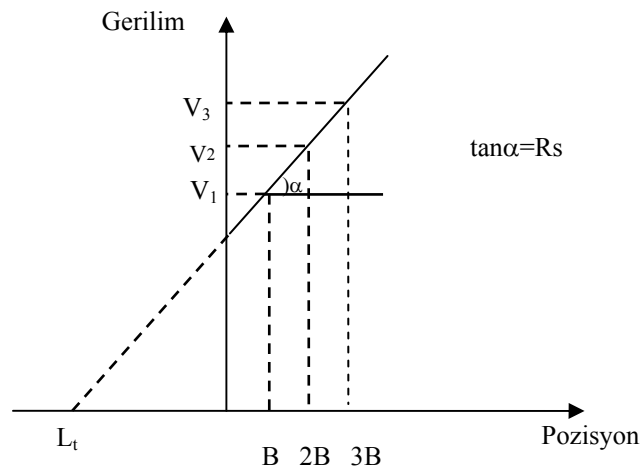
Konum-potansiyel grafiği extrapole edilerek sıfır potansiyel fark değerinde konum değeri belirlenir. Bu değer L_t transfer uzunluğunu verir. Transfer uzunluğunun değeri kontak direncine bağlıdır. Kontak direncinin düşük olması transfer uzunluğunu da düşürecektir. Bu metotla Schokley bize ince iletken tabakalar için spesifik kontak direncinin,

$$\rho_c = L_t^2 \times R_{st} \quad (2.42)$$

ile gösterileceğini ifade eder. Burada,

$$R_s = \frac{\left(\frac{V}{I}\right) \times z}{L} \quad (2.43)$$

ile verilir. Burada R_c 'yi bulmak için R_s 'nin bilinmesi gerekir. Şekil.2.17'de görülen yapı ise hem R_c 'nin hemde R_s 'nin ölçülmesini sağlar. Konum-potansiyel grafiğinden, eğrinin x-eksenini kestiği noktadan transfer uzunluğunu ve eğiminden de R_s 'yi belirleyebiliriz.



Şekil 2.17. Potansiyel konum grafiği yardımıyla L_t ve R_s 'nin bulunması

2.8. Schottky Kontakların Karakterizasyonu

2.8.1. Akım-gerilim (I - V) Ölçümleri

Schottky diyotlarda akım gerilim ölçümleri yardımıyla diyodun düz beslem karakteristiğinden idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri belirlenir. Diyodun idealite faktörünü belirlemek için,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.44)$$

eşitliği kullanılır (Ziel 1968). Bu ifadede $eV \gg nkT$ olması durumunda, 1 rakamı diğer terimin yanında çok çok küçük olduğu için ihmal edilebilir. O zaman akım değeri,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \right] \quad (2.45)$$

şekline dönüşür. Bu ifadenin her iki tarafının logaritması alınıp ve V 'ye göre türevi alındıktan sonra idealite faktörü,

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (2.46)$$

olur. Burada e elektronun yükü (1.6×10^{-19} C), k Boltzmann sabiti (8.625×10^{-5} eV/K) ve T sıcaklıktır. $\ln(I$ - $V)$ grafiği çizildiğinde düz beslem tarafındaki lineer kısma doğrusal fit uygulanarak, bu doğrunun eğiminden $dV/d(\ln I)$ değeri bulunur. İdealite faktörünün verildiği denklemde bu değer ve sabitler yerine yazılırsa idealite faktörü belirlenmiş olur. Fit edilen doğrunun $V = 0$ 'da düşey eksenini kestiği nokta ise I_0 doyma akım değerini verir. Bu değer,

$$I_0 = AA * T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \quad (2.47)$$

ile verilmektedir. Bu eşitliğin her iki tarafının logaritması alınıp Φ_b 'ye göre düzenlenirse engel yüksekliği,

$$e\Phi_b = kT \ln\left(\frac{AA * T^2}{I_0}\right) \quad (2.48)$$

elde edilir.

2.8.2 Cheung fonksiyonları yardımıyla Schottky diyet parametrelerinin belirlenmesi

Cheung tarafından 1986 yılında ortaya atılan bu modele göre, metal/yarıiletken kontağın düz beslem I - V karakteristikleri yardımıyla Schottky diyet parametreleri belirlenebilir. Termoyonik emisyonla belirlenen akım yoğunluğu (J), diyetin etkin alanı ile çarpıldığında, diyetten geçen toplam akım;

$$I = AA * T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.49)$$

olarak elde edilir. $eV \gg kT$ olduğunda 1 ihmal edilir. Uygulanan gerilimin tamamı deplasyon bölgesine düşmediği dikkate alınır, ideal durumdan sapmaların söz konusu olacağı söylenebilir. İdeal durumdan sapmaları ifade edebilmek için birimsiz sabit olan n idealite faktörünü dikkate alıp akım denklemini yeniden düzenlersek;

$$I = AA * T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.50)$$

olur. Uygulanan gerilim V 'nin IR_s kadarlık miktarı seri direnç üzerine düşeceği için V yerine $(V - IR_s)$ yazarak yukarıdaki ifadeyi aşağıdaki şekilde yazabiliriz.

$$I = AA * T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{e(V - IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.51)$$

Bu ifade düzenlenirse ;

$$V = \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AA * T^2}\right) + n\Phi_b + IR_s \quad (2.52)$$

şeklinde ifade elde edilir. (2.52) eşitliğinin $\ln I$ 'ya göre türevi alınırsa;

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (2.53)$$

ifadesi elde edilir. (2.53) eşitliğinde, $\frac{dV}{d(\ln I)}$ 'nin I 'ya göre grafiği bir doğru olacaktır.

Bu grafikten elde edilecek doğrunun eğimi nötral bölge direncini ya da R_s seri direncini verecektir. Bu doğrunun düşey eksenini kestiği noktadan n idealite faktörü bulunabilir (Aydoğan 2003). Potansiyel engeli Φ_b 'yi bulmak için;

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AA * T^2}\right) \quad (2.54)$$

şeklinde bir $H(I)$ fonksiyonu tanımlanabilir. (2.52) ve (2.53) eşitliklerinden;

$$H(I) = n\Phi_b + IR_s \quad (2.55)$$

yazılabilir. (2.55) eşitliğinde $H(I) - I$ grafiği çizildiğinde bu grafik de bir doğru şeklinde olacaktır. Bu doğrunun eğimi de R_s direncini verecektir. Bu doğrunun $H(I)$ eksenini kestiği noktadan da engel yüksekliği $e\Phi_b$ bulunur.

2.8.3. İyi bir diyot nasıl olmalıdır?

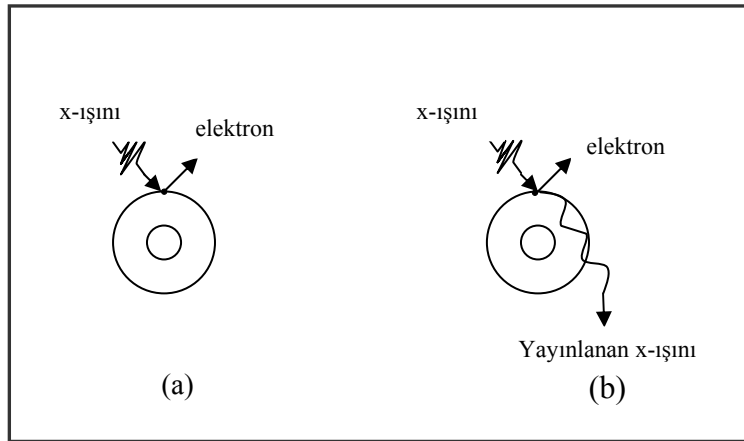
İyi bir Schottky diyot için dikkate alınması gereken parametreler idealite faktörü, düşük seri direnç ve düşük ters beslem akımlarıdır. İdeal Schottky diyotlarda idealite faktörü 1'dir. Schottky diyotlarda, diyot parametrelerini belirlemek için akım-gerilim (I - V) ölçümleri yapılır. Schottky diyodun akım-voltaj karakteristiği sadece yük taşınması hakkında bilgi vermez, aynı zamanda metal-yarıiletken arayüzeyde oluşan engelin yapısı hakkında da bilgi verir. Schottky engel diyotlarda elektronik özellikler, engel yüksekliği ve idealite faktörüyle belirlenir. Kontak üzerinde engel yüksekliğinin farklılığı, arayüzey tabakasının kalınlığı, arayüzey tabakasındaki yük yoğunluğuyla, yarıiletken yüzeyin oksitlenmesiyle, metal biriktirilken bilinmeyen kirlilik atomlarının oluşmasıyla, sıcaklıkla, radyasyonla değişir (Sağlam *et al.* 2003).

2.9. Yarıiletken Malzemelerde Radyasyon etkileri

Herhangi bir radyasyon ortamında yarıiletken aygıtlar ve malzemeler genellikle oldukça büyük enerjiye sahip foton ve parçacıklara maruz kalırlar. Yüksek enerjili parçacıklar ve fotonlar, farklı şekillerde zarar ve kusurlar oluşturarak kinetik enerjilerini kaybeder. Oluşan bu zararlar, iyonizasyon ve yerdeğiştirme zararlarıdır. Bu zararlar, yarıiletken aygıt ve malzemeler üzerinde performans azalmasına ve uzun dönemlerde iyileşme göstermeyen hasarlar ortaya çıkarır. Yarıiletken malzemede biriktirilen enerji miktarı sadece parçacık kütlesine ve enerjisine değil, aynı zamanda atom numarasına, hedef malzemenin kütlesine ve bırakılan hedef atomlarının numarasına da bağlıdır.

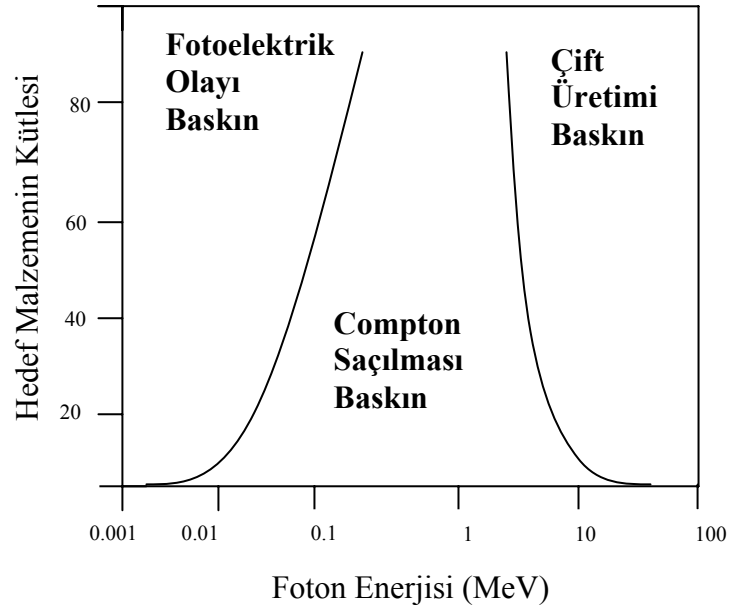
2.9.1. İyonizasyon zararı

İyonizasyon, net pozitif yüke sahip bir atom üretmek için atom ya da molekülden bir ya da daha fazla elektronun uzaklaştırılmasıdır (Şekil 2.18). İyonlaşma olarak radyasyonu sınıflandırma, bir elektron göndermek için yeterli kuantum enerjisine sahip olduğu bir duruma denir. İyonizasyon radyasyonu, mutasyon ya da kanser riskiyle ilgili pek çok fiziksel ve kimyasal etkiler yaptığı için önemlidir. İyonlaşma genellikle elektromanyetik spektrumun UV bölgesinde oluşur. Bu yüzden bütün X-ışınları ve gama ışınları iyonizasyon radyasyonlarıdır.



Şekil 2.18. a) iyonizasyon, b) Compton Saçılması

Nükleer parçacık radyasyonunun bütün çeşitleri, yüksek enerjileri nedeniyle iyonizasyon radyasyonudur. İyonizasyon, yarıiletkenlerle enerjili fotonlar (X-ışınları ve üzeri) etkileştiğinde baskın mekanizmadır. Bu yüzden bağlı bir valans elektron, iletkenlik bandı içinde ya da arkasında serbest bir boşluk bırakarak daha yüksek bir bant içerisinde yayılır. Şekil 2.19 hedef malzeme ile yüksek enerjili foton etkileşimini göstermektedir. Düşük enerjilerde fotoelektrik olay baskındır. Artan enerjiler için Compton etkisi, fotonun enerjisi tamamen soğrulmadığı için baskındır ve daha düşük enerjili ikinci bir foton, iyonlaşma enerjisiyle yayılır. Ancak, enerji bu ikinci fotonun enerjisi üzerinde olduğunda, ikinci hole-elektron çifti üretmek için yeniden soğrulur.



Şekil 2.19. Hedef materyal ile yüksek enerjili foton etkileşimi

2.9.2. Yerdeğiştirme zararı

Yüksek enerjili fotonlar, yarıiletkenlerde iyonizasyon etkisiyle elektron-hole çifti ürettiği gibi yüksek enerjili parçacıklar da yerdeğiştirme zararı nedeniyle Frenkel çifti (V-I) üretir. Yani, yarıiletken malzemelerde yerdeğiştirme zararının etkisiyle kristal örgüden bir atom sökülerek boşluk oluşturulur. Koparılan atom boşluğun tam karşısında yerleşir. Bu da yarıiletken malzemelerde örgü uyumunu bozduğu için kusur olarak adlandırılır. Fotonlar, devamlı iyonizasyon olayıyla ilgili olduğu için, elektron iyonizasyonundan geri çekilmesiyle Frenkel çiftleri üretir. Ancak, 170 keV'den daha büyük enerjili fotonlar için geri saçılan enerjili Compton elektronları, yarıiletken örgüde kendi hasar bölgelerini (cascade) oluşturur. Parçacık ışınlamasıyla oluşturulan nokta kusurlar yüksek enerjilidir ve bu yüzden örgü içinde uzak bir mesafeye göç edebilir. Onlar altlık ya da diğer ara yüzeylerde rekombinasyonla malzemeden ayrılabilir ya da daha uygun ikinci kusur ve kusur karmaşıklığı oluşturan kirlilik atomlarıyla tuzaklanmış olabilir. Böyle atomik yer değiştirme ihtimali, daha büyük E ve kütle (m) için daha yüksektir. Radyasyon kusurlarının farklı tipleri aygıt performansı üzerinde farklı elektriksel etkiye sahiptir. Yarıiletken malzemelerin yer değiştirme zararı bant aralığında bir ya da daha fazla radyasyon kusuru oluşturmalarına rağmen yerdeğiştirme

zararı, yarıiletken malzemelerin elektrik ve optik özellikleri üzerine büyük etkiler meydana getirir. Bu etkiler,

- Radyasyon sonucu oluşan kusurlar tarafından e-h çifti üretimi
- Radyasyon sonucu oluşan tuzak merkezleri tarafından e-h çiftlerinin rekombinasyonu
- Donor ve akseptörlerin telafisi
- Taşıyıcıların tünellenmesi

Sonuç olarak, serbest taşıyıcı mobilitesi, yoğunluğu, direnci, oluşma ve yok olma ömürleri gibi önemli malzeme parametreleri yer değiştirme zararından etkilenir. Dahası, radyasyon içeren derin seviyelerin varlığı Fermi-Dirac istatistiğine rağmen, net serbest kusur yoğunluğuyla etkileşen Fermi seviyesinin durumunu ve malzemedeki yük dengesini değiştirir. Yerdeğiştirme zararı ve oluşan radyasyon kusurları arasındaki ilişki açık değildir. Malzeme içinde meydana gelen kusurları yok etme metodlarından biri tavlama'dır. Radyasyon altındaki devre elemanının ömrü bazen sıcaklık uygulamasıyla uzatılabilir. Bunun için genellikle izokronal tavlama kullanılmaktadır. Yine de izotermal tavlama, belirli devre elemanlarının iyileştirilmesinde kullanışlı olabilir. Aynı zamanda radyasyona maruz bırakılmış devre elemanlarının radyasyondan sonra bozulduğu anlaşılmaktadır. Çoğu durumda yerdeğiştirme ve iyonizasyon zararının her ikisi de radyasyon ortamlarında yarıiletken malzeme ve devre elemanlarında dikkate alınması gerekir (Coşkun 2005).

2.9.3. Elektron Radyasyonu

Bu çalışmada radyasyon kaynağı olarak elektron radyasyonu seçilmiştir. Çünkü tüm elektron ışınları iyonlaştırıcı radyasyon kaynağı olarak davranır. Fakat sadece yüksek enerjili hızlandırıcılar, yarıiletkende yerdeğiştirme zararı oluşturur. Bir elektron ışını, çok yüksek statik potansiyelle yüklü elektrot ile toprak arasına uygulanan alan sonucu hızlandırılır. Uygulanan potansiyel sınırı 10 MeV'dir. Fakat günümüzde kullanılan hızlandırıcılar genellikle 1-3 MeV'de çalışır. 600-600000 rad/sn doz hızına bağlı olarak

tipik ışın akımları 10 nA ile 10 mA arasında değişir. Test altındaki bileşenler, havada bu ışına maruz bırakılır. Işın yaklaşık $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 'lik bir alanı tarayabilir.

Elektron radyasyonu yarıiletkeni kirletmez. Çünkü elektronlar nükleer bir reaksiyon için gerekli olan enerjiden daha az enerjiye sahip, temel atom yapısını değiştirmeyecek parçacıklardır. Bu yüzden yarıiletken malzeme ve devre elemanlarının asal kusurlarını ortaya çıkarmak için elektron radyasyonu çok sık kullanılır. Elektron radyasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlar kristal büyütme araştırmacıları için oldukça yararlıdır. Aynı zamanda elektron radyasyonu, numunelerin boylu boyunca homojen bir şekilde ışınlanmasını sağlamaktadır. Bunun nedeni giricilikleri yüksektir ve böylece numuneyi geçebilirler. Proton ve diğer ağır parçacıklar sadece numunenin yüzeyine yakın yerlerde hasar oluşturabilirler. Çünkü onların giricilikleri düşüktür. Bu özellikleri nedeniyle araştırma için elektron radyasyonu seçilmiştir. Bu çalışmada gerekli olan elektron radyasyonu için tıbbi tedavi amacıyla geliştirilen Siemens-Primus lineer elektron hızlandırıcı makinesi kullanılmıştır.

2.9.4. Lineer Hızlandırıcılar

İlk olarak 1950'lerde kullanılmaya başlayan lineer hızlandırıcılar (LINAC) kısa bir sürede elektronları hızlandırarak 4-40 MeV arasında değişen kinetik enerji sağlar. Elektron tabancasından serbest bırakılan elektronlar birkaç keV' dan birkaç MeV'a kadar hızlandırabilir. Ortalama akım yine mA oranındadır. Fakat doz oranı 10^{10} rad/sn gibi yüksek olabilir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

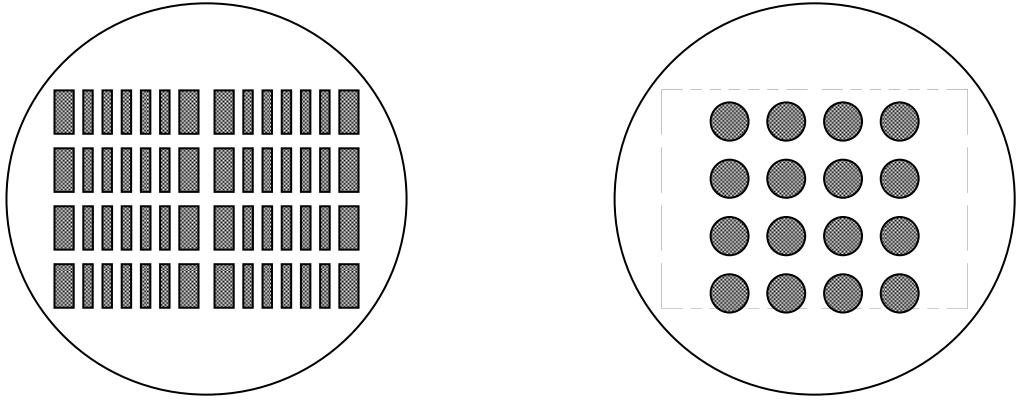
3.1. Giriş:

Yarıiletken aygıt teknolojisinde diğer geniş bant aralıklı yarıiletkenler gibi SiC’de büyük bir öneme sahiptir (Basak *et al.* 2003). Elektronik endüstrisinde 10 yıldan daha fazla süredir Si yerine, SiC yarıiletken malzemesi kullanılmaktadır (Guy *et al.* 2004). Günümüzde ticari olarak SiC wafer ve epitaksiyel altlıklar mevcuttur. SiC’in elektriksel ve termal özellikleri yüksek güç, yüksek sıcaklık ve yüksek frekansta çalışan cihazlarda kullanılmasını sağlar (Marinova *et al.* 1997).

SiC aygıtların büyük başarısı, yüksek akım sürüşü, aygıtı daha az güç kaybında tutmak için düşük omik kontak oluşturabilmesi ve sağlamlığına dayanır (Chang *et al.* 2005). Günümüzde farklı teknikler kullanılarak 4H-SiC ve 6H-SiC altlık malzemeleriyle omik kontaklar yapılmaktadır. Bu çalışmada Au/Ni/*n*-4H-SiC ve Au/Ni/*n*-6H-SiC omik ve Ni/*n*-4H-SiC ve Ni/*n*-6H-SiC Schottky kontaklar üzerine radyasyon etkileri incelenmiştir. Bilindiği gibi radyasyon, yarıiletken aygıtların çalışma performansını etkileyen önemli faktörlerden biridir. *n*-tipi 4H-SiC ve *n*-tipi 6H-SiC altlıklar üzerine omik kontak ve Schottky kontak yapmak için Ni metali kullanılmıştır. Elde edilen kontakların oksitlenmesini engellemek amacıyla, omik kontağa ve Schottky kontağın omik tarafına Ni üzerine yeniden Au metali buharlaştırılmıştır. Taban malzeme üzerine kontakları yapmak için gölge maskeler temin edilmiştir. Omik kontak ölçümlerinin gerçekleştirilmesi için prob düzeneği kullanılmıştır. Elektron radyasyonu kaynağı olarak, tıp alanında radyo terapi tedavilerinde kullanılan doğrusal elektron hızlandırıcı kullanılmıştır. Schottky ve omik kontaklar kısım 3.5’de verildiği şekliyle, gerekli şartlar uygulanarak ölçüme hazır hale getirilmiştir. Daha sonra kontaklar sırayla 6 MeV, 12 MeV ve 15 MeV enerjili elektronlarla ışınladı. Kontak ölçümleri (*I-V* ve *C-V*) her bir radyasyon aşamasından sonra periyodik olarak alınmış ve kontakların elektriksel karakteristikleri incelenmiştir.

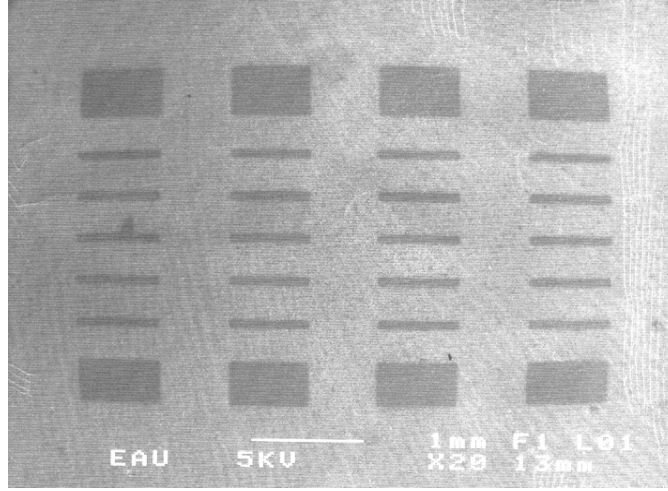
3.2. Gölge Maskeler

Çok küçük boyuttaki devreler, numune üzerine ya fotolitografi tekniği ile ya da gölge maske ile doğrudan transferi ile oluşturulur. Fotolitografi tekniği için ileri teknolojiye sahip laboratuarlara ihtiyaç duyulur. Bu nedenle çok küçük boyuttaki devrelerin numune üzerine oluşturulmasında gölge maske tekniği kullanılır. Bu teknik fotolitografi tekniğine göre hem daha ucuz hem de daha kolaydır.



Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan omik ve Schottky gölge maskeler (Gedik 2005)

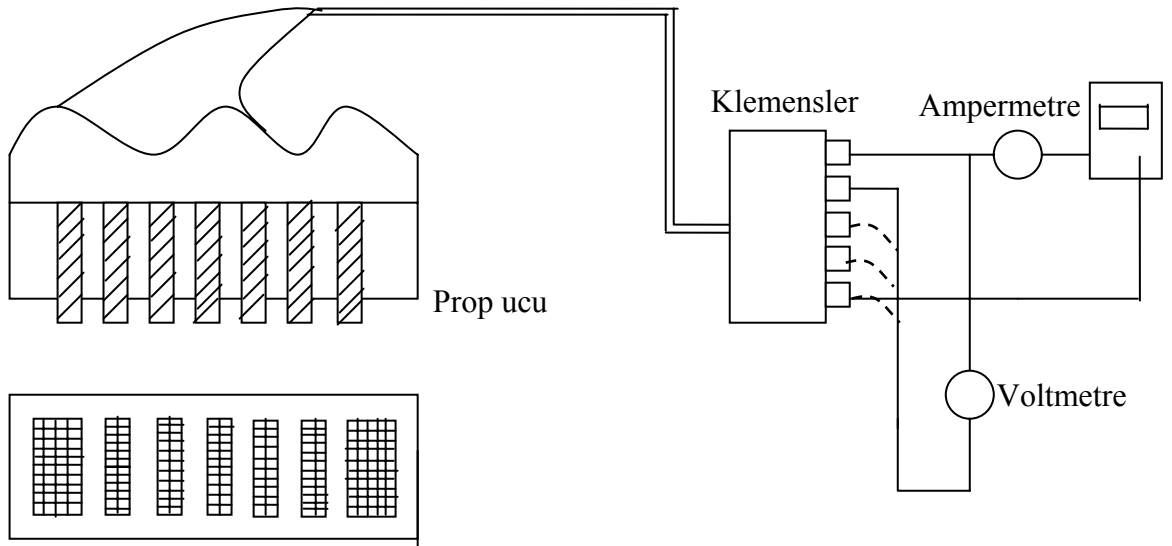
Omik kontak ölçümlerinde kullanılan gölge maskenin SEM (Scanning Electron Microscopy) filmi Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Şekilden kontakların uzunluğunun 696 mikron, genişliklerinin ise akım kontakları için 384 mikron, gerilim kontakları için 76 mikron olduğu görülmektedir. Schottky kontak için kullanılan maskeler için diyot çapı 0.5 mm’dir.



Şekil 3.2. Omik kontak ölçüm paterninin SEM filmi (Coşkun 2006)

3.3. Omik Kontak Direnci Ölçümleri İçin Prob Düzeneginin Hazırlanması

Au/Ni/n-4H-SiC ve Au/Ni/n-6H-SiC ile yaptığımız omik kontakların yapısal özelliklerini belirlemek için Transmission Line Methodu (TLM) kullanılmıştır. Bu metodu kullanarak aldığımız ölçümleri belirlemek için kontakların her birinin üzerine degecek şekilde iletken uçlar kullanıldı. İletken yollar kısa devre oluşmaması için yalıtılmış olarak seçildi. Sadece numune üzerine degecek yüzeyler ve klemenslere bağlanan uçlar iletken hale getirildi. Yapılan kontak sayısı kadar klemens kullanılarak ölçümler gerçekleştirildi (Şekil 3.3). Ölçüm esnasında numune üzerinde kontakların birbirleriyle temasını önlemek için kullanılan problemlerin yüzeyi, mümkün olduğu kadar küçük tutuldu. Hazırlanan problemler, elle kontrol edilebilen ve aşağı yukarı hassas bir şekilde hareket eden prob sehпасı kolu üzerine yerleştirildi ve numune üzerindeki kontakların problemlerle teması bu kol yardımıyla gerçekleştirildi (Şekil 3.4). Alınan ölçümlerden yararlanarak kontak parametreleri belirlendi.



Omik Kontak Direnci
Ölçüm Deseni

Şekil 3.3. Prob istasyonu ve kullanımı

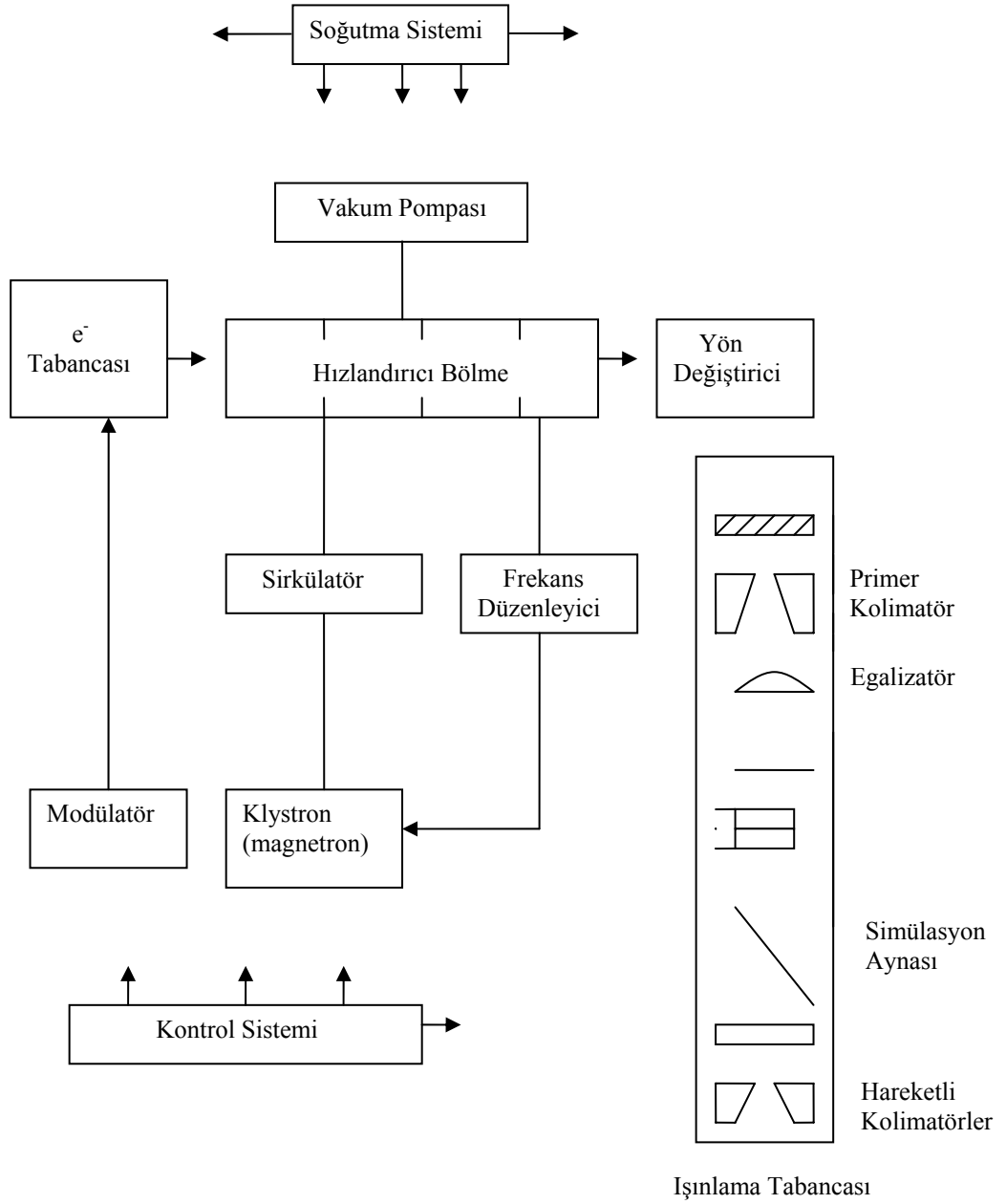


Şekil 3.4. Omik kontak direnci ölçümünde kullanılan deneysel düzenek

3.4. Işınlamada Kullanılan Lineer Elektron Hızlandırıcı (Siemens-Primus)

Kullandığımız hızlandırıcı 6-18 MeV enerjide foton gönderebilmekte ve 6-21 MeV enerjide elektron üretebilmekte ve otomatik olarak doz miktarını ayarlayabilmektedir. Lineer elektron hızlandırma prensibi, X-ışını tüpünde olduğu gibi ısıtılarak metal telden serbest hale geçen elektronlar, elektromanyetik alan içinde hızlandırılırlar. Hızlandırma odacıklarından çıkan elektronlar 90 veya 270 derecelik açıyla saptırılarak ışının çıkacağı kafa kısmına gönderilir.

- Dairesel ilk kolimatör ışın hüzmesinin çapını tayin eder.
- Difüzör veya manyetik alan oluşturan elektron süpürgesi elektronların homojen şekilde dağılımını temin eder.
- İki ayrı iyonizasyon odası ile verilen dozun ışın hüzmesinin şiddeti ve doğrusal olup olmadığı kontrol edilir.



Şekil 3.5. Siemens-Primus doğrusal lineer hızlandırıcı

3.5. Numunelerin Hazırlanması

4H–6H SiC <0001> altlık malzemeleri University Wafer firmasından satın alındı. *n*-4H-SiC ve *n*-6H-SiC kristallerinden yaklaşık 0,5 cm² büyüklüğünde ikisi omik ve ikisi Schottky kontak oluşturmak için dört adet numune kesildi. SiC kristalinden kesilen numuneler, Si'nin temizliğinde kullanılan RCA₁ ve RCA₂ metotlarına uygun olarak temizlendi.

RCA₁;

NH₄OH:H₂O₂:H₂O (1:1:5) → 75°C de 15 dk

Deiyonize su → 3 dk

RCA₂;

HCl:H₂O₂:H₂O (1:1:6) → 75°C de 15 dk

Deiyonize su → 3 dk

Daha sonra numuneler;

Aseton → 5 dk

Deiyonize su → 3 dk

Metanol → 5 dk

Deiyonize su → 5 dk

yıkılarak kurutuldu. Kontak yapımı için kullanılan malzemeler %10 HCl çözeltisinde 3 dk bekletildikten sonra deiyonize su ile yıkılarak kullanıma hazır hale getirildi. Temizlenen numunelere Schottky kontak ve omik kontak oluşturmak için 5N saflıkta Ni metali kullanıldı. Ni metali buharlaştırıldıktan sonra tekrar Schottky kontakların omik tarafına ve omik kontaklara tekrar 5N saflıkta Au metali buharlaştırılarak üst tabaka oluşturuldu. Kontak malzemelerini buharlaştırmak için Univex-300 buharlaştırma ünitesi kullanıldı.

Daha sonra omik kontak yapmak için gölge maske ve pota buharlaştırma ünitesine yerleştirildi. Hem Schottky kontakların omik tarafına hemde omik kontaklara Ni metali buharlaştırıldı. İkinci bir buharlaştırma daha yapmak için altın ısıtıcı potaya yerleştirildi. Ni buharlaştırılan Schottky kontağın omik tarafına ve omik kontaklara yeniden buharlaştırma yapıldı. Numuneler üzerine temiz cam konularak numunelerin arka yüzeyinin kirlenmesi önlendi. Buharlaştırma 4×10^{-5} Torr'luk vakum altında gerçekleştirildi. Buharlaştırma işleminden sonra numuneler önceden hazırlanmış olan tavlama fırınına yerleştirildi. Tavlama işlemi, literatüre uygun olarak azot gazı altında 950°C 'de yaklaşık 10 dk süreyle yapıldı (Defives *et al.* 1999, Lu *et al.* 2003). Tavlama yapıldıktan sonra omik kontak numuneleri, spesifik omik kontak direnci ölçümlerine hazır hale getirildi.

Schottky kontakların mümkün olan en geniş yüzeyi Ni buharlaştırmak için yeniden buharlaştırma ünitesine yerleştirildi. Numuneler üzerine temiz cam konularak numunelerin arka yüzeyinin kirlenmesi önlendi. Daha önceden buharlaştırmak için temizlenen Ni, tungsten ısıtıcının içine yerleştirildi. Numunenin diğer yüzüne Schottky kontak yapmak için gölge maske kullanıldı. Bu işlemde yine 4×10^{-5} Torr'luk vakum ortamında gerçekleştirildi. Buharlaştırma yapıldıktan sonra Schottky diyotlar diyot parametreleri belirlenmek için hazır hale getirildi.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Omik Kontak Direnci Ölçüm Sonuçları

Au/Ni/*n*-4H-SiC ve Au/Ni/*n*-6H-SiC omik kontaklar, Siemens-Primus marka lineer elektron hızlandırıcıyla 6 MeV, 12 MeV, 15 MeV'lik yüksek radyasyon enerjisiyle $1 \times 10^{12} \text{ e.cm}^{-2}$ düşük dozda ışınladı. Işınlamadan önce ve sonra numunelerin transfer uzunluğu (L_t) ve standart sapma değerleri hesaplandı. Tüm ölçümler ve hesaplamalar sonucu elde edilen omik kontak değerleri Çizelge 4.1 ve 4.2'de verilmektedir. Artan ışınlama enerjisiyle kontak direnci her iki diyot için de azaldığı görülmektedir. Şekil 4.1 ve 4.2 sırasıyla Au/Ni/*n*-4H-SiC ve Au/Ni/*n*-6H-SiC omik kontaklarının ışınlama enerjisiyle kantağın direnç değişimini göstermektedir.

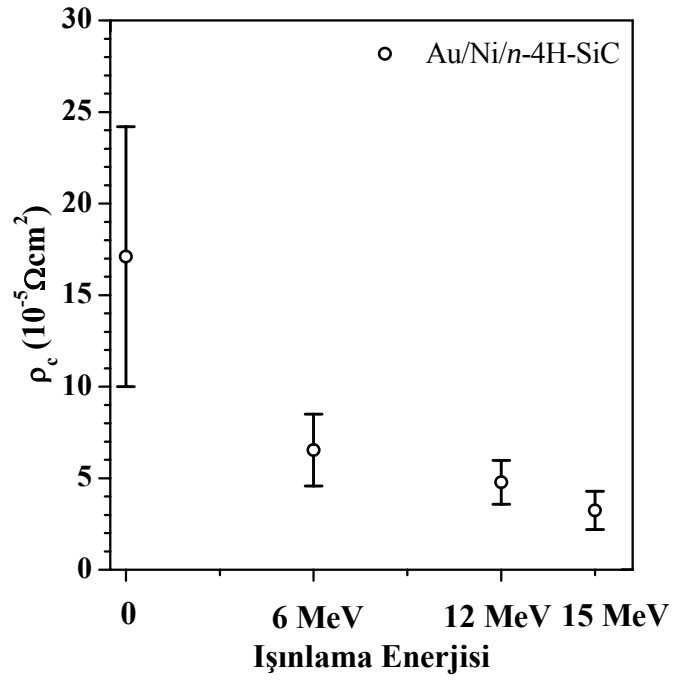
Çizelge.4.1. Au/Ni/*n*-4H-SiC için spesifik omik kontak değerleri

Olay	Özdirenç($\Omega.\text{cm}^2$)
Işınlamadan Önce	$(17,1 \pm 7,1).10^{-5}$
6 MeV Radyasyon Sonrası	$(6,53 \pm 1,97).10^{-5}$
12 MeV Radyasyon Sonrası	$(4,77 \pm 1,20).10^{-5}$
15 MeV Radyasyon Sonrası	$(3,24 \pm 1,05).10^{-5}$

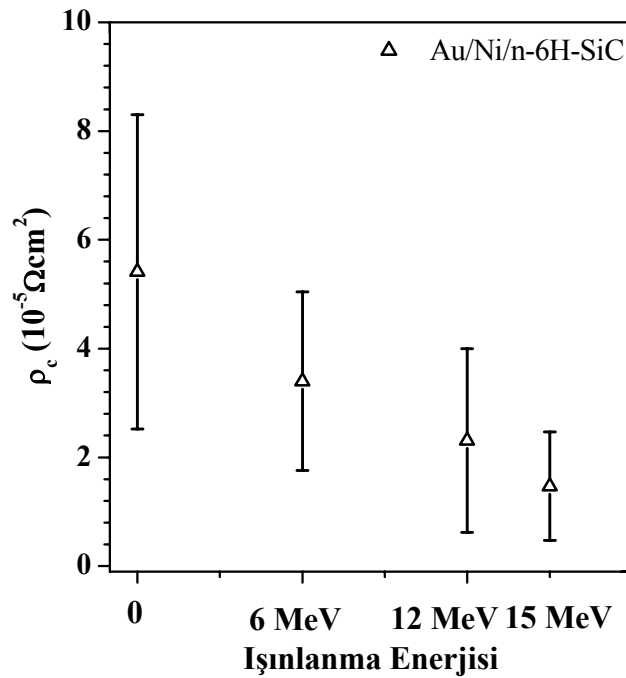
Çizelge 4.2. Au/Ni/*n*-6H-SiC için spesifik omik kontak değerleri

Olay	Özdirenç($\Omega.\text{cm}^2$)
Işınlamadan Önce	$(5,41 \pm 2,89).10^{-5}$
6 MeV Radyasyon Sonrası	$(3,40 \pm 1,64).10^{-5}$
12 MeV Radyasyon Sonrası	$(2,31 \pm 1,69).10^{-5}$
15 MeV Radyasyon Sonrası	$(1,47 \pm 1).10^{-5}$

Çizelgelerden elde edilen omik kontak özdirenç değerlerinin ışınlama enerjisiyle değişimi Şekil 4.1 ve 4.2'de verilmiştir.



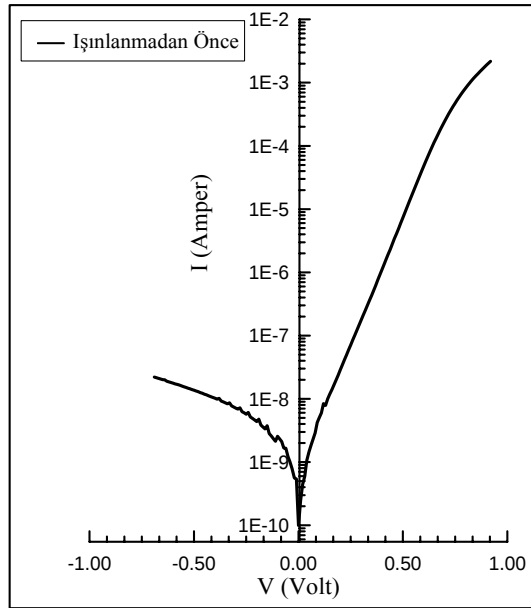
Şekil 4.1. Au/Ni/n-4H-SiC için spesifik omik kontak öz direncinin ışınlamaya bağlı değişimi



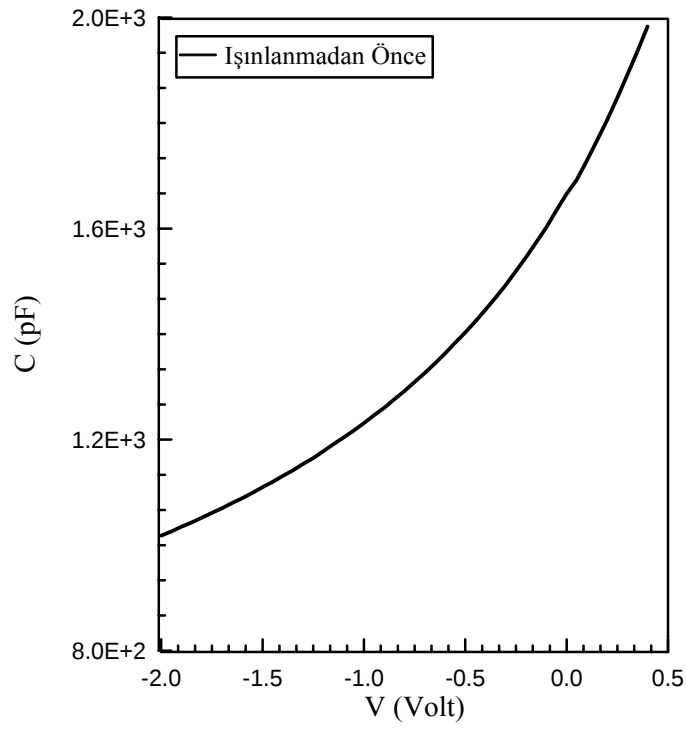
Şekil 4.2. Au/Ni/n-6H-SiC için spesifik omik kontak öz direncinin ışınlamaya bağlı değişimi

4.2. Schottky Kontak Ölçümleri

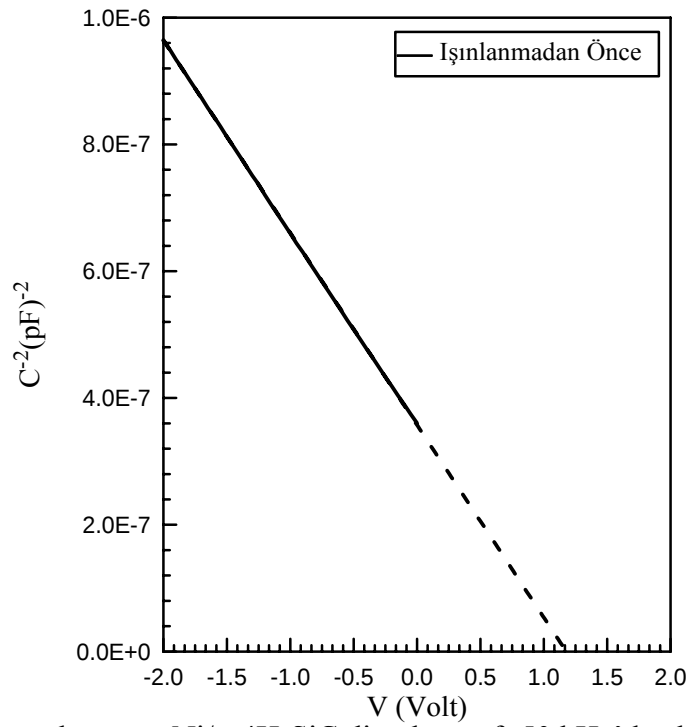
Ni/n-4H-SiC ve Ni/n-6H-SiC Schottky kontaklar, omik kontaklarda olduğu gibi 6 MeV, 12 MeV ve 15 MeV’de Siemens-Primus marka lineer elektron hızlandırıcı kullanılarak ışınladı. Işınlanmadan önce kontakların Keithley-487 pikoampermetre ile I - V ölçümleri ve sonrasında C - V ölçümleri 50 kHz’de HP-4192 A kapasitemetresi kullanılarak alındı. I - V ölçümlerinden idealite faktörü, engel yüksekliği hesaplanırken, C - V ölçümleriyle de difüzyon potansiyeli, Fermi enerji seviyesi ve donör konsantrasyonu belirlendi. Işınlanmadan önce Ni/n-4H-SiC Schottky diyodunun idealite faktörü 1,55, engel yüksekliği 0,80 eV, donör konsantrasyonu $2,12 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, difüzyon potansiyeli 1,17 eV ve Fermi enerji seviyesi ise 0,23 eV olarak bulundu. Şekil 4.3, 4.4 ve 4.5, Ni/n-4H-SiC diyodunun I - V , C - V ve $1/C^2$ - V grafiklerini göstermektedir.



Şekil 4.3. Işınlanmadan önce Ni/n-4H-SiC diyodunun I - V grafiği

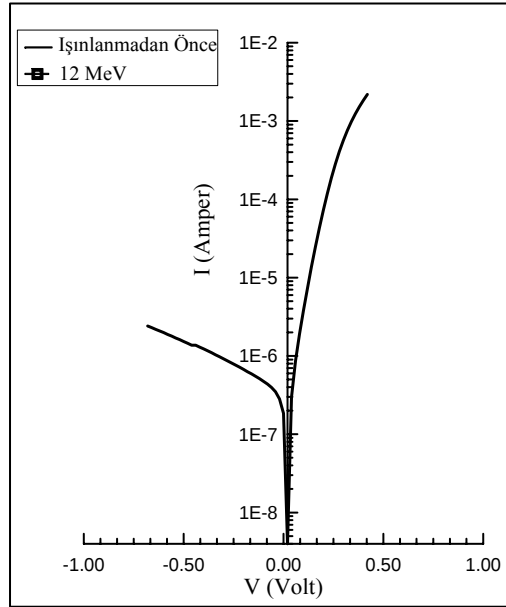


Şekil 4.4. Işınlanmadan önce Ni/n-4H-SiC diyodunun $f=50$ kHz’de alınan C-V grafiği

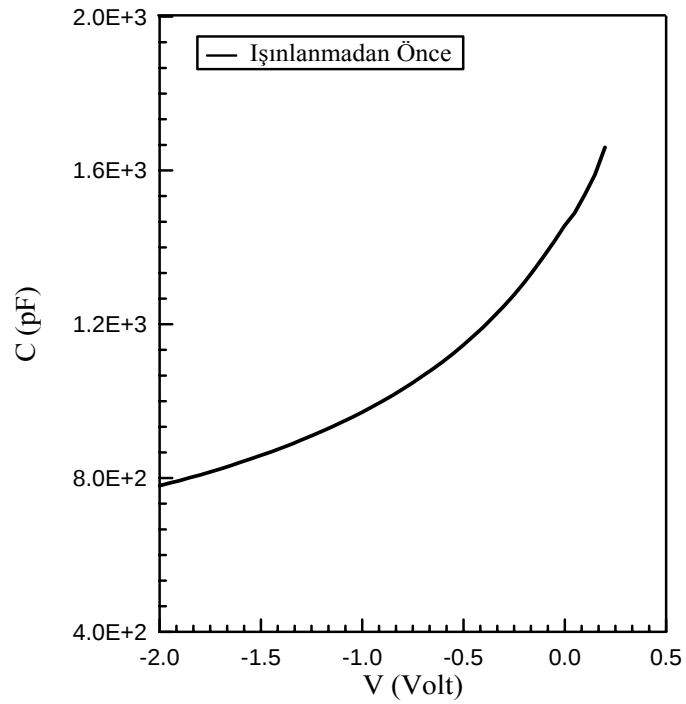


Şekil 4.5. Işınlanmadan önce Ni/n-4H-SiC diyodunun $f=50$ kHz’de alınan $1/C^2$ -V grafiği

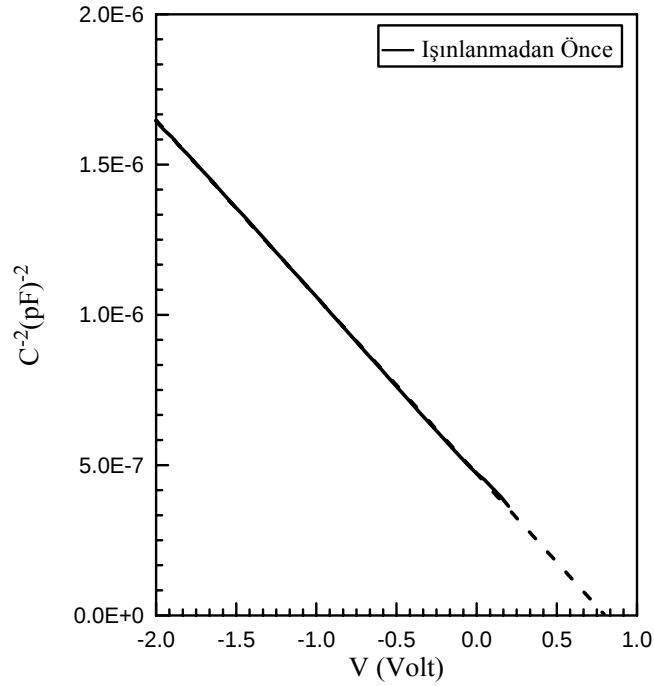
Şekil 4.6 , 4.7 ve 4.8 sırasıyla ışınlanmadan önce Ni/6H-SiC kontağın I - V , C - V ve $1/C^2$ - V grafiklerini göstermektedir.



Şekil 4.6. Işınlanmadan önce Ni/n-6H-SiC diyodunun I - V grafiği



Şekil 4.7. Işınlanmadan önce Ni/n-6H-SiC diyodunun 50 kHz’de C - V grafiği

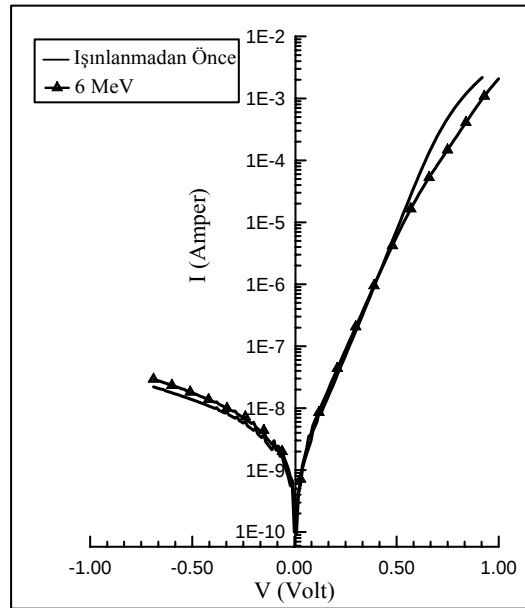


Şekil 4.8. Işınlanmadan önce Ni/n-6H-SiC diyodunun 50 kHz’de $1/C^2$ -V grafiği

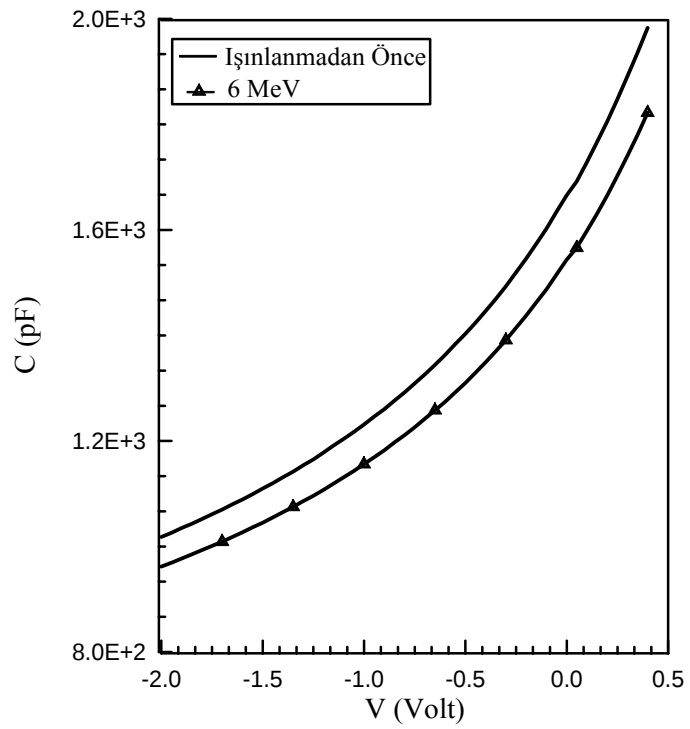
Ni/n-6H-SiC diyodunun ışınlanmadan önceki idealite faktörü 1,12, engel yüksekliği 0,65 eV, donör konsantrasyonu $1,09 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, difüzyon potansiyeli 0,78 eV ve Fermi enerji seviyesi ise 0,29 eV olarak hesaplandı.

4.2.1. 6 MeV ışınlama

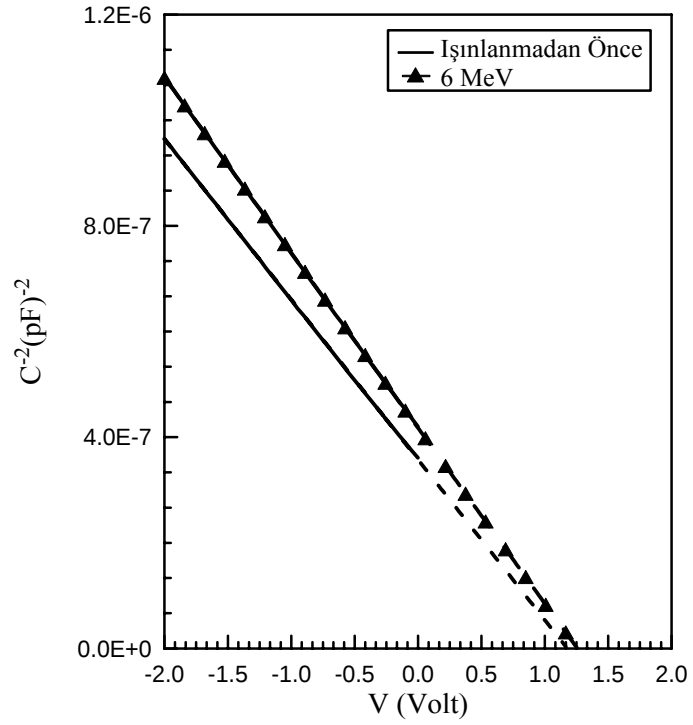
Ni/n-4H-SiC ve Ni/n-6H-SiC kontak malzemeleri Siemens-Primus marka lineer elektron hızlandırıcıda 6 MeV’lik radyasyona tabi tutuldu. Işınlama işlemi 326 sn sürdü ve toplam doz $1 \times 10^{12} \text{ ecm}^{-2}$ olarak belirlendi. Schottky kontaklar üzerine radyasyonun etkisinin anlaşılması için aygıtların Schottky yüzeyleri radyasyona maruz bırakıldı. Işınlanma işleminden sonra numunenin doğrultucu davranışındaki değişimleri incelemek için numune üzerinde I - V ve C - V ölçümleri gerçekleştirildi. 6 MeV’de ışınlanan Ni/n-4H-SiC diyodunun idealite faktörü 1,586, engel yüksekliği 0,79 eV, donör konsantrasyonu $1,94 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, difüzyon potansiyeli 1,25 eV ve Fermi enerji seviyesi ise 0,235 eV’dir. Işınlamayla idealite faktörü artarken, engel yüksekliği ve donör konsantrasyonu azaldı. Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11 sırasıyla 6 MeV’de ışınlanmadan sonra Ni/n-4H-SiC kontakın I - V , C - V ve $1/C^2$ - V grafiklerini göstermektedir.



Şekil 4.9. 6 MeV’de ışınlanan Ni/n-4H-SiC diyodunun I - V grafiği

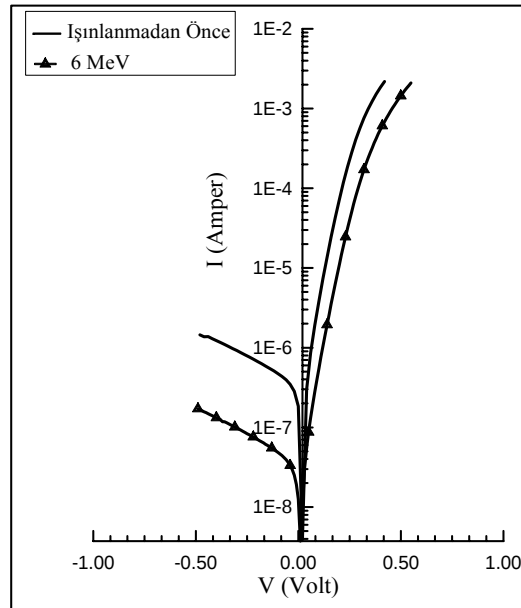


Şekil 4.10. 6 MeV’de ışınlanan Ni/n-4H-SiC diyodunun $f=50$ kHz’de C - V grafiği

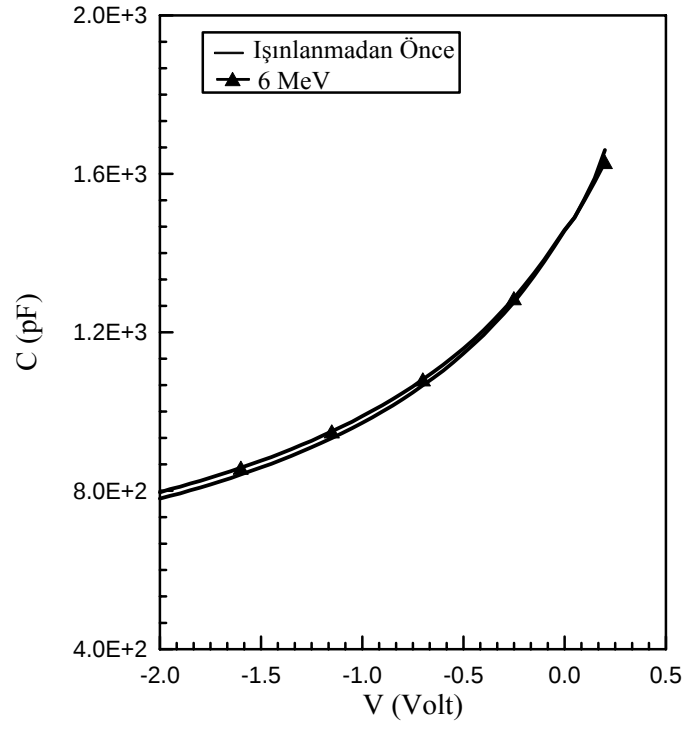


Şekil 4.11. 6 MeV’de ışınlanan Ni/n-4H-SiC diyodunun $f=50$ kHz’de $1/C^2$ -V grafiği

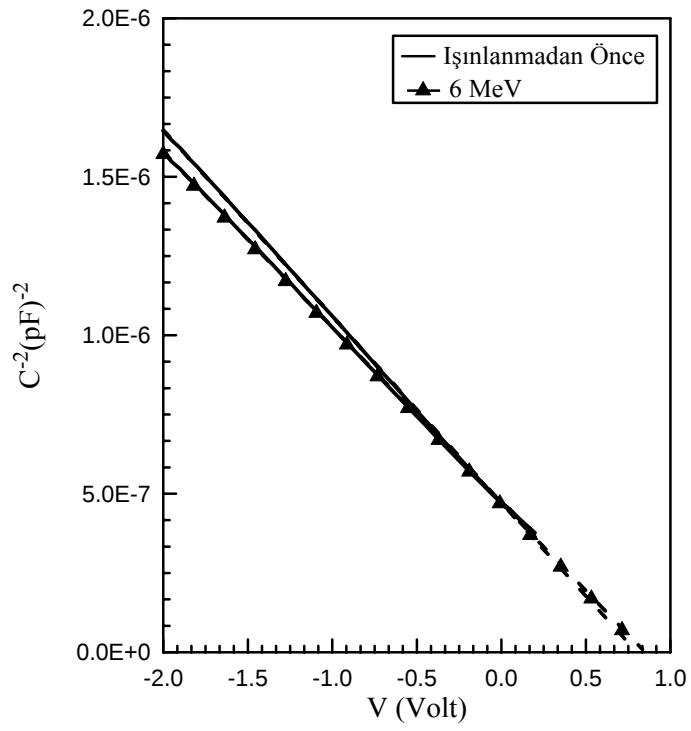
Şekil 4.12, 4.13 ve 4.14 sırasıyla 6 MeV’de ışınlanmadan sonra Ni/n-6H-SiC kontağın I -V, C -V ve $1/C^2$ -V grafiklerini göstermektedir.



Şekil 4.12. 6 MeV’de ışınlanan Ni/n-6H-SiC diyodunun I -V grafiği



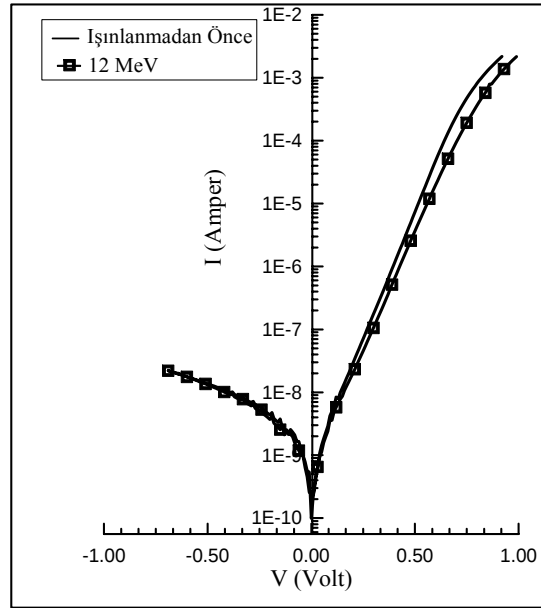
Şekil 4.13. 6 MeV’de ışınlanan Ni/n-6H-SiC diyodunun 50 kHz’de alınan C-V grafiği



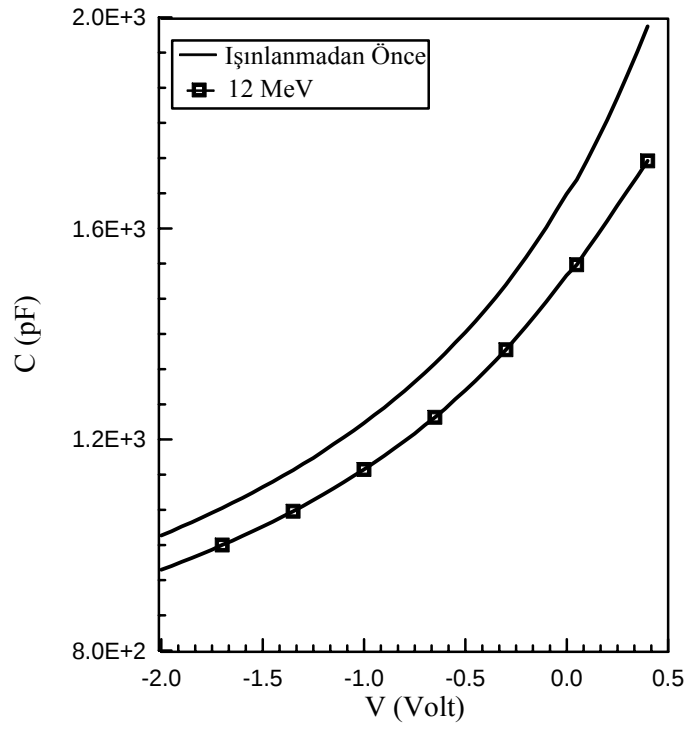
Şekil 4.14. 6 MeV’de ışınlanan Ni/n-6H-SiC diyodunun 50 kHz’de alınan C^{-2} -V grafiği

4.2.2. 12 MeV ışınlama

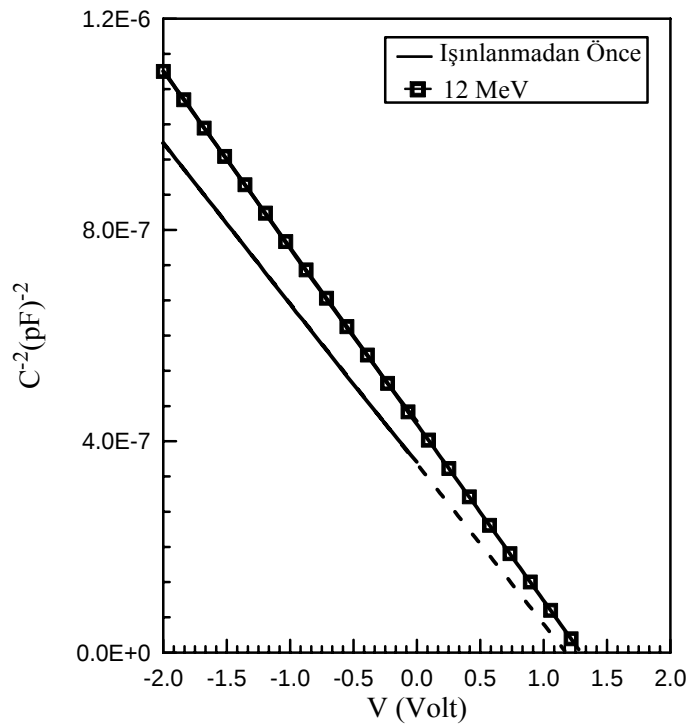
Ni/n-4H-SiC ve Ni/n-6H-SiC kontaklar yine Siemens-Primus marka lineer elektron hızlandırıcı ile 12 MeV'lik elektron radyasyonuna maruz bırakıldı. Işınlama numunenin Schottky yüzeyine yapıldı. Işınlama 1×10^{12} ecm⁻² düşük dozda 311 sn sürdü. Işınlanan numunenin Schottky kontak yüzeyinden *I-V* ve *C-V* ölçümleri alınarak idealite faktörü, engel yüksekliği ve donör konsantrasyonunun değişimi incelendi. 12 MeV'de ışınlanan Ni/n-4H-SiC diyodunun idealite faktörü 1,80, engel yüksekliği 0,80 eV, donör konsantrasyonu $1,92 \times 10^{15}$ cm⁻³, difüzyon potansiyeli 1,29 eV ve Fermi enerjisi ise 0,235 eV bulundu. Şekil 4.15, 16 ve 17, 12 MeV'de ışınlanan Ni/n-4H-SiC diyodunun *I-V*, *C-V* ve $1/C^2$ -*V* grafiğini göstermektedir.



Şekil 4.15. 12 MeV'de ışınlanan Ni/n-4H-SiC diyodunun *I-V* grafiği

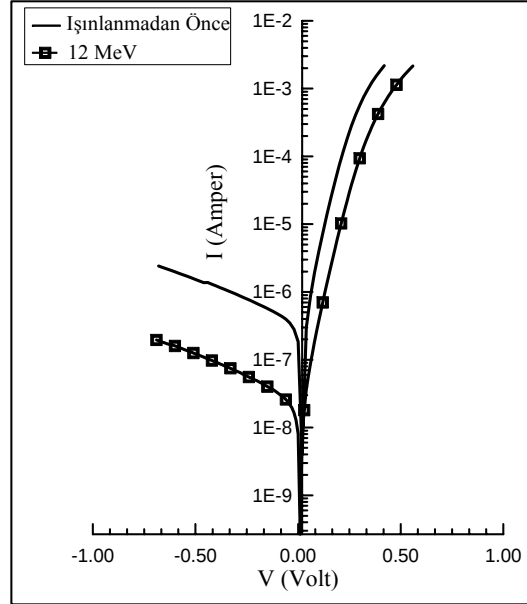


Şekil 4.16. 12 MeV’de ışınlanan Ni/n-4H-SiC diyodunun $f=50$ kHz’de C-V grafiği

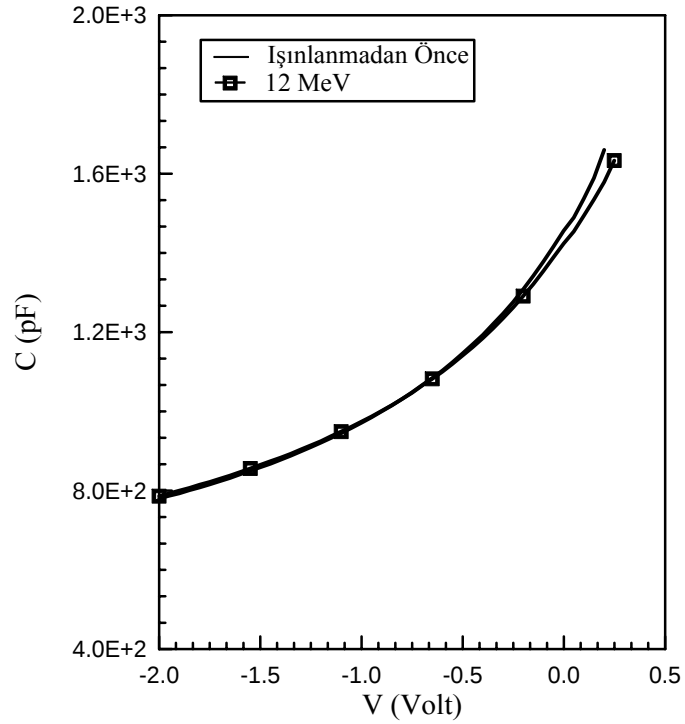


Şekil 4.17. 12 MeV’de ışınlanan Ni/n-4H-SiC diyodunun $f=50$ kHz’de $1/C^2$ -V grafiği

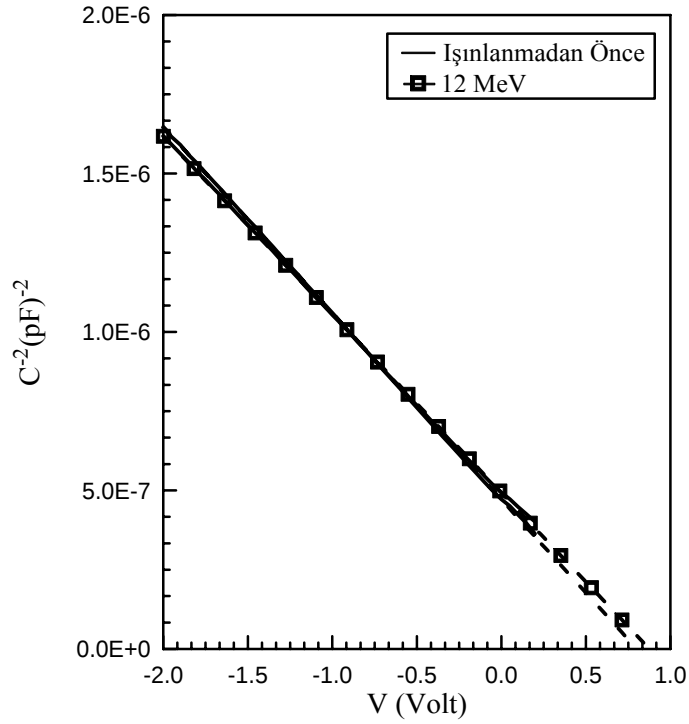
Şekil 4.18, 19 ve 20, 12 MeV’de ışınlanan Ni/n-6H-SiC diyodunun I - V , C - V ve $1/C^2$ - V grafiğini göstermektedir.



Şekil 4.18. 12 MeV’de ışınlanan Ni/n-6H-SiC diyodunun I - V grafiği



Şekil 4.19. 12 MeV’de ışınlanan Ni/n-6H-SiC diyodunun 50 kHz’de C - V grafiği



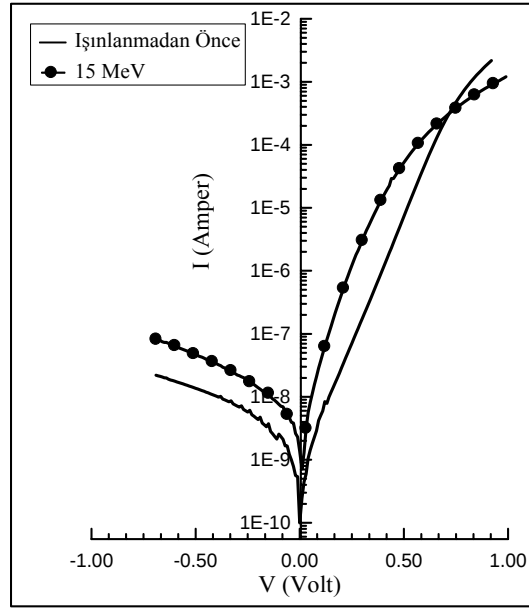
Şekil 4.20. 12 MeV’de ışınlanan Ni/n-6H-SiC diyodunun 50 kHz’ de $1/C^2$ -V grafiği

12 MeV’de ışınlanan Ni/n-6H-SiC diyodunun idealite faktörü 1,27, engel yüksekliği 0,71 eV, donör konsantrasyonu $1,06 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, difüzyon potansiyeli 0,87 eV ve Fermi enerji seviyesi ise 0,296 eV olarak hesaplandı.

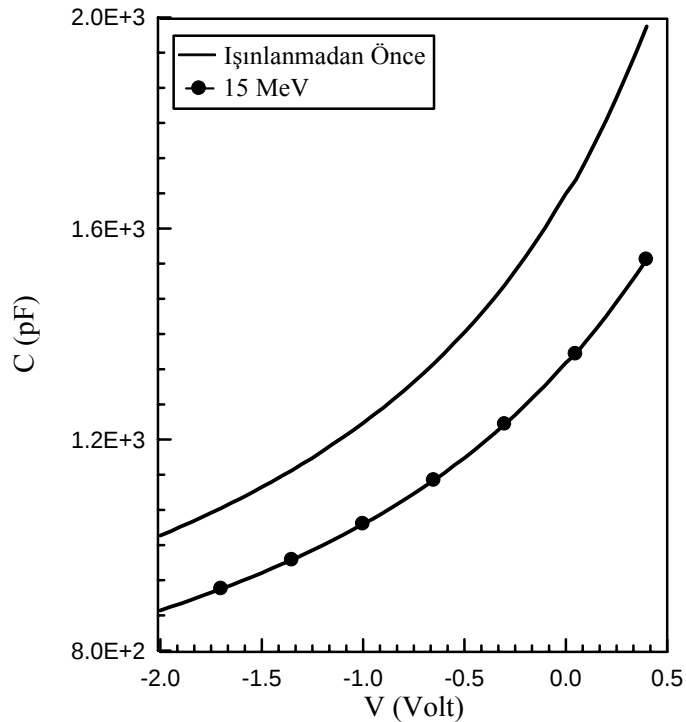
4.2.3. 15 MeV ışınlama

Ni/n-4H-SiC ve Ni/n-6H-SiC Schottky kontaklar Siemens-Primus marka lineer elektron hızlandırıcıyla 15 MeV’de ışınlandı. Numunelerin Schottky yüzeyi $1 \times 10^{12} \text{ ecm}^{-2}$ düşük dozda yaklaşık 300 sn süreyle radyasyona maruz bırakıldı. Radyasyona maruz bırakma işleminden hemen sonra numunelerin doğrultucu davranışındaki olası değişimleri incelemek için numunelerin I - V ve C - V ölçümleri alındı. Işınlanan numunelerin I - V ölçümlerinden idealite faktörü, engel yüksekliği değişim incelendi. C - V ölçümlerinden ise difüzyon potansiyeli, Fermi enerji seviyesi ve donör konsantrasyonu incelendi. 15 MeV’de ışınlanan Ni/n-4H-SiC diyodunun idealite faktörü 1,85, engel yüksekliği 0,77 eV, donör konsantrasyonu $1.70 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, difüzyon potansiyeli 1,45 eV ve Fermi enerji

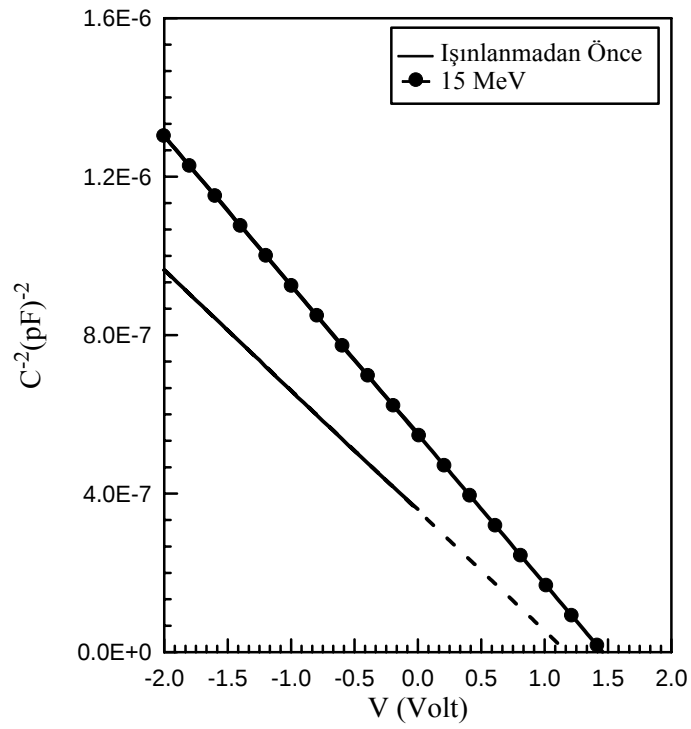
seviyesi ise 0,238 eV bulundu. Şekil 4.21, 22 ve 23, 15 MeV’de ışınlanan Ni/n-4H-SiC diyodunun I - V , C - V ve $1/C^2$ - V grafiğini göstermektedir.



Şekil 4.21. 15 MeV’de Ni/n-4H-SiC diyodunun I - V grafiği

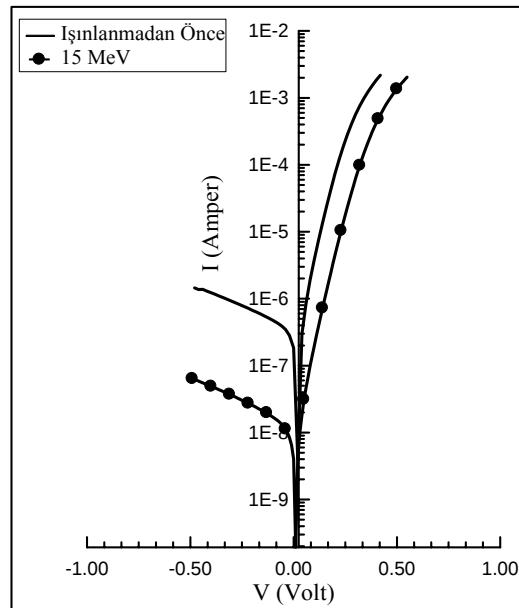


Şekil 4.22. 15 MeV’de ışınlanan Ni/n-4H-SiC diyodunun $f=50$ kHz’de C - V grafiği

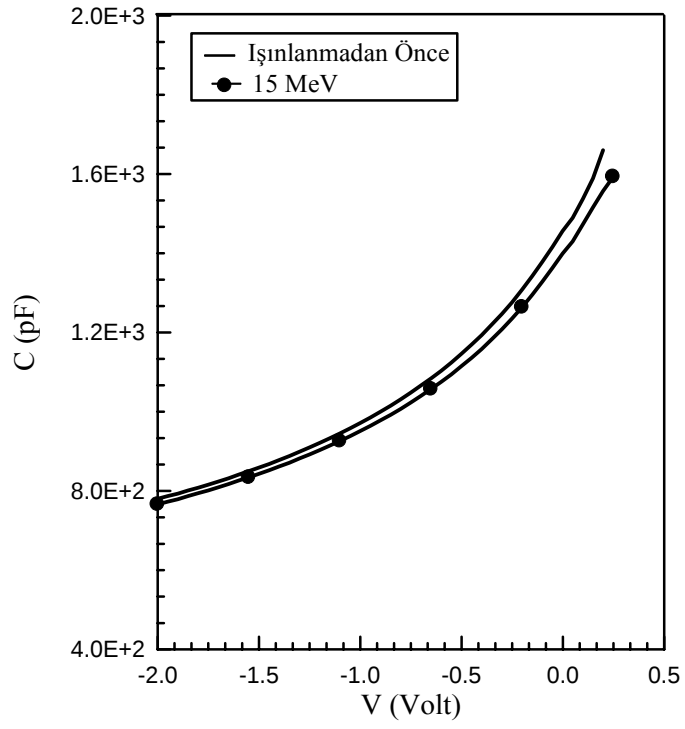


Şekil 4.23. 15 MeV’de ışınlanan Ni/n-4H-SiC diyodunun 50 kHz’de $1/C^2$ -V grafiği

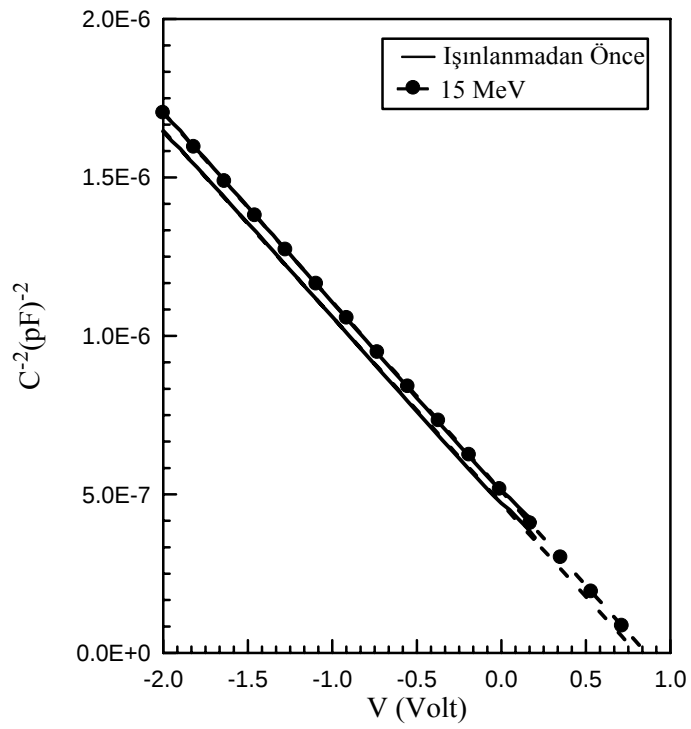
Şekil 4.24, 25 ve 26, 15 MeV’de ışınlanan Ni/n-6H-SiC diyodunun I -V, C -V ve $1/C^2$ -V grafiğini göstermektedir.



Şekil 4.24. 15 MeV’de ışınlanan Ni/n-6H-SiC diyodunun I -V grafiği



Şekil 4.25. Ni/n-6H-SiC $f=50$ kHz’de C-V grafiği

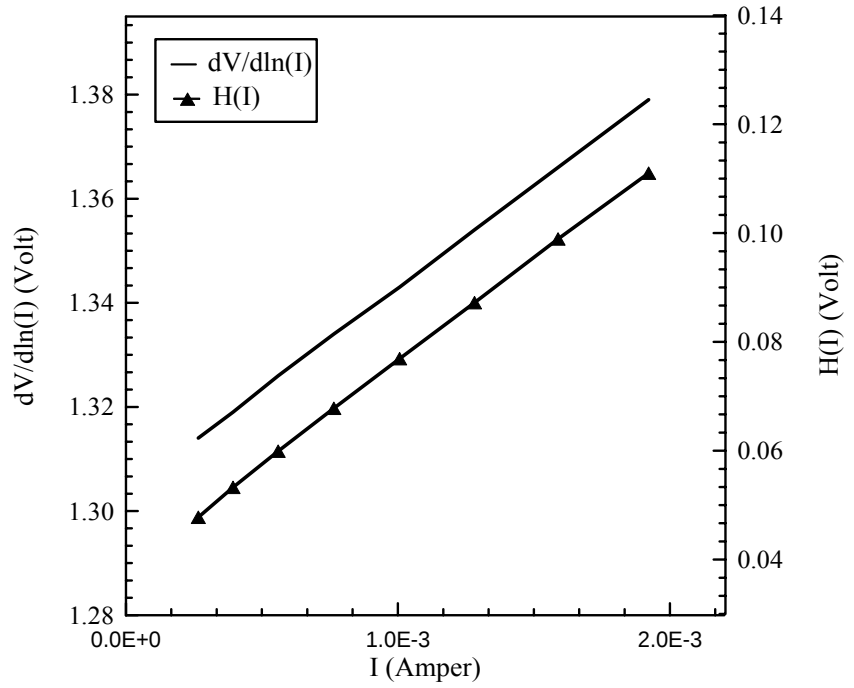


Şekil 4.26. Ni/n-6H-SiC $f=50$ kHz’de $1/C^2$ -V grafiği

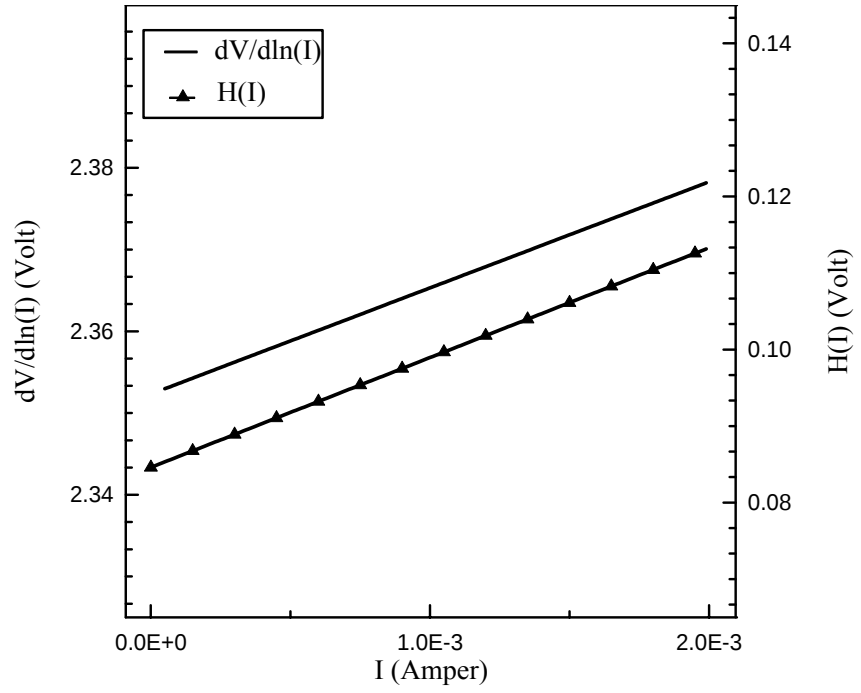
15 MeV’de ışınlanan Ni/n-6H-SiC diyotunun idealite faktörü 1,29, engel yüksekliği 0,73 eV, donör konsantrasyonu $1,05 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, difüzyon potansiyeli 0,89 eV ve Fermi enerji seviyesi ise 0,296 eV olarak bulundu.

4.3. Cheung Fonksiyonları Kullanılarak Elde Edilen Seri Direnç Hesaplamaları

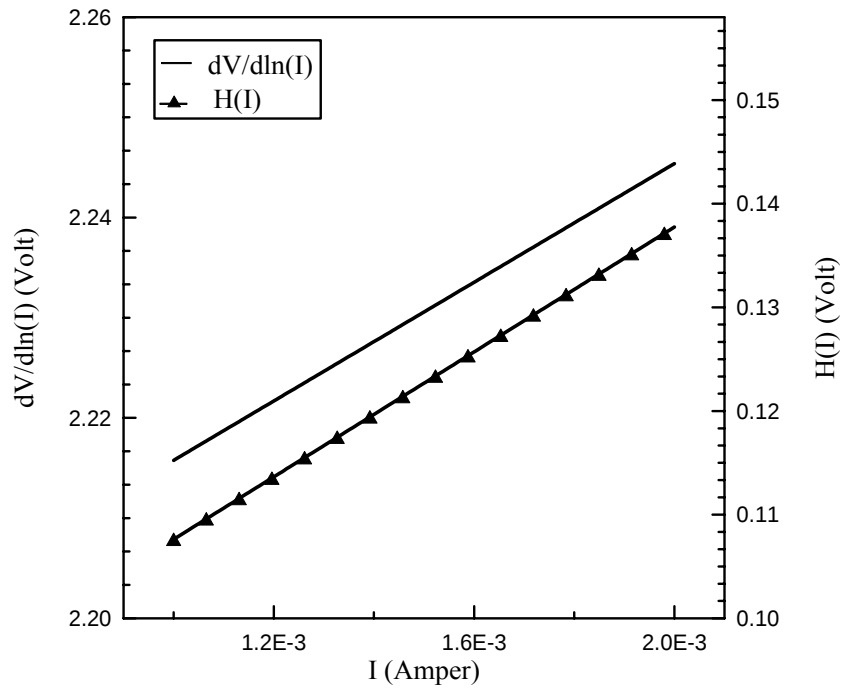
Şekil 4.27, 28, 29, 30 Ni/n-4H-SiC diyodunun ışınlanmadan önce ve sonra $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ ’nın I ’ya karşı değişimini göstermektedir. $dV/d\ln(I)$ ’nın I ’ya karşı değişiminden seri direnç ve idealite faktörü belirlenirken, $H(I)$ ’nın I ’ya karşı değişiminden de yine engel yüksekliği ve seri direnç değerleri her bir ışınlama işlemi sonrasında hesaplanmıştır.



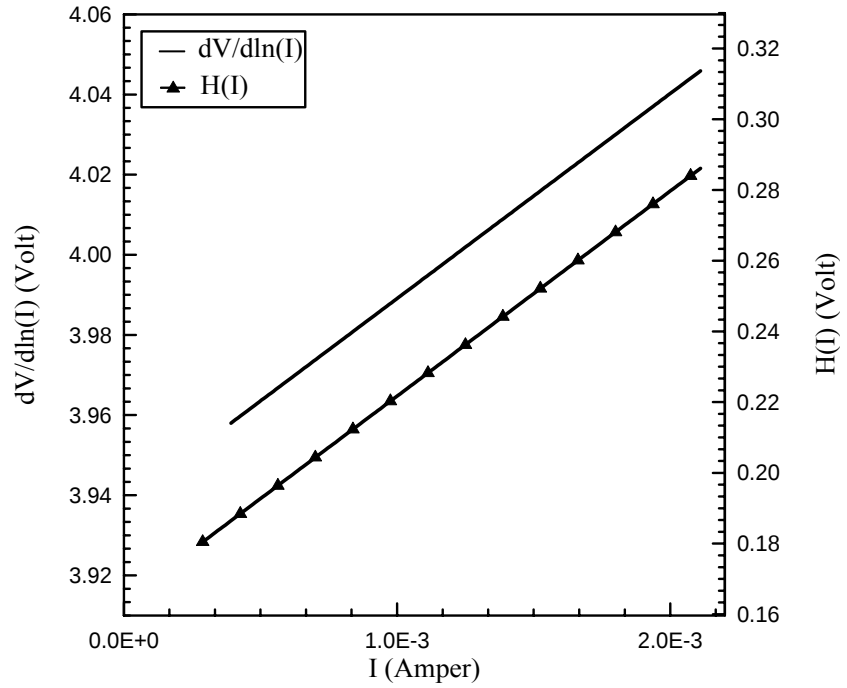
Şekil 4.27. Işınlanma öncesi Au/Ni/n-4H-SiC diyodunun $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ ’nın I ’ya karşı değişimi



Şekil 4.28. 6 MeV’de Ni/n-4H-SiC diyodunun $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ ’nın I ’ya karşı değişimi



Şekil 4.29. 12 MeV’de Ni/n-4H-SiC diyodunun $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ ’nın I ’ya karşı değişimi



Şekil 4.30. 15 MeV’de Ni/n-4H-SiC diyodunun $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ ’nin I ’ya karşı değişimi

Radyasyon öncesi Ni/n-4H-SiC diyodunun idealite faktörü 2,39 ve engel yüksekliği 0,765 eV olarak belirlenirken seri direnç değeri $dV/d\ln(I)$ ’nın I ’ya karşı değişiminden 42,27 Ω , $H(I)$ ’nin I ya karşı değişiminden ise 44,39 Ω olarak hesaplanmıştır. Çizelge 4.3 ve 4.4’de görüldüğü gibi artan ışınlama enerjisiyle idealite faktörü, seri direnç değerleri ve engel yüksekliği değişiklik göstermiştir.

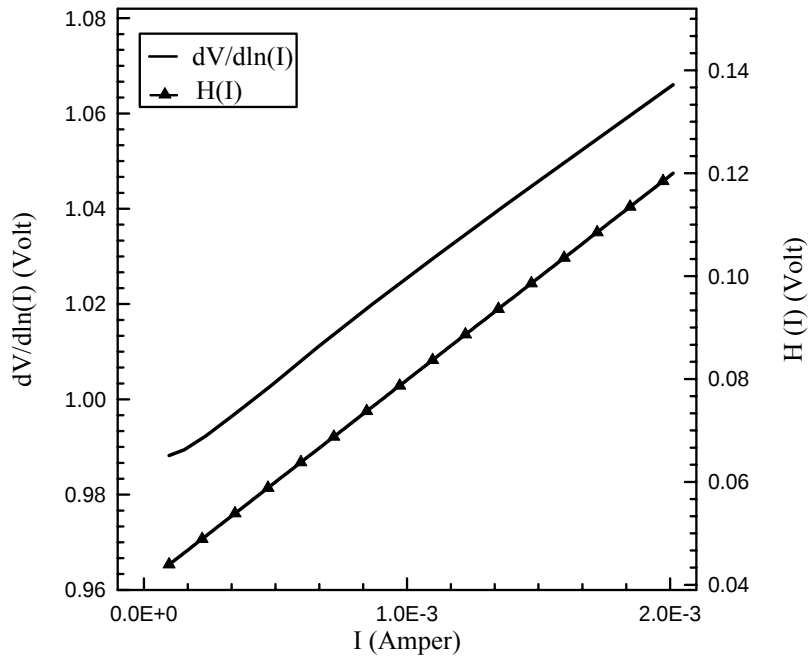
Çizelge 4.3. Ni/n-4H-SiC diyodunun $dV/d\ln(I)$ ’nin I ’ya karşı değişiminden elde edilen seri direnç ve idealite faktörünün değerleri

İşlem	$R_s(\Omega)$	n
Radyasyon Öncesi	42,27	2,39
6 MeV Radyasyon sonrası	14,34	3,26
12 MeV Radyasyon Sonrası	30,12	2,99
15 MeV Radyasyon sonrası	57,96	6,32

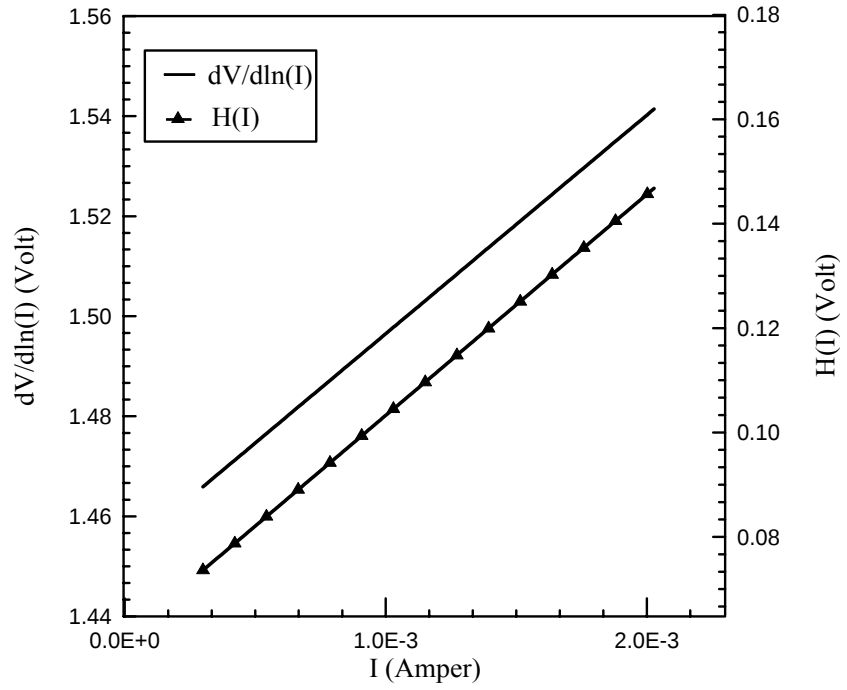
Çizelge 4.4. Ni/n-4H-SiC diyodunun $H(I)$ 'nın I 'ya karşı değişimi ile elde edilen seri direnç ve engel yüksekliği değerleri

İşlem	$\Phi_b(\text{eV})$	$R_s(\Omega)$
Radyasyon Öncesi	0,765	44,39
6 MeV Radyasyon sonrası	0,720	13,16
12 MeV Radyasyon Sonrası	0,730	29,61
15 MeV Radyasyon sonrası	0,622	51,13

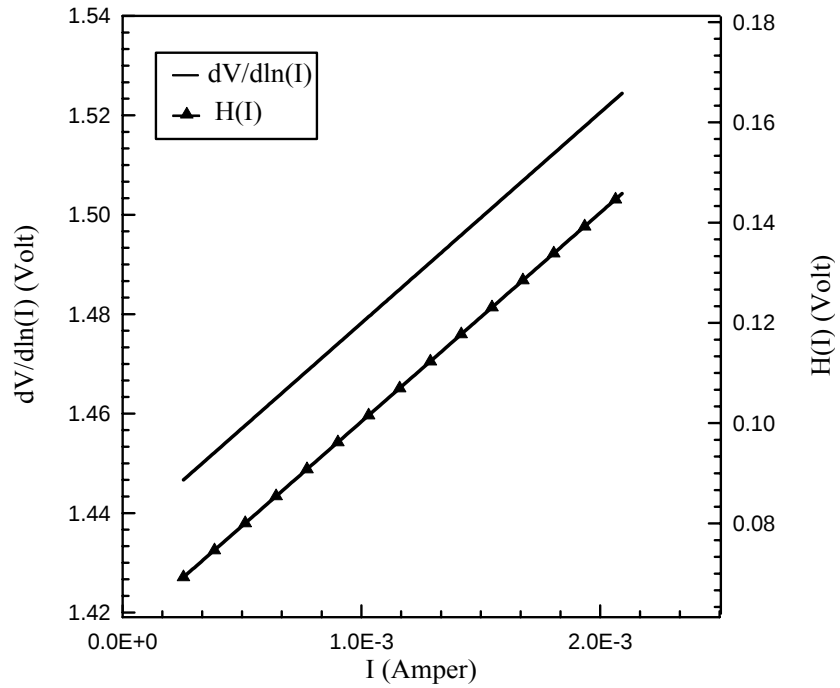
Şekil 4.31, 32, 33, 34 Ni/n-6H-SiC diyodunun ışınlanmadan önce ve sonra $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ 'nın I 'ya karşı değişimini göstermektedir. $dV/d\ln(I)$ 'nın I 'ya karşı değişiminden seri direnç ve idealite faktörü belirlenirken, $H(I)$ 'nın I 'ya karşı değişiminden de yine engel yüksekliği ve seri direnç değeri hesaplandı.



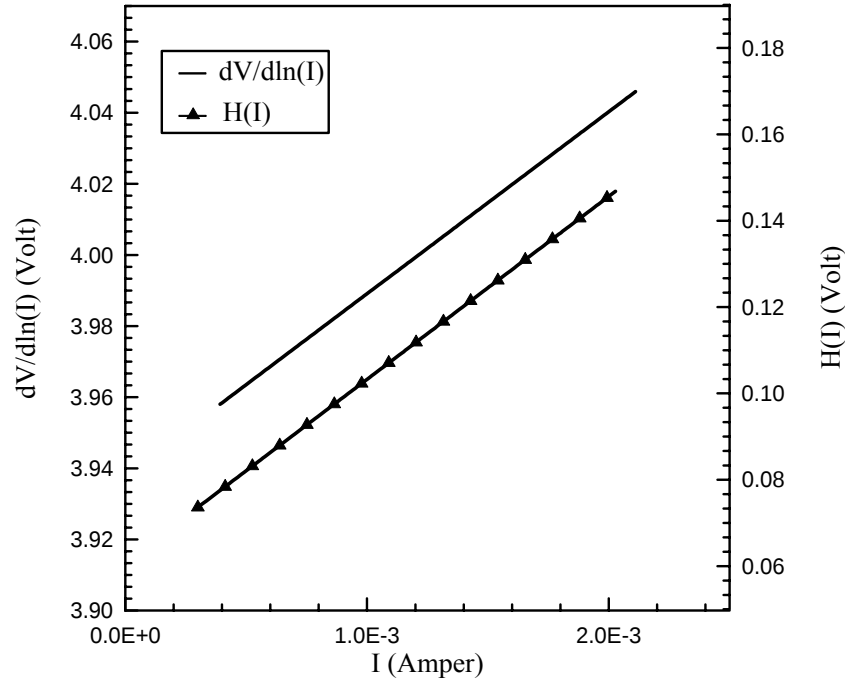
Şekil 4.31. Işınlanmadan önce Ni/n-6H-SiC diyodunun $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ 'nın I 'ya karşı değişimi



Şekil 4.32. 6 MeV’de Ni/n-6H-SiC diyodunun $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ ’nin I ’ya karşı değişimi



Şekil 4.33. 12 MeV’de Ni/n-6H-SiC diyodunun $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ ’nin I ’ya karşı değişimi



Şekil 4.34. 15 MeV’de Ni/n-6H-SiC diyodunun $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ ’nın I ’ya karşı değişimi

Işınlanmadan önce Ni/n-6H-SiC diyodunun idealite faktörü 1,54 olarak hesaplandı. Işınlama enerjisinin artmasıyla idealite faktörünün arttığı gözlemlendi. 15 MeV’de ışılandıktan sonra Ni/n-6H-SiC diyodunun idealite faktörü 1,87 olarak belirlendi. Çizelge 4.5 ve 6 Ni/n-6H-SiC diyodunun ışınlanmadan önce ve sonra $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ ’nın I ’ya karşı değişiminden hesaplanan değerleri göstermektedir. Işınlanmadan önce Ni/n-6H-SiC diyodunun seri direnç değeri $dV/d\ln(I)$ ’nın I ’ya karşı değişiminden 39,68 Ω olarak hesaplanırken, $H(I)$ ’nın I ’ya karşı değişiminden 41,45 olarak hesaplandı. Artan ışınlama enerjisiyle seri direnç değerlerinde de artış gözlemlendi. Ni/n-6H-SiC diyodunun $H(I)$ ’nın I ’ya karşı değişimi ile elde edilen engel yüksekliği değeri ışınlanmadan önce 0,634 eV olarak hesaplanırken, 15 MeV’de ışınlamadan sonra 0,667 eV olduğu hesaplandı. Artan ışınlama enerjisiyle Ni/n-6H-SiC diyodunun engel yüksekliğinin de arttığı gözlemlendi.

Çizelge 4.5. Ni/n-6H-SiC diyodunun $dV/d\ln(I)$ 'nın I 'ya karşı değişimi ile elde edilen seri direnç ve idealite faktörünün değerleri

İşlem	$R_s(\Omega)$	n
Radyasyon Öncesi	39,68	1,54
6 MeV Radyasyon sonrası	42,33	2,35
12 MeV Radyasyon Sonrası	40,64	2,29
15 MeV Radyasyon sonrası	43,85	1,87

Çizelge 4.6. Ni/n-6H-SiC diyodunun $H(I)$ 'nın I 'ya karşı değişimi ile elde edilen seri direnç ve engel yüksekliği değerleri

İşlem	$\Phi_b(eV)$	$R_s(\Omega)$
Radyasyon Öncesi	0,634	41,45
6 MeV Radyasyon sonrası	0,617	43,67
12 MeV Radyasyon Sonrası	0,626	42,32
15 MeV Radyasyon sonrası	0,667	45,10

Işınlanma enerjisinin artması görüldüğü gibi Ni/n-4H-SiC ve Ni/n-6H-SiC Schottky diyotlarının seri direnç değerini artırır. Işınlanma enerjisinin artmasıyla mobilitenin ve serbest taşıyıcı konsantrasyonunun azaldığı görülmektedir. Mobilitedeki bu azalmanın sebebi ışınlanmadan sonra kusur merkezleri oluşmasından kaynaklanır. Yerdeğiştirme zararının etkisiyle malzemede derin tuzaklar oluşur ve bu da serbest taşıyıcı konsantrasyonunu azaltır. Bu da malzemenin direncinin artmasına neden olur (Pattabi *et al.* 2007 ve Jayavel *et al.* 1999).

5. SONUÇ ve TARTIŞMA

5.1 Giriş

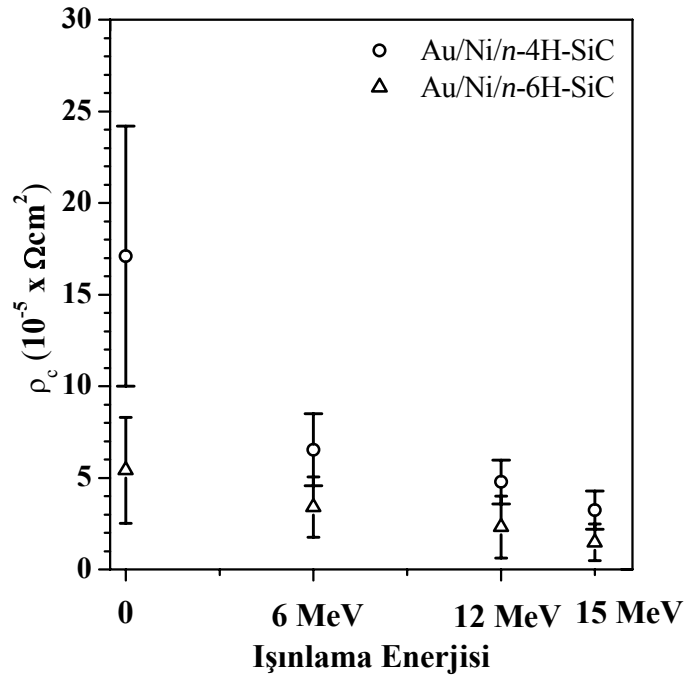
Bu çalışmada radyasyon, sıcaklık, basınç ve aşınma gibi kötü çevre şartlarına dayanıklı olarak bildirilen geniş bant aralığına sahip SiC yarıiletken taban malzeme üzerine omik ve Schottky kontaklar yapılarak yüksek enerjili elektron radyasyonuna karşı dayanıklılığı incelenmiştir (Masri 2002). Ayrıca SiC'in iki politipi olan 4H ve 6H kullanılarak elektron radyasyonuna karşı dayanıklılığı karşılaştırılmıştır. *n*-tipi 4H-SiC ve 6H-SiC altlık malzemeler üzerine omik ve Schottky kontak oluşturmak için 5N saflıkta Ni metali kullanıldı. Omik kontağa ve Shottky kontağın omik tarafına oksitlenmeyi engellemek için ise 5N saflıkta Au metali kullanıldı.

Araştırma için radyasyon kaynağı olarak elektron radyasyonu tercih edilmiştir. Elektron radyasyonu yarıiletkeni kirletmez ve kontak yüzeyinin her tarafına homojen bir şekilde ışınlama sağlar. Au/Ni/*n*-4H-SiC ve Au/Ni/*n*-6H-SiC kontaklar radyasyona maruz bırakılmadan önce TLM tekniği ile spesifik omik kontak ölçümleri Keithley-487 pikoampermetresi ile *I*-*V* ölçümleri ve HP-4192 A kapasitansmetresi ile de 50 kHz de *C*-*V* ölçümleri yapıldı.

n-4H-SiC ve *n*-6H-SiC numuneler üzerine Schottky ve omik kontaklar oluşturmak için 0.5x0.5 cm² ebatlarında dört numune hazırlandı. Numuneler aynı yonga üzerinden komşu parçalar olarak seçildi. Işınlama esnasında omik kontakların omik tarafı ve Schottky kontakların doğrultucu tarafı elektron huzmesine maruz bırakıldı. Böylece numuneler 6, 12, 15 MeV'lik yüksek enerjilerde 1x10¹² ecm⁻² düşük dozda ışınladı. Her bir ışınlamadan sonra Schottky ve omik kontak ölçümleri alınarak sonuçlar ışınlamadan önce alınan ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırıldı.

5.2 Omik Kontak Ölçümlerinin Tartışılması

Işınlamadan önce Au/Ni/*n*-4H-SiC spesifik omik kontak öz direnç değeri $(17,1 \pm 7,1) \times 10^{-5} \Omega \text{cm}^2$, Au/Ni/*n*-6H-SiC spesifik omik kontak öz direnç değeri ise $(5,41 \pm 2,89) \times 10^{-5} \Omega \text{cm}^2$ olarak hesaplanmıştır. Artan ışınlama enerjisiyle Au/Ni/*n*-4H-SiC ve Au/Ni/*n*-6H-SiC omik kontakların spesifik öz direnç değerlerinde azalma gözlenmiştir. Bu değerler literatürde belirtilen değerlerle benzerlik göstermektedir. Lee ve Chang'de 4H-SiC ve 6H-SiC için sırasıyla omik kontak öz direnç değerinin 10^{-4} - $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Bu durum 6, 12, 15 MeV'lik enerjilerle uygulanan elektron ışın demetinin numuneyle temasında, elektronların metal atomlarıyla çarpışarak taban malzemeye daha çok nüfuz etmeleriyle açıklanabilir. Çarpışmalar sonucunda oluşan sıcaklık nedeniyle kontak bölgesinde tavlama etkisi yaptığı belirlenmiştir.



Şekil 5.1. Işınlanmadan önce ve sonra Au/*n*-4H-SiC ve Au/*n*-6H-SiC omik kontaklarının öz direnç değişimi

5.3 Schottky Kontak Ölçümlerinin Tartışılması

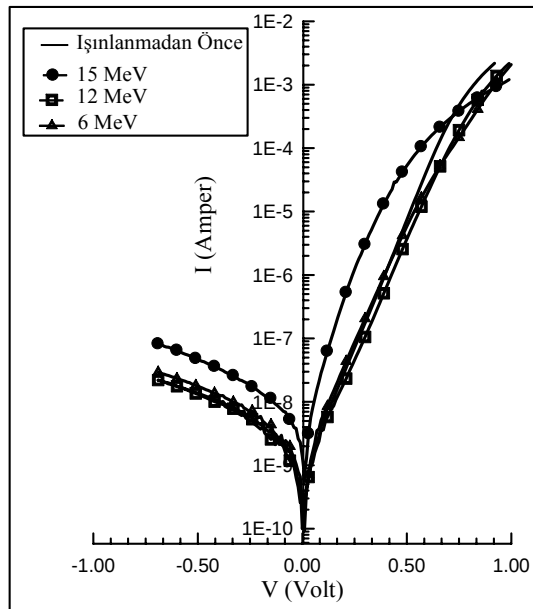
Ni/n-4H-SiC ve Ni/n-6H-SiC Schottky diyodlarının idealite faktörü ışınlanmadan önce sırasıyla 1,55 ve 1,12 olarak hesaplandı. Işınlanmadan önce Ni/n-4H-SiC ve Ni/n-6H-SiC Schottky diyodlarının engel yüksekliği ise sırasıyla 0,809 eV ve 0,656 eV olarak belirlendi. Radyasyon öncesi Schottky diyotların donör konsantrasyonları da $2,12 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ve $1,096 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ olarak belirlenirken, diyotların difüzyon potansiyeli ise sırasıyla 1,17 eV ve 0,78 eV olarak bulundu. Ni/n-4H-SiC ve Ni/n-6H-SiC Schottky diyodlarının Fermi enerji seviyeleri ise sırasıyla 0,232 eV ve 0,293 eV olarak bulundu. Ni/n-4H-SiC ve Ni/n-6H-SiC numunelerin 6, 12, 15 MeV'lik yüksek radyasyon enerjisiyle ışınlanmadan sonra idealite faktörü, Fermi enerji seviyesi, difüzyon potansiyeli ve donör konsantrasyonundaki değişim Çizelge 5.1 ve 5.2'de verilmiştir. Çizelge 5.1 ve 2'de elde edilen parametrelerin hesaplanmasında, 4H-SiC için Richardson sabiti (A^*) $146 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$ (Zhang *et al.* 2002) ve 6H-SiC için $156 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$ (Im *et al.* 2001) olarak alınmıştır. 4H-SiC için hal yoğunluğu $N_c = 1,7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 6H-SiC için hal yoğunluğu $N_c = 8,9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ olarak alınmıştır.

Çizelge 5.1. Işınlamalar sonucu elde edilen Ni/n-4H-SiC için Schottky kontak değerleri

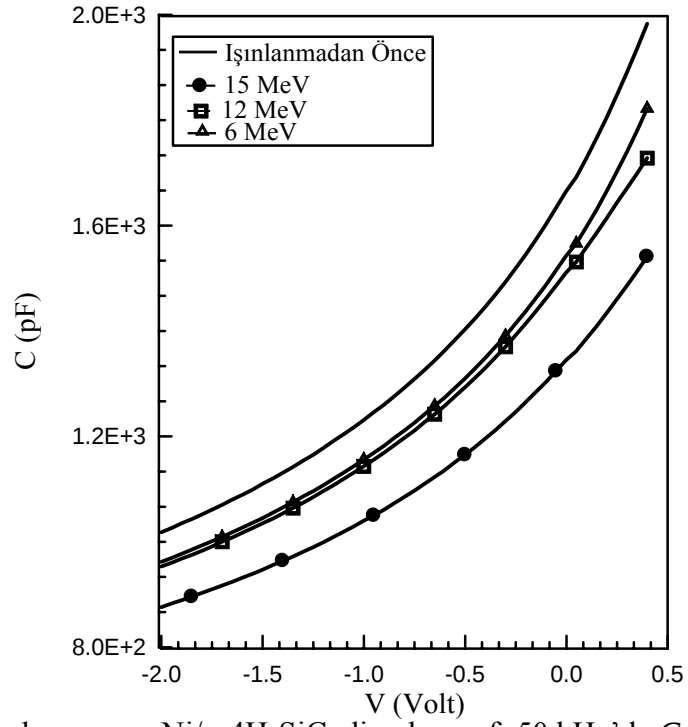
İşlem	Φ_b (eV)	n	N_d (cm^{-3})	V_{dif} (eV)	E_f (eV)
Radyasyon Öncesi	0,809	1,558	$2,12 \times 10^{15}$	1,17	0,232
6 MeV Radyasyon sonrası	0,798	1,586	$1,94 \times 10^{15}$	1,25	0,235
12 MeV Radyasyon sonrası	0,806	1,809	$1,92 \times 10^{15}$	1,29	0,235
15 MeV Radyasyon sonrası	0,777	1,859	$1,7 \times 10^{15}$	1,45	0,238

Çizelge 5.1'de görüldüğü gibi Schottky diyot parametreleri ışınlamayla değişiklik göstermektedir. Artan ışınlama enerjisi Ni/n-4H-SiC diyodunun idealite faktörünü artırdığı görülmektedir. Engel yüksekliği Ni/n-4H-SiC Schottky diyodun engel yüksekliği hemen hemen değişiklik göstermediği anlaşılmaktadır. Donör konsantrasyonunun 6, 12, 15 MeV'lik radyasyon sonrası Ni/n-4H-SiC Schottky diyot için azaldığı görülmektedir. Kazukauskas *et al.* 4H-SiC'deki donör konsantrasyonundaki bu azalmanın ışınlamayla malzemenin kristal yapısının

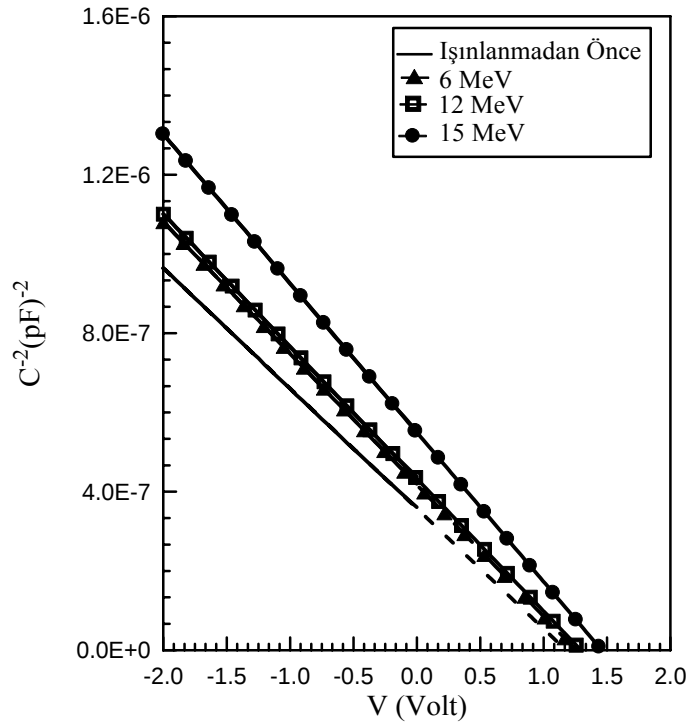
değiştiğini belirtmişlerdir. Ni/*n*-4H-SiC Schottky diyot için difüzyon potansiyeli artan ışınlama enerjisiyle arttığı görülmektedir. Ni/*n*-4H-SiC Schottky diodunun Fermi enerji seviyesi radyasyon sonrası artış göstermiştir. Şekil 5.2, 5.3 ve 5.4 Ni/*n*-4H-SiC Schottky diodunun *I*-*V*, *C*-*V* ve *1/C*²-*V* grafiklerini göstermektedir. Şekil 5.2’de görüldüğü gibi Ni/*n*-4H-SiC diodunun artan ışınlama enerjisiyle ters beslem akımının arttığı gözlenmiştir. Şekilde görüldüğü gibi Ni/*n*-4H-SiC diodu 6, 12 MeV’lik ışınlama enerjisi ters beslem akımı pek fazla değişmezken, 15 MeV’de artmıştır. Ters beslem akımının artmasının sebebi; radyasyon sonucu oluşan örgü kusurları nedeniyle bulk deplasyon bölgesinde taşıyıcılarının oluşmasındandır (Krishnan *et al.* 2008). Şekil 5.3 grafiğinden de görüldüğü gibi artan ışınlama enerjisiyle kapasite değeri azalmıştır. Donor konsantrasyonunun azalmasının nedeni yüksek enerjili elektronların ışınlaması ile meydana gelen tuzaklarla açıklanabilir. Arayüzeyde oluşan tuzaklar arayüzeydeki serbest donörleri telafi ederek azaltır. Difüzyon potansiyelinin artan ışınlama enerjisiyle artığı Şekil 5.4’te görülmektedir.



Şekil 5.2. Işınlamalar sonucu elde edilen Ni/*n*-4H-SiC diodunun *I*-*V* grafiği



Şekil 5.3. Işınlamalar sonucu Ni/n-4H-SiC diyodunun $f=50$ kHz’de C-V grafiği



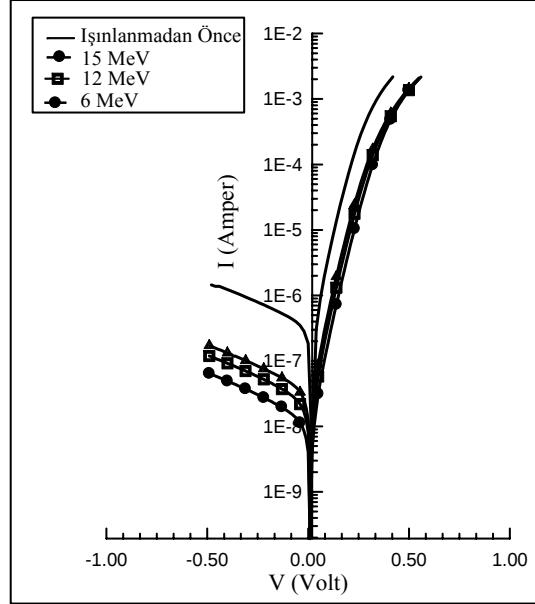
Şekil 5.4. Işınlamalar sonucu elde edilen Ni/n-4H-SiC diyodunun 50 kHz’de $1/C^2$ ’nin V ’ye karşı değişimi

Çizelge 5.2. Işınlamalar sonucu elde edilen Ni/*n*-6H-SiC için Schottky kontak değerleri

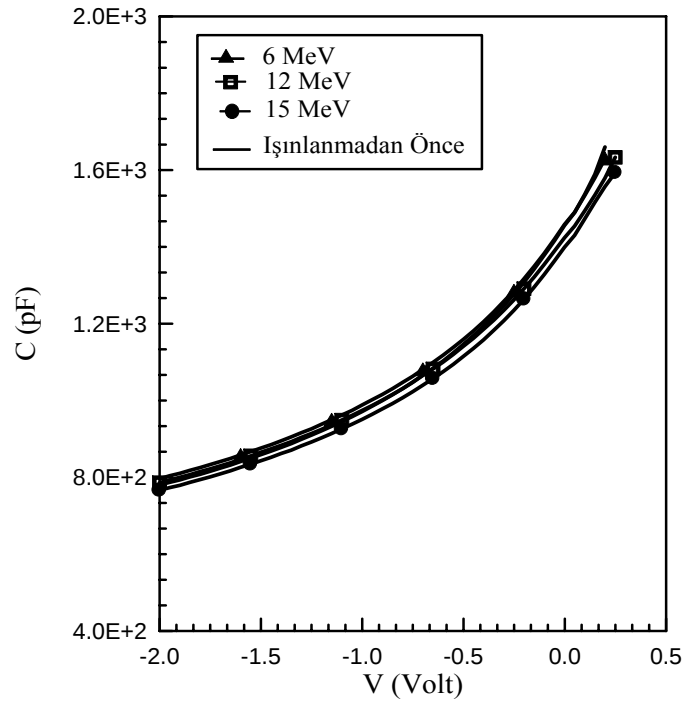
İşlem	Φ_b (eV)	n	N_d (cm ⁻³)	V_{dif} (eV)	E_f (eV)
Radyasyon Öncesi	0,656	1,125	$1,096 \times 10^{15}$	0,78	0,293
6 MeV Radyasyon sonrası	0,708	1,257	$1,094 \times 10^{15}$	0,83	0,289
12 MeV Radyasyon sonrası	0,716	1,274	$1,069 \times 10^{15}$	0,87	0,296
15 MeV Radyasyon sonrası	0,730	1,295	$1,052 \times 10^{15}$	0,89	0,296

Çizelge 5.2’de görüldüğü gibi Schottky diyot parametreleri ışınlamayla değişiklik göstermiştir. Işınlama enerjisinin artmasıyla hem Ni/*n*-4H-SiC hem de Ni/*n*-6H-SiC Schottky diyodlarının idealite faktörünün arttığı görülmektedir. İdealite faktörünün artması, akım taşınma mekanizmasının termoiyonik emisyon teorisinden sapmasıyla açıklanır. Işınlamayla arayüzeyde kusurlar oluşmaktadır. Arayüzeydeki bu kusurlar, tuzaklar ve rekombinasyon merkezleri olarak davranırlar. Arayüzeydeki bu homojensizlik idealite faktörünü artırır. İdealite faktörünün artması imaj kuvvet etkisi, rekombinasyon, oluşum ve tünelleme gibi sebeplerden kaynaklandığı ifade edilmektedir (Krishnan *et al.* 2008 ve Güllü *et al.* 2008). Ni/*n*-6H-SiC Schottky diyodunun donör konsantrasyonu da Ni/*n*-4H-SiC Schottky diyodunun donör konsantrasyonu gibi ışınlamayla azaldığı görülmektedir. Fakat Ni/*n*-4H-SiC Schottky diyodunun donör konsantrasyonu radyasyonla daha fazla azalma göstermektedir. Bunun sebebi 4H-SiC, 6H-SiC’den daha fazla taşıyıcılar tuzaklanmasıyla açıklanabilir. Difüzyon potansiyeli 6, 12, 15 MeV’lik radyasyon sonrası Ni/*n*-4H-SiC ve Ni/*n*-6H-SiC Schottky diyot için artış göstermiştir. Ni/*n*-6H-SiC Schottky diyodunun Fermi enerji seviyesi radyasyon sonrası artış göstermiştir. Şekil 5.5, 6 ve 7 Ni/*n*-6H-SiC Schottky diyodunun *I-V*, *C-V* ve $1/C^2-V$ grafiklerini göstermektedir. Şekil 5.5’de görüldüğü gibi Ni/*n*-6H-SiC diyodunun artan ışınlama enerjisiyle ters beslem akımının azaldığı gözlenmektedir. Işınlamayla ters beslem akımının azalmasının sebebi, ışınlama sonucu oluşan derin seviyeler rekombinasyon merkezleri olarak davranır (Güllü *et al.* 2008). Şekil 5.6 grafiğinden de görüldüğü gibi artan ışınlama enerjisiyle kapasite değeri azalmıştır. Ni/*n*-4H-SiC ve Ni/*n*-6H-SiC Schottky diyodlarda artan ışınlama enerjisiyle kapasitenin azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi yarıiletken yüzeyde etkin katkı seviyesinin azalmasıyla açıklanabilir. Işınlamayla tuzaklar oluşur ve bu tuzaklar yarıiletkenin serbest taşıyıcı

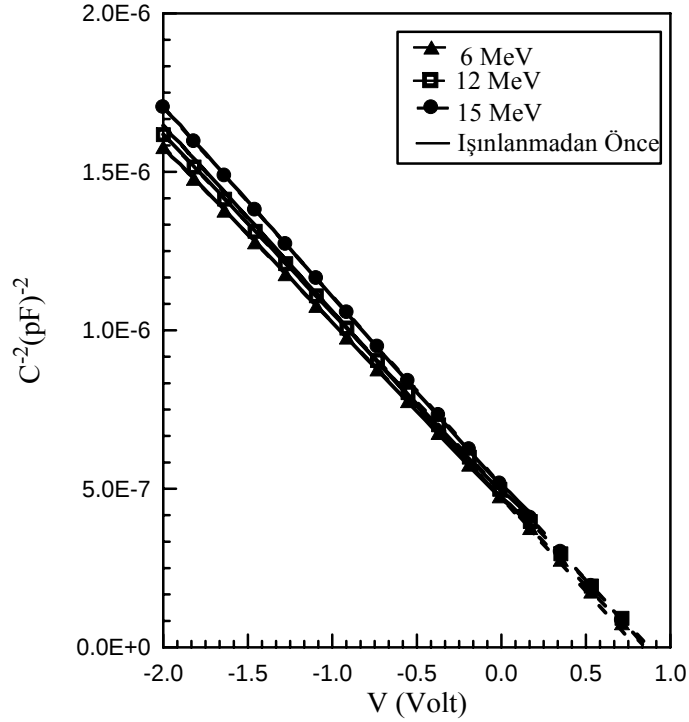
yoğunluğunu azaltır. Kapasitedeki bu azalma arayüzeydeki dielektrik sabitinin değişimine neden olduğu ifade deilmektedir (Sumathi *et al.* 2001).



Şekil 5.5. Işınlamalar sonucu elde edilen Ni/n-6H-SiC diyodunun I - V grafiği

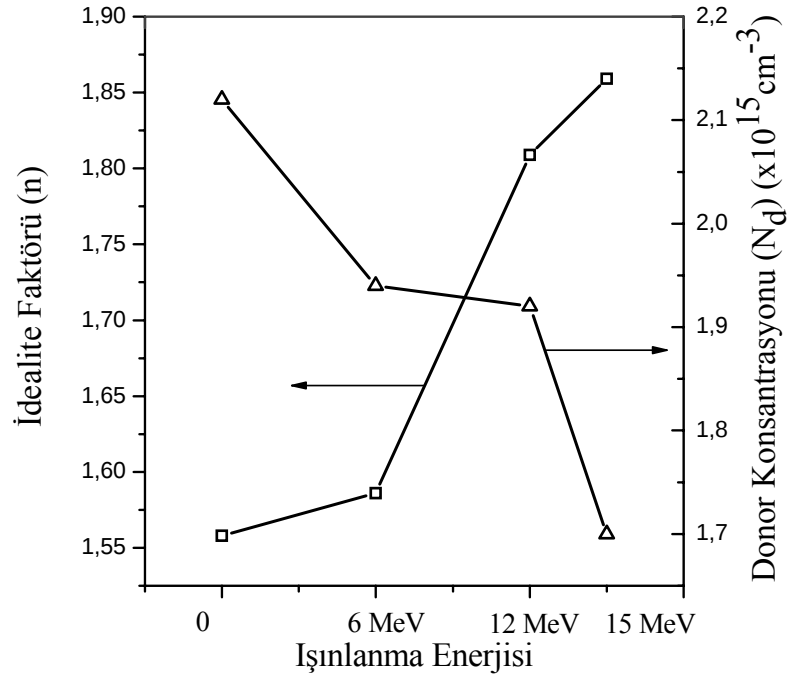


Şekil 5.6. Işınlamalar sonucu elde edilen Ni/n-6H-SiC diyodunun 50 kHz'de C - V grafiği

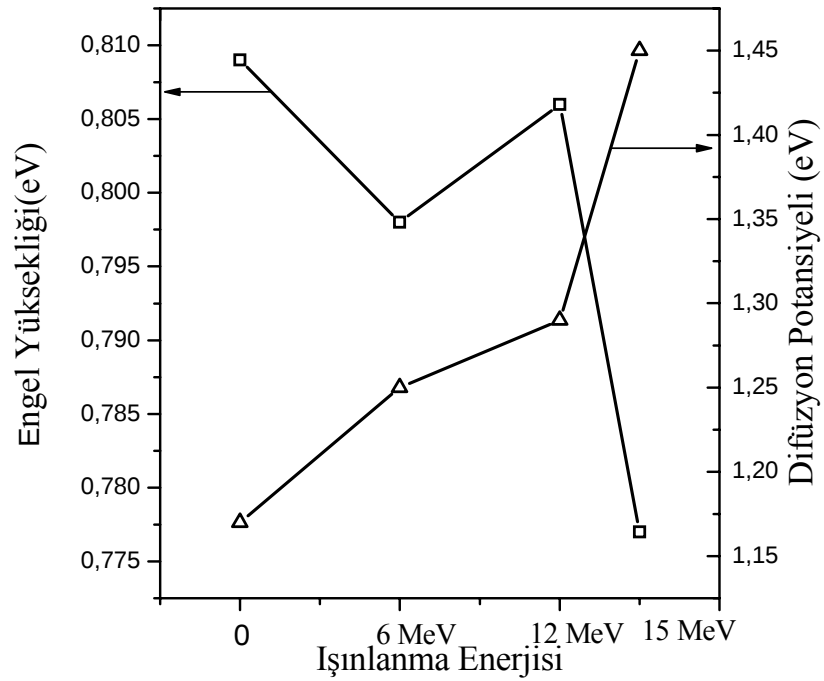


Şekil 5.7. Işınlamalar sonucu elde edilen Ni/n-6H-SiC diyodunun 50 kHz’de $1/C^2$ ’nin V ’ye karşı değişimi

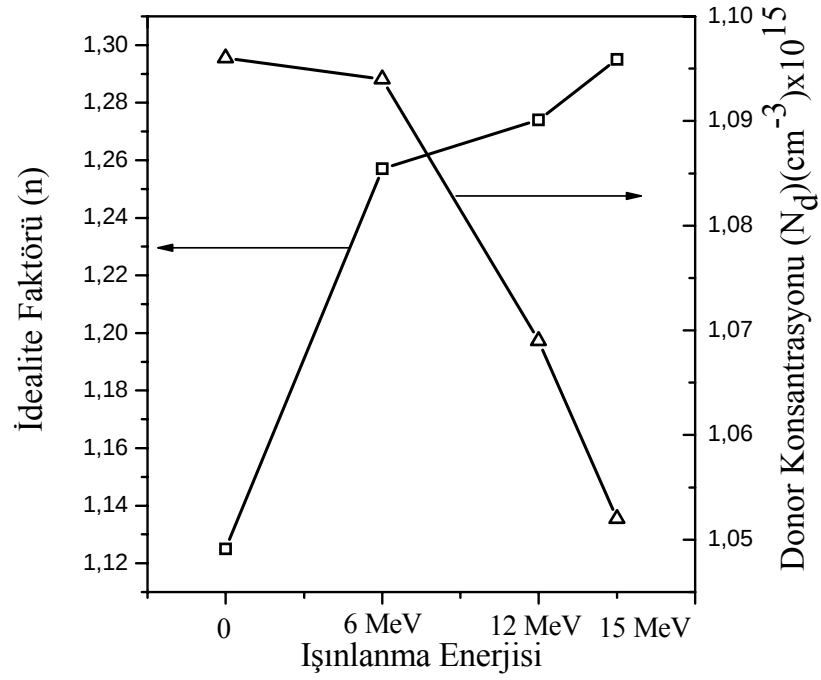
Şekil 5.8 Ni/n-4H-SiC Schottky diyodunun idealite faktörü ve donör konsantrasyonuna bağlı değişimini göstermektedir. Işınlama enerjisinin artmasıyla idealite faktörü artarken donör konsantrasyonu azaldığı görülmektedir. Şekil 5.9’da görüldüğü gibi Ni/n-4H-SiC Schottky diyodunun engel yüksekliği pek fazla değişiklik göstermezken difüzyon potansiyeli ışınlama enerjisiyle arttığı gözlenmiştir. Şekil 5.10 Ni/n-6H-SiC Schottky diyodunun idealite faktörü ve donör konsantrasyonunun ışınlama enerjisiyle değişimini göstermektedir. Şekil 5.11 Ni/n-6H-SiC Schottky diyodunun engel yüksekliği ve difüzyon potansiyeline bağlı değişimini göstermektedir. Işınlama enerjisiyle idealite faktörü artarken donör konsantrasyonu azalmıştır. Diyodun idealite faktörünün artması diyodun ideallikten sapmasıyla açıklanır.



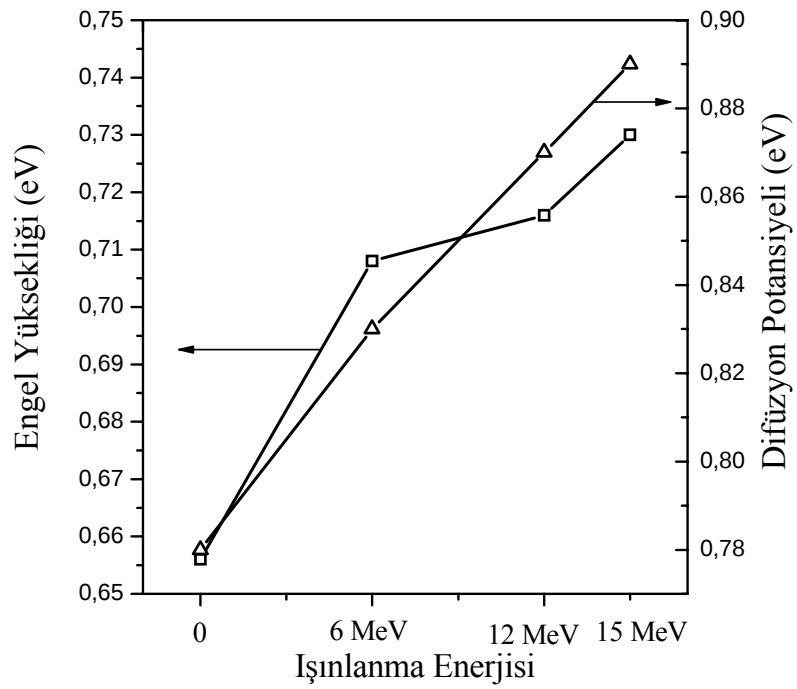
Şekil 5.8 Ni/n-4H-SiC kontağının olay sayısına karşılık idealite faktörü ve donör konsantrasyonunun değişimi



Şekil 5.9. Ni/n-4H-SiC kontağının olay sayısına karşılık engel yüksekliği ve difüzyon potansiyelinin değişimi



Şekil 5.10. Ni/n-6H-SiC kontağının olay sayısına karşılık idealite faktörü ve donör konsantrasyonunun değişimi



Şekil 5.11. Ni/n-6H-SiC diyodunun olay sayısına karşılık engel yüksekliği ve difüzyon potansiyelinin değişimi

KAYNAKLAR

- Abeolfotoh, M. O., Fröjdh, C. and Petersson, C. S., 2003. Schottky-barrier behaviour of metals on n- and p-type 6H-SiC. *Physical Review B*, 67, 075312.
- Aydoğan, S., 2003. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Basak, D., Mahanty, S., 2003. Ti/Ni/Ti/Au ohmic contact to n-type 6H-SiC. *Materials. Science & Engineering B*, 98, 177-180.
- Chang, Shu-Cheng., Wang, Shui-Jinn., Uang, Kai-Ming., Liou, Bor-Wen., 2005. Investigation of Au/Ti/Al ohmic contact to N-type 4H-SiC. *Solid-State Electronics*, 49, 1937-1941.
- Cheung, S. K., Cheung, N. W., 1986. Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Appl. Phys. Lett.*, 58, 382.
- Coşkun, C., 2006. Radiation Effects in Wide-bandgap Semiconductors., Atatürk Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü.
- Coşkun, C., 2006. The effect of high-energy electron irradiation on ZnO-based ohmic and Schottky contacts. *Semiconductor Science and Technology* 21, 1656-1660.
- Coşkun, C., 2000. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Çetin, H., Şahin, B., Ayyıldız, E., Türüt, A., 2004. Ti/p-Si Schottky barrier diodes with interfacial layer prepared by thermal oxidation. *Physica B*, 364, 133-141.
- Deeb, C. And Heuer, A.H., 2004. A low-temperature route to thermodynamically stable ohmic contacts to n-type 6H-SiC. *Applied Physics letters*, 84, 7.
- Defives, D., Noblanc, O., Dua, C., Brylinski, C., Barthula, M., Meyer, F., 1999. Electrical characterization of inhomogeneous Ti/4H-SiC Schottky contacts. *Materials Science and Engineering B*, 61-62, 395-401.
- Doğan, S., Teke, A., Morkoç, H., 2007. III-V Nitrides and Silicon Carbide as Optoelectronic Materials.
- Gedik, N., 2005. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Goldberg, Yu, Levinshtein, M., and Rumyantsev, S., 2001. The Loffe, St. Petersburg, Russia
- Goesmann, Fred and Schmid-Fetzer, Rainer., 1995. Temperature-dependent interface reactions and electrical contact properties of titanium on 6H-SiC. *Semicond. Sci. Technol.* 10, 1652-1658.
- Gombia, E., Mosca, R., Pal, D., Busi, S., Tarricone, L., Fuochi, P. G., Lavalle, M., 2003. Preparation and characterisation of Au/InGaP/GaAs Schottky barriers for radiation damage investigation. *Materials Science & Engineering B*, 97, 39-45.
- Guy, O. J., Pope, G., Blackwood, I., Teng, K.S., Chen, L., Lee, W. Y., Wilks, S. P. Mawby, P. A., 2004. Creating room temperature Ohmic contacts to 4H-SiC studied by specific contact resistance measurements and X-ray photoelectron spectroscopy. *Surface Science*, 573, 253-263.
- Güllü, Ö., Demir, F., Cimilli, F. E., Biber, M., 2008. γ -Irradiation-induced changes at the electrical characteristics of Sn/p-Si Schottky contacts. *Vacuum Surface Engineering, Surface Instrumentation & Vacuum Technology* 82, 789-793.
- Im, H. -J., Ding, Y., Pelz, J. P., Choyke, W. J., 2001. Nanometer-scale test of the Tung model of Schottky-barrier height inhomogeneity. *Physical Review B*, 64, 075310-9.
- Jayavel, P., Santhakumar, K., Kumar, J., 2002. Studies on proton irradiation induced defects on Ni/n-GaAs Schottky barrier diodes. *Physica B*, 315, 88-95.
- Jayavel, P., Asokan, K., Kanjilal, D., Kumar, J., 2000. Investigations on the annealing behaviour of high-energy carbon irradiated Au/n-GaAs Schottky barrier diodes. *Materials Science in Semiconductor Processing* 3, 195-199.

- Jayavel, P., Udhayasankar, J., Kumar, J., Asokan, K., Kanjilal D., 1999. Electrical characterisation of high energy 12C irradiated Au/n-GaAs Schottky Barrier Diodes. *NIM B Beam Interactions with Materials & Atoms* 156, 110-115.
- Jingyan Zhang and William R. Harrell., 2002. Analysis of the I-V characteristics of Al/4H-SiC Schottky diodes. *J. Vac. Sci. Technol. B* 21(2).
- Kalinina, E. V., Kholuyanov, G. F., Shchukarev, A. V., Savkina, N. S., Babanin, A. I., Yagovkina, M. A., Kuznetsov, N. I., 1999. Pd ohmic contacts to p-SiC 4H, 6H and 15R polytypes. *Diamond and Related Materials*, 8, 1114-1117.
- Karataş, Ş., Türüt, A., 2006. Electrical properties of Sn/p-Si (MS) Schottky barrier diodes to be exposed to ^{60}Co γ -ray source. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A*, 566, 584-589.
- Kazukauskas, V., Jasiulionis, R., Kalendra, V., Vaitkus, J. -V., 2007. Influence of irradiation by 24 GeV protons on the properties of 4H-SiC radiation detectors. *Diamond and Related Materials*, 16, 1058-1061.
- Kim, Ji Hyun., Ren, F., Baca, A. G., Briggs, R. D., Pearton, S. J., 2003. High temperature thermal stability of Au/Ti/WSi_x. *Solid-State Electronics*, 47, 1345-1350.
- Krishnan, S., Sanjeev, G., Pattabi, M., 2008. Electron irradiation effects on Schottky diode characteristics of p-Si. *NIM B Beam Interactions with Materials & Atoms*, 266, 621-624
- Lu, Weijie., Mitchel, W. C., Landis, G.R., Crenshaw, T.R., Eugene Collins, W., 2003. Ohmic contact properties of Ni/C film on 4H-SiC. *Solid-State Electronics*, 47, 20001-2010.
- Marinova, Ts., Kakanakova-Georgieva, A., Krastev, V., Kakanakov, R., Neshev, M., Kassamakova, L., Noblanc, O., Arnodo, C., Cassette, S., Brylinski, C., Pecz, B., Radnoczi, G., Vincze, Gy., 1997. Nichel based ohmic contacts on SiC. *Materials Science & Engineering B*, 46, 223-226.
- Masri, Pierre., 2002. Silicon carbide and silicon carbide –based structures The physics of epitaxy. *Surface Science Reports*, 48, 1-51.
- McDaniel, G. Y., Fenstermaker, S. T. and Lampert, W. V., Holloway, P. H., 2004. Rhenium ohmic contacts 6H-SiC. *Journal of Applied Physics*, 96 (9).
- Morkoç, H., Strite, S., Gao, G.B., Lin, M. E., Sverdlov, B. and Burns, M., 1994. Large-band-gap SiC, III-V nitride, and II-VI ZnSe-based semiconductor device Technologies. *J. Appl. Phys.*, 76(3).
- Moscatelli, F., Scorzoni, A., Poggi, A., Cardinali, G. C. And Nipoti, R., 2003. *Semicond. Sci. Technol.* 18, 554-559.
- Neamen, D. A., 1992. *Semiconductors Physics and Devices*. R. R. Donnelley & Sons Company, Sydney.
- Neyret, E., Cioccio, L. Di., Bluet, J. M., Pernot, J., Vicente, P., Anglos, D., Lagadas, M., Billon, T., 2001. Deposition, evaluation and control of 4H and 6H SiC epitaxial layers for device applications. *Materials Science and Engineering B*, 80, 332-336.
- Nishijima, T., Hearne, S. M., Jamieson, D. N., Ohshima, T., Lee, K. K. and Itoh., 2003. Radiation damage on 6H-SiC Schottky diodes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 210, 196-200.
- Park, Ji-Soo., Reitmeier, Zachary J., Fothergill, Daryl., Zhang, Xiyao., Muth, John F., Davis, Robert F. 2006. Growth and fabrication of AlGaIn-based ultraviolet light emitting diodes on 6H-SiC (0001) substrates and the effect of carrier-blocking layers on their emission characteristics. *Materials Science and Engineering B*, 127, 169-179.
- Pattabi, M., Krishnan, S., Ganesh, Mathew, X. 2007. Effect of temperature and electron irradiation on the I-V characteristics of Au/CdTe Schottky diodes. *Solar Energy*, 81, 111-116.
- Pecz, B., 2001. Contact formation in SiC. *Applied Surface Science* 184, 287-294.

- Perez, R., Mestres, N., Tournier, D., Godignon, P., Millan, J., 2005. Ni/Ti ohmic contacts on 4H-SiC formed with a single thermal treatment. *Diamond and Related materials*, 14.
- Perjeru, F., Woodin, R. L., Kordesch, M. E., 2001. Influence of annealing temperature upon deep levels in 6H SiC. *Physica B*, 308-310, 695-697.
- Pirri, C. F., Ferrero, S., Scaltrito, L., Perrone, D., Guastella, S., Furno, M., Richieri, G., Merlin, L., 2006. Intrinsic 4H-SiC parameters study by temperature behaviour analysis of Schottky diodes. *Microelectronic Engineering*, 83, 86-88.
- Roccaforte, F., La Via, F., Raineri, V., Calcagno, L., Musumeci, P., 2001. Improvement of high temperature stability of nickel contacts on n-type 6H-SiC. *Applied Surface Science*, 184, 295-298.
- Roccaforte, F., Libertino, S., Giannazzo, F., Bongiorno, C., La Via, F., Raineri, V., 2005. Ion irradiation of inhomogeneous Schottky barriers on silicon carbide. *Journal of Applied Physics*, 97, 123502-9.
- Roccarforte, F., Libertino, S. and Raineri, V., Ruggiero, A., Massimino, V. and Calcagno, L., 2006. Defects and electrical behaviour in 1 MeV Si⁺-ion-irradiated 4H-SiC Schottky diodes. *Journal of Applied Physics* 99, 013515.
- Sağlam, M., Cimilli, F. E., Türüt, A., 2003. Experimental determination of the laterally homogeneous barrier height of Au/n-Si Schottky barrier diodes. *Physica B*, 348, 397-403.
- Singh, R., Arora, S. K., Kanjilal, D., 2001. Swift heavy ion irradiation induced modification of electrical characteristics of Au/n-Si Schottky barrier diode. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 4, 425-432.
- Sumathi, R. R., Udhayasankar, M., Kumar, J., Magudapathy, P., Nair, K. G. M. 2001. Effect of proton irradiation on the characteristics of GaAs Schottky barrier diodes. *Physica B*, 308-310, 1209-1212.
- Takakura, K., Fukawa, H., Kuroki, S., Hayama, K., Kudou, T., Shigaki, K., Ohyama, H., Simoen, E., Eneman, G., Claeys, C., 2006. Radiation defects and degradation of C-doped SiGe diodes irradiated by electrons. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 9, 292-295.
- Vang, H., Lazar, M., Brosselard, P., Raynaud, C., Cremillieu, P., Leclercq, J. -L., Bluet, J.-M., Scharnholtz, S., Planson, D., 2006. Ni-Al Ohmic contact to p-type 4H-SiC. *Superlattices and Microstructures*.
- Vassilevski, K. V., Nikitina, I. P., Wright, N. G., Horsfall, A. B., O'Neil, A. G., Johnson, C. M., 2006. *Microelectronic Engineering* 83, 150-154.
- Venter, A., Samiji, M. E. and Leitch, A. W. R., 2004. Thermal stability of Ru, Pd and Al Schottky contacts to p-type 6H-SiC. *Phy. Stat. Sol. (c)* 19, 2264-2268.
- Zhang, J., Harrell, W. R., 2003. Analysis of the I-V characteristics of Al/4H-SiC Schottky diodes. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 21(2), 872-878.
- Ziel, A., 1968. *Solid State Physical Electronics*, Prentice-Hall International Inc., Minnesota, 108-144.

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Erzurum’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Erzurum’da tamamladı. 2001 yılında Atatürk Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik bölümünü kazandı. 2005 yılında Fizik bölümünden mezun oldu. Aynı yıl içerisinde Atatürk Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik bölümünde Katıhal Fiziği dalında yüksek lisansa başladı. 2008 yılında yüksek lisansı bitirdi. 107 T 004 numaralı Tübitak Araştırma Projesinde halen bursiyer olarak çalışmaktadır.