

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRON RADYASYONUNUN Au/*n*-Si/Au-Sb SCHOTTKY
KONTAKLARIN ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİ
ÜZERİNE ETKİLERİ

Erkan UĞUREL

FİZİK ANABİLİM DALI

ERZURUM
2009
Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRON RADYASYONUNUN Au/*n*-Si/Au-Sb SCHOTTKY KONTAKLARININ ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Erkan UĞUREL

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Şakir AYDOĞAN

Au/*n*-Si/Au-Sb Schottky kontaklarda 25 gray, 50 gray ve 75 gray dozdaki elektron ışınlamasının elektriksel karakteristikleri üzerindeki etkileri ortaya çıkarıldı. 420⁰C ve 450⁰C sıcaklıklarda tavlanan kontakların ışınlamadan önce ve ışınlamalardan sonra *I-V* (akım-gerilim), *C-V* (kapasite-gerilim) ve *C-f* (kapasite-frekans) ölçümleri alındı. Düz beslem *I-V* grafikleri yardımıyla kontakların idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri hesaplandı. Cheung fonksiyonları yardımıyla idealite faktörleri, engel yükseklikleri ve seri direnç değerleri hesaplandı. Işınlanmadan önce 420⁰C’de tavlanan Au/*n*-Si/Au-Sb diyodunun idealite faktörü 1.152, engel yüksekliği 0.772 eV, 75 gray ışınlanmadan sonra idealite faktörü 1.254 engel yüksekliği ise 0.794 eV hesaplandı. Işınlanmadan önce 450⁰C’de tavlanan Au/*n*-Si/Au-Sb diyodunun idealite faktörü 1.231, engel yüksekliği 0.742 eV, 75 gray ışınlanmadan sonra idealite faktörü 1.384 engel yüksekliği 0.761 eV olarak hesaplandı. Işınlamayla idealite faktöründe ve engel yüksekliğinde artış gözlemlendi. Tavlama sıcaklığının artmasıyla idealite faktöründeki artış diyotların akım iletim mekanizmasının termoiyonik emisyon teorisinden sapmasıyla açıklandı. Bu durum yapının bozulmasına atfedildi. Ters beslem *C-V* grafikleri yardımıyla difüzyon potansiyelleri, engel yükseklikleri, fermi enerji seviyeleri ve donör konsantrasyonları hesaplandı. Artan ışınlamayla birlikte kapasitenin ve donör konsantrasyonunun azaldığı gözlemlendi. Radyasyonun diyotlarda oluşturduğu kusurlar nedeniyle diyotların ideallikten saptığı gözlemlendi.

2009, 58 Sayfa

Anahtar Kelimeler: *n*-Si, Schottky diyot, elektron ışınlanması

ABSTRACT

Master Thesis

THE EFFECTS OF ELECTRON IRRADIATION ON THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF Au/*n*-Si/Au-Sb SCHOTTKY CONTACTS

Erkan UĞUREL

Atatürk University

Graduate School of Natural and Applied Science

Department of Physics

Supervisor: Assoc Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN

The effects of electrical characteristics of electron irradiation of 25 gray, 50 gray and 75 gray in Au/*n*-Si/Au-Sb Schottky are revealed. The I - V , C - V , and C - f measurements are taken before and after the irradiation of contacts that are annealed at 420°C and 450°C for 3 minutes. As a result of the forward bias measures, ideality factors and the values of barrier heights are calculated. Ideality factor of Au/*n*-Si/Au-Sb diode annealed at 420°C before irradiation was calculated as 1.152, and the barrier height was calculated as 0.772 eV; however, ideality factor of Au/*n*-Si/Au-Sb diode after irradiation was calculated as 1.254, and the barrier height was calculated 0.794 eV. Ideality factor of Au/*n*-Si/Au-Sb diode annealed at 450°C before irradiation was calculated as 1.231, and the barrier height was calculated as 0.742 eV; however, ideality factor of Au/*n*-Si/Au-Sb diode after irradiation was calculated as 1.384, and the barrier height was calculated 0.761 eV. An increase in ideality factor and barrier height was observed with the irradiation. The increase in ideality factor resulted from the increasing of annealing temperature and electron irradiation was explained with the deviation of current transport mechanism from the thermionic emission theory. This situation is related with the corruption of the crystal structure. The diffusion potentials, barrier heights, Fermi energy levels and doping concentrations were calculated by using reverse bias C - V graphics. With the increasing irradiation, capacitance value and doping concentrations were observed to be increase. Because of the defects that the electron irradiation caused in the diodes, the diodes were observed to be deviate from the ideal situation.

2009, 58 Pages

Keywords: *n*-Si, Schottky diode, Electron irradiation

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünde hazırlanmıştır. Çalışmalarında bana desteğini esirgemeyen değerli hocam Sayın Doç. Dr. Şakir AYDOĞAN'a içtenlikle teşekkür ederim.

Numunelerin radyasyona tabi tutulması aşamasında bana yardımcı olan Sayın Korkmaz ŞERİFOĞLU'na teşekkür ederim.

Sağladığı imkanlarla bu çalışmayı yapmama vesile olan Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünün değerli öğretim üyelerine teşekkür ederim.

Erkan UĞUREL

Haziran 2009

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	5
2.1. Giriş.....	5
2.2. Metal Yarıiletken Kontaklar.....	5
2.2.a. Metal/ <i>n</i> -tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontaklar.....	5
2.2.b. Omik kontaklar.....	9
2.2.c. Metal/ <i>n</i> -tipi yarıiletken omik kontaklar.....	9
2.3. Tünelleme Engeli.....	12
2.4. Metal-Yarıiletken Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları.....	13
2.5. Schottky Diyotlarda Termoyonik Emisyonla Akım İletimi.....	14
2.6. Schottky Etkisinden Dolayı Engel Yüksekliğinin Azalması.....	19
2.7. Schottky Kontakların Karakterizasyonu.....	22
2.7.1. Düz beslem akım-gerilim (<i>I-V</i>) karakteristikleri ve Cheung fonksiyonları.....	22
2.7.2. Schottky diyotlarında ters beslem <i>C-V</i> (kapasite-gerilim) karakteristikleri.....	24
2.8. Radyasyonun Yarıiletken Malzemelere Etkileri.....	26
2.8.1. Radyasyon birimleri.....	27
2.8.2. Elektron radyasyonu.....	27
2.8.3. İyonizasyon zararları.....	28
2.8.4. Yerdeğiştirme zararları.....	28
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	29
3.1. Giriş.....	29
3.2. <i>n</i> -Si Kristalinin Temizlenmesi ve Numunenin Hazırlanması.....	29
3.3. Deney ve Ölçüm Sistemleri.....	31
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	33

4.1. Giriş.....	33
4.2. Radyasyona Bağlı $I-V$ (Akım-Gerilim) Ölçümleri.....	33
4.3. Cheung Fonksiyonları Kullanılarak Yapılan Hesaplamalar.....	38
4.4. Radyasyona Bağlı $C-V$ (Kapasite-Gerilim) Ölçümleri.....	44
4.5. Radyasyona Bağlı $C-f$ (Kapasite-Frekans) Ölçümleri.....	47
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	52
5.1. Giriş.....	52
5.2. Radyasyona Bağlı $I-V$ Ölçümlerinin Tartışılması.....	52
5.3. Radyasyona Bağlı $C-V$ Ölçümlerinin Tartışılması.....	54
5.4. Radyasyona Bağlı $C-f$ Ölçümlerinin Tartışılması.....	55
KAYNAKLAR.....	56
ÖZGEÇMİŞ.....	59

SİMGELER DİZİNİ

A	Diyodun etkin alanı
A^*	Richardson sabiti
$C-V$	Kapasite-gerilim
$C-f$	Kapasite-frekans
DI	Deiyonize su
E_F	Fermi enerji seviyesi
e	Elektronun yükü
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
Φ_b	Schottky engel yüksekliği
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
I_0	Saturasyon akımı
$I-V$	Akım-gerilim
J	Akım yoğunluğu
$J_{m \rightarrow s}$	Metalden yarıiletkene doğru akan akım yoğunluğu
$J_{s \rightarrow m}$	Yarıiletkenden metale doğru akan akım yoğunluğu
k	Boltzmann sabiti
n	İdealite faktörü
N_d	İyonize olmuş donör konsantrasyonu
N_c	Yarıiletkenin iletkenlik bandındaki hal yoğunluğu
R_s	Seri direnç
T	Sıcaklık
χ_s	Elektron ilgisi
V_{dif}	Difüzyon potansiyeli

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kontak yapılmadan önce metal ve n -tipi yarı iletkenin enerji bant diyagramı.....	6
Şekil 2.2. Kontakta sonra termal denge durumunda oluşa enerji-bant diyagramı	7
Şekil 2.3. Düz beslem durumunda metal/ n -tipi yarıiletken doğru tucu kantağın enerji bant diyagramı	8
Şekil 2.4. Ters beslem durumunda metal/ n -tipi yarıiletkenin enerji bant diyagramı	9
Şekil 2.5. Kontak yapılmadan önce metal ve n -tipi yarıiletken enerji bant diyagramı ($\Phi_s > \Phi_m$)	10
Şekil 2.6. Kontakta sonra metal ve yarıiletken omik kantağın enerji bant diyagramı.....	11
Şekil 2.7. Düz beslem durumunda metal ve n -tipi yarıiletken omik kantağın enerji bant diyagramı	11
Şekil 2.8. Ters beslem durumunda metal ve n -tipi yarıiletken omik kantağın enerji bant diyagramı	12
Şekil 2.9. n -tipi Silisyumda tünelleme ile omik kontak oluşumu.....	12
Şekil 2.10. Metal-yarıiletken kontaklarda düz beslem altında akım iletim mekanizmaları.....	13
Şekil 2.11. Düz belsem altındaki meyal/yarıiletken kontakta imaj kuvvet azalma etkisi	14

Şekil 2.12. (a) Metal dielektrik arayüzeyinde imaj yükü ve elektrik alan çizgileri, (b) Elektrik alan sıfırken potansiyelde meydana gelen bükülme, (c) Sabit elektrik alanda imaj yükünden dolayı oluşan bükülme.....	20
Şekil 3.1. Buharlaştırma ünitesi.....	30
Şekil 3.2. Tavlama fırını.....	31
Şekil 3.3. Akım-gerilim, kapasite-gerilim ve kapasite-frekans ölçüm sistemi	32
Şekil 4.1. Işınlanmadan önce D-1 diyodunun $I-V$ grafiği	34
Şekil 4.2. Işınlanmalar sonucu elde edilen D-1 diyodunun $I-V$ grafikleri	35
Şekil 4.3. Işınlanmadan önce D-2 diyodunun $I-V$ grafiği	36
Şekil 4.4. Işınlanmalar sonucu elde edilen D-2 diyodunun $I-V$ grafikleri	37
Şekil 4.5. Işınlanmadan önce D-1 diyodunun $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ 'nin (I) 'ya karşı değişim grafikleri.....	38
Şekil 4.6. 75 gray ışınlanmadan sonra D-1 diyodunun $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ 'nin (I) 'ya karşı değişim grafikleri.....	39
Şekil 4.7. Işınlanmadan önce D-2 diyodunun $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ 'nin (I) 'ya karşı değişim grafikleri.....	40
Şekil 4.8. 25 gray ışınlanmadan sonra D-2 diyodunun $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ 'nin (I) 'ya karşı değişim grafikleri.....	41
Şekil 4.9. 50 gray ışınlanmadan sonra D-2 diyodunun $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ 'nin (I) 'ya karşı değişim grafikleri.....	41
Şekil 4.10. 75 gray ışınlanmadan sonra D-2 diyodunun $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ 'nin (I) 'ya karşı değişim grafikleri.....	42
Şekil 4.11. Işınlanmadan önce ve sonra D-1 diyodunun 100 kHz'de alınan $C-V$ grafikleri.....	44
Şekil 4.12. Işınlanmadan önce ve sonra D-1 diyodunun 100 kHz'de I/C^2-V grafikleri.....	45

Şekil 4.13 Işınlanmalardan önce ve sonra D-2 diyodunun 10 kHz’de alınan $C-V$ grafikleri.....	46
Şekil 4.14. Işınlanmadan önce ve sonra D-2 diyodunun 10 kHz’de I/C^2-V grafikleri...	47
Şekil 4.15. Işınlanmadan önce D-1 diyodunun 0.04 Volt’luk adımlarla 0.00 V-0.24 V aralığında elde edilen C’nin f ’ye karşı değişim grafikleri.....	48
Şekil 4.16. 75 gray ışınlanmadan sonra D-1 diyodunun 0.04 Volt’luk adımlarla 0.00 V-0.24 V aralığında elde edilen C’nin f ’ye karşı değişim grafikleri ..	49
Şekil 4.17. Işınlanmadan önce D-2 diyodunun 0.04 Volt’luk adımlarla 0.00 V-0.40 V aralığında elde edilen C’nin f ’ye karşı değişim grafikleri.....	49
Şekil 4.18. 25 gray ışınlanmadan sonra D-2 diyodunun 0.04 Volt’luk adımlarla 0.00 V-0.40 V aralığında elde edilen C’nin f ’ye karşı değişim grafikleri ..	50
Şekil 4.19. 50 gray ışınlanmadan sonra D-2 diyodunun 0.04 Volt’luk adımlarla 0.00 V-0.40 V aralığında elde edilen C’nin f ’ye karşı değişim grafikleri	50
Şekil 4.20. 75 gray ışınlanmadan sonra D-2 diyodunun 0.04 Volt’luk adımlarla 0.00 V-0.40 V aralığında elde edilen C’nin f ’ye karşı değişim grafikleri	51

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Metal–yarıiletken kontaklarda malzemelerin iş fonksiyonuna bağlı olarak kontakların yapısı.....	5
Çizelge 4.1. D-1 diyodunun akımın gerilime bağlı değişiminden elde edilen deneysel verilerle bulunan idealite faktörü (n) ve engel yüksekliği (Φ_b) değerleri	35
Çizelge 4.2. D-2 diyodunun akımın gerilime bağlı değişiminden elde edilen deneysel verilerle bulunan idealite faktörü (n) ve engel yüksekliği (Φ_b) değerleri	37
Çizelge 4.3. D-1 diyodunun $dV/d\ln(I)$ 'nin (I)'ya karşı değişiminden elde edilen seri direnç (R_s) ve idealite faktörü (n) değerleri	39
Çizelge 4.4. D-1 diyodunun $H(I)$ 'nin (I)'ya karşı değişiminden elde edilen seri direnç (R_s) ve engel yüksekliği (Φ_b) değerleri	39
Çizelge 4.5. D-2 diyodunun $dV/d\ln(I)$ 'nin (I)'ya karşı değişiminden elde edilen seri direnç (R_s) ve idealite faktörü (n) değerleri	42
Çizelge 4.6. D-2 diyodunun $H(I)$ 'nin I 'ya karşı değişiminden elde edilen seri direnç (R_s) ve engel yüksekliği (Φ_b) değerleri	43
Çizelge 4.7. D-1 diyodunun radyasyona bağlı olarak elde edilen Schottky kontak değerleri	45
Çizelge 4.8. D-2 diyodunun radyasyona bağlı olarak elde edilen Schottky kontak değerleri	47

1. GİRİŞ

Metal-yarıiletken kontaklardaki doğrultucu özellik ilk olarak 1874 yılında F. Braun tarafından gözlenmiştir. Yapılan ilk metal-yarıiletken diyotlar nokta kontaklı diyotlardı. Bu yapılar ilk olarak frekans dönüştürücü olarak ve mikrodalga dedektör diyodu olarak kullanılmıştır. Bu diyotlar mekanik olarak güvenilir değildi ve yeniden üretilmesi mümkün değildi. Bu yüzden yerini bir yarıiletken yüzey üzerine ince bir metal film tabakanın kaplanması ile oluşan diyotlara bıraktı. Yarıiletken üzerinde oluşturulan metal ince film, arayüzeyinde engel oluşturmamasından dolayı doğrultucu özellik göstermektedir. Metal-yarıiletkenler arasında oluşan bu engel için ilk modeli geliştiren kişi Schottky olduğundan dolayı metal-yarıiletken kontaklara “Schottky kontak” da denilmektedir. Mott ise bu engel için farklı bir model ileri sürmüştür. Bu modele göre; yarıiletkenin metal komşuluğunda vericilerden yoksun ince bir tabaka bulunmaktadır. Bu tabakada elektrik alan sabit kalacak ve potansiyel lineer olarak değişecektir.

Metal-yarıiletken kontaklarla ilgili çalışmalar özellikle 1960’lı yıllarda yoğunluk kazanmıştır. Bu yıllarda Schottky diyotların yapımı birçok uygulamaya konu olmuştur. Metal-yarıiletken ve metal-yalıtkan-yarıiletken yapıların akım iletim mekanizmaları ve temel özellikleri; Sze (1969) ve Sharma (1980) tarafından incelenmiştir.

Cheung and Cheung (1986), tarafından akım yoğunluğunun lineer fonksiyonlar yardımıyla çizilen grafiklerden hem ideal hem de ideal olmayan durumlarda diyot parametrelerinin elde edilmesini sağlayan farklı bir metot geliştirilmiştir.

Schottky kontakların yapımının kolaylığı ve karakteristiklerinin önemli oranda belirlenebilirliği elektronik endüstrisinde geniş bir alanda kullanımını sağlamaktadır. Kullanıldığı alana uygun devre elemanı yapmak için yarıiletkenin karakteristik parametrelerinin ölçülebilmesi gerekmektedir. Bu elektriksel parametrelerden birisi engel yüksekliği, diğeri de metal-yarıiletken arasındaki akım geçiş mekanizmasıdır. Akım geçiş mekanizması metal-yarıiletkenin ideallğine bağlıdır ve ideallik akım

gerilim karakteristiğiyle belirlenir. İdeal bir diyodun idealite faktörü 1'dir. Aynı zamanda iyi bir Schottky diyodun seri direnç değeri ve ters beslem akımı düşük olmalıdır.

İdeal olmayan Schottky diyotlarda metal-yarıiletken arası her zaman ideal şartlarda olmaz. Metal ile yarıiletken arasındaki arayüzey tabakası, uygulanan gerilimle yüksek yük yoğunluğu ya da arayüzey hallerinin değişimi, nötral bölge direnci, arınma bölgesinin genişliği ile etkin kontak alanındaki değişimler, imaj kuvveti etkisiyle engel yüksekliğinin azalması ve arınma bölgesindeki tuzaklar ideal durumdan sapmalara neden olmaktadır.

Metal-yarıiletken Schottky diyotlarda metal ile yarıiletken arasında doğal olarak oluşan veya yapay olarak oluşturulan arayüzey tabakasının, kontakların elektriksel özelliklerini ve fiziksel parametrelerini değiştirdiğinin görülmesiyle metal-yalıtkan-yarıiletken yapılarla ilgili çalışmalar yapılmıştır. Arayüzey halleriyle ilgili ilk çalışma Heine (1965) tarafından yapılmıştır.

Metal-yarıiletken kontaklarda, kontak bölgesi kapasitesinin davranışlarını incelemek suretiyle yapının özellikleri hakkında bilgi sahibi olunması mümkündür. Elektronik parametreleri belirlemek için çeşitli metotlar kullanılmaktadır. Bunların arasında en fazla kullanılan akım-gerilim ($I-V$) ve kapasite gerilim ($C-V$) ölçüm metotlarıdır. Bu ölçümler yardımıyla; potansiyel engel yüksekliği, difüzyon potansiyeli ve taşıyıcı yoğunluğu gibi temel parametreleri tayin etme imkanı vardır.

Schottky kontaklar elektronik sanayinde birçok alanda kullanılmaktadır. Schottky engel tabakalı alan etkili transistörler (MESFET), metal oksit yarıiletken alan etkili transistörler (MOSFET) Schottky kontakların kullanıldığı yarıiletken devre elamanlarından bazılarıdır. Yarıiletken malzemelerden elde edilen transistör, doğrultucu, modülatör, hızlı anahtar uygulamaları, varaktör, dedektör, termistör ve

fotosel gibi araçlar elektronik ve bilgisayar teknolojisinin gelişiminde önemli rol oynamıştır.

Türüt ve Sağlam (1992), Al/*n*-Si ve Al/*p*-Si arayüzey tabakalı ve arayüzey tabakasız Schottky diyotlarda arayüzey hallerini ve arayüzeydeki sabit yükleri dikkate alarak I - V ve C - V karakteristiklerinden, engel yüksekliği, idealite faktörü ve arayüzey hal yoğunluğunu incelemişlerdir.

Sağlam vd (1996), Au/*n*-GaAs Schottky diyotların I - V karakteristiklerinden, arayüzey tabakası boyunca gerilim düşmesini de dikkate alarak, Cheung fonksiyonları yardımı ile seri direnç etkisini ve engel yüksekliğini hesaplamışlar, arayüzey hal yoğunluğunun arayüzey hallerinin enerji dağılımıyla değişimini incelemişlerdir.

Akkılıç vd (2003), arayüzey tabakalı ve arayüzey tabakasız Sn/*n*-Si Schottky diyot yapılarının I - V karakteristiklerini incelemişlerdir. İdealite faktörünün uygulanan gerilimle ve etkin engel yüksekliğinin de idealite faktörüyle değişimini teorik ve deneysel olarak araştırmışlardır.

Dökme vd (2008), Al/SiO₂/*p*-Si yapıları radyasyona maruz bırakarak C - V ve G/ω - V karakterizasyonu yapılarak radyasyonun bu yapılar üzerindeki etkilerini araştırdılar.

Krishnan *et al.* (2008), elektron radyasyonunun Al/*p*-Si Schottky diyotlara etkisini incelediler. Oda sıcaklığında I - V ölçümlerini alarak idealite faktörü, doyma akımı, engel yüksekliği ve seri direnç parametrelerini ölçtüler. Artan radyasyonla birlikte idealite faktörünün arttığını ve engel yüksekliğinin azaldığını gözlemlediler.

Bu çalışmada farklı sıcaklıklarda tavlanarak oluşturulan Au/*n*-Si/AuSb diodunun radyasyon öncesi ve sonrasında I - V (akım-gerilim) ve C - V (kapasite-voltaj) ölçümleri ve bu ölçümler yardımıyla temel diod parametreleri hesaplandı. Diodlar radyasyona tabi tutularak ölçümler ve hesaplamalar tekrar yapıldı ve radyasyonun Schottky kontaklar

üzerinde oluşturduğu etkiler incelendi. **420⁰C’de 3 dakika tavlanan Au/*n*-Si/AuSb diyodu D-1, 450⁰C’de 3 dakika tavlanan Au/*n*-Si/AuSb diyodu ise D-2 olarak adlandırılmıştır.**

Bu tez beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm; konu ile ilgili literatür çalışması ve konunun amacını belirten “giriş”, ikinci bölüm; “kuramsal temeller”, üçüncü bölüm; numune hazırlanması ve deney sistemini içeren “materyal ve yöntem”, dördüncü bölüm; akım-gerilim ($I-V$) ve kapasite-gerilim ($C-V$) ölçümlerinden faydalanılarak bulunan temel diyod parametrelerini içeren “araştırma bulguları” ve son olarak beşinci bölüm; ölçümlerin değerlendirilmesi sonucunda elde edilen parametre ve bilgilerin yorumlanmasını içeren “tartışma ve sonuç” bölümünden oluşmaktadır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Giriş

Metal–yarıiletken kontakların iletkenlik özellikleri uygun kontakların kristallere uygulanmasıyla mümkündür. Kontak durumuna getirilen iki madde arasında yük alışverişi olur. Bu yük alışverişi sonucu metal ve yarıiletken termal dengeye ulaşır, böylece metalin ve yarıiletkenin Fermi enerji seviyeleri aynı düzeye gelir. Oluşan bu metal–yarıiletken kontak metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına bağlı olarak doğrultucu kontak (Schottky kontak) ve omik kontak olarak adlandırılır.

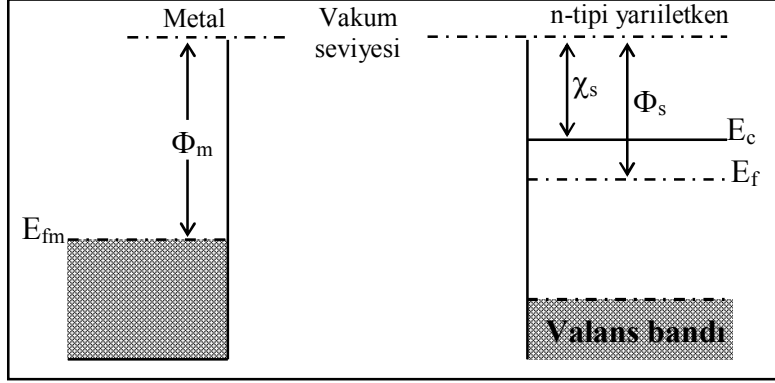
Çizelge 2.1 Metal–yarıiletken kontaklarda malzemelerin iş fonksiyonuna bağlı olarak kontakların yapısı

	Metal/ <i>n</i> -tipi	Metal/ <i>p</i> tipi
Doğrultucu Kontak	$\Phi_s < \Phi_m$	$\Phi_m < \Phi_s$
Omik Kontak	$\Phi_s > \Phi_m$	$\Phi_m > \Phi_s$

2.2. Metal/Yarıiletken Kontaklar

2.2.a. Metal/*n*-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontaklar

Bir metal ile yarıiletken kontak haline getirildiğinde, metal-yarıiletken arayüzeyinde yüklerin ayrışmasından dolayı bir potansiyel engel oluşur. Doğrultucu kontak durumunda elektronlar bir yönde kolaylıkla hareket ederken elektronların diğer yönde hareketi potansiyel engel tarafından zorlaştırılır. Şekil 2.1 iş fonksiyonu Φ_m ile gösterilen metal ile iş fonksiyonu Φ_s ile gösterilen *n*-tipi yarıiletkenin $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda kontakdan önceki enerji bant diyagramı göstermektedir.

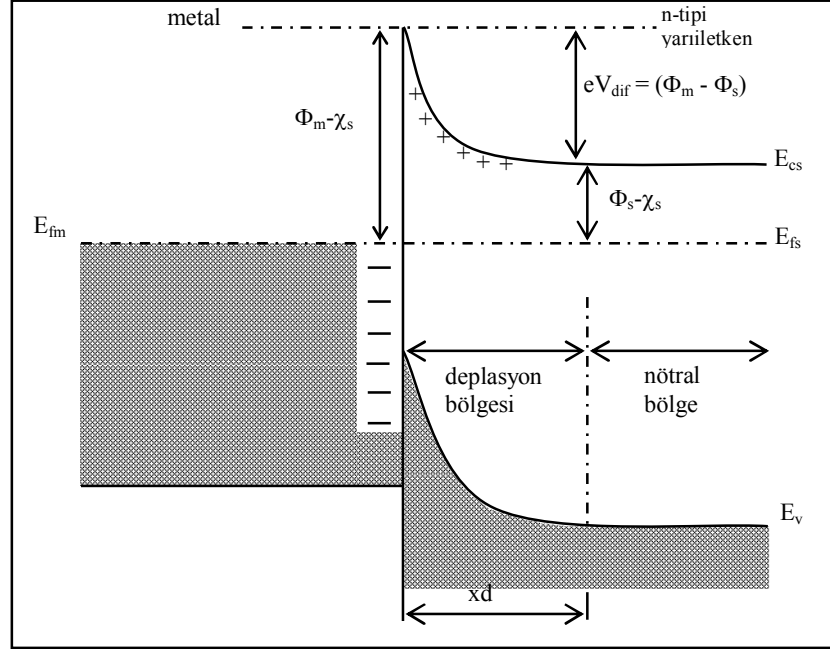


Şekil 2.1 Kontak yapılmadan önce metal ve n -tipi yarı iletkenin enerji bant diyagramı

Vakum seviyesi olarak metalin tam dışındaki bir noktada sıfır kinetik enerjili bir elektronun enerji seviyesi referans alınmıştır. Metalin iş fonksiyonu (Φ_m); bir elektronu Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan enerji miktarıdır. Yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s)’ de benzer şekilde yarıiletken için tanımlanır. Yarıiletkenin iş fonksiyonu değişken bir niceliktir. Çünkü yarıiletkenin Fermi seviyesi katkılanan atomların miktarına bağlı olarak değişir. χ_s ise yarıiletkenin elektron yakınlığıdır ve katkı atomlarının konsantrasyonundan bağımsızdır. Yarıiletkenin iletkenlik bandının tabanındaki bir elektronu vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan enerji “elektron yakınlığı” olarak tanımlanır. Kontakta önce yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\Phi_m - \Phi_s$ kadar yukarıdadır. Kontak sonrası termal denge sağlanıncaya kadar yarıiletkenden metale elektron geçişi olur. Termal denge durumunda Fermi enerji seviyeleri eşitlenir. Kontakta sonraki durum Şekil 2.2’de görülmektedir. Yarıiletkenin enerji seviyeleri $\Phi_m - \Phi_s$ kadar alçalmıştır. Kontakta oluşan dipol tabakası nedeniyle eklem üzerinde bir potansiyel engel oluşur. Bu engelin yarıiletken tarafındaki yüksekliği $\Phi_m - \Phi_s$ kadar, metal tarafındaki yüksekliği ise $\Phi_m - \chi_s$ kadardır. Difüzyon potansiyeli cinsinden bu engelin yüksekliği;

$$eV_{\text{dif}} = \Phi_m - \Phi_s \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 2.2 Kontakta sonra termal denge durumunda oluşan enerji-bant diyagramı

Yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar metale geçerken bu engelle karşılaşılır. Elektronlar metale geçtiklerinde yarıiletken tarafında iyonize olmuş donörleri bırakırlar. Yarıiletken tarafındaki bu yükler hareketsiz oldukları için uzay yüküdürler. Kontaktaki yüzey tabakası potansiyel engelden dolayı “engel tabakası” olarak adlandırılır. Bu tabakanın kalınlığı iyonize olmuş donör konsantrasyonuna ve difüzyon potansiyelinin değerine bağlı olarak değişir. Bu tabaka engel tabakası, uzay yükü bölgesi, geçiş bölgesi veya arınma bölgesi gibi isimlerle adlandırılır. Pozitif ve negatif yükler arasında kalan bu bölge kapasite özelliğine sahiptir ve “Schottky kapasitesi” olarak adlandırılır. Termal denge durumunda metal ve yarıiletken içindeki bazı elektronların termal yolla kazandıkları enerji potansiyel engelini aşmaya yetecek büyüklükte olduğu zaman, kontakta eşit ve zıt yönde bir I_0 sızıntı akımı oluşur. Yarıiletkene $-V$ gerilimi uygulanırsa metalden yarıiletkene geçen elektronlar için engel yüksekliği değişmez. Bundan dolayı yarıiletken metale doğru olan akım sabit kalır. Fakat yarıiletken tarafında iletkenlik bandı eV kadar yükseleceği için yarıiletken metale geçen

elektronlar için engel yüksekliği eV kadar azalır. Bu durumda metalden yarıiletken doğru akan akım $\exp(eV/kT)$ faktörü kadar artar. Bu durumda oluşan net akım,

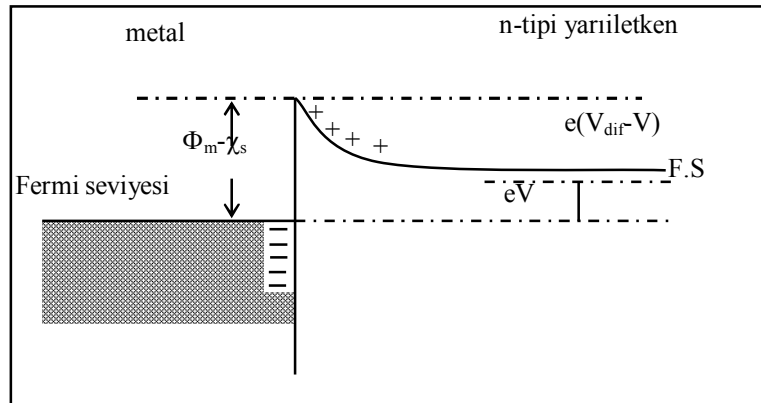
$$I = I_0[\exp(\frac{eV}{kT}) - 1] \quad (2.2)$$

olarak ifade edilir (Rhoderick 1988; Ziel 1968). Bu ifadede ($eV \gg kT$) olması durumunda 1 rakamı diğer terimin yanında çok küçük bir değer olduğu için ihmal edilebilir. Bu durumda eşitlik;

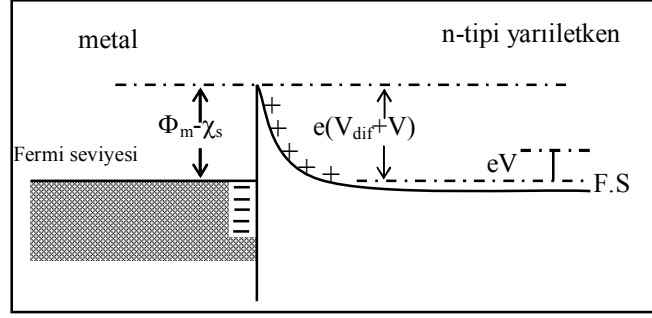
$$I = I_0[\exp(\frac{eV}{kT})] \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilebilir.

I net akımı pozitifdir. Bu duruma “düz beslem” durumu denir. Şekil 2.3 düz beslem durumunda metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji bant diyagramını göstermektedir. Yarıiletken tarafına +V gerilimi uygulanırsa iletkenlik bandı eV kadar alçalır. Yarıiletkenin engel yüksekliği eV kadar artar. Oluşan net akım $-I_0$ değerine yaklaşır. Bu beslem durumuna da ($eV \ll -kT$) “ters beslem” durumu denir (Rhoderick 1988; Ziel 1968). Şekil 2.4 ters beslem durumunda metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji bant diyagramını göstermektedir.



Şekil 2.3 Düz beslem durumunda metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji bant diyagramı



Şekil 2.4 Ters beslem durumunda metal/*n*-tipi yarıiletkenin enerji bant diyagramı

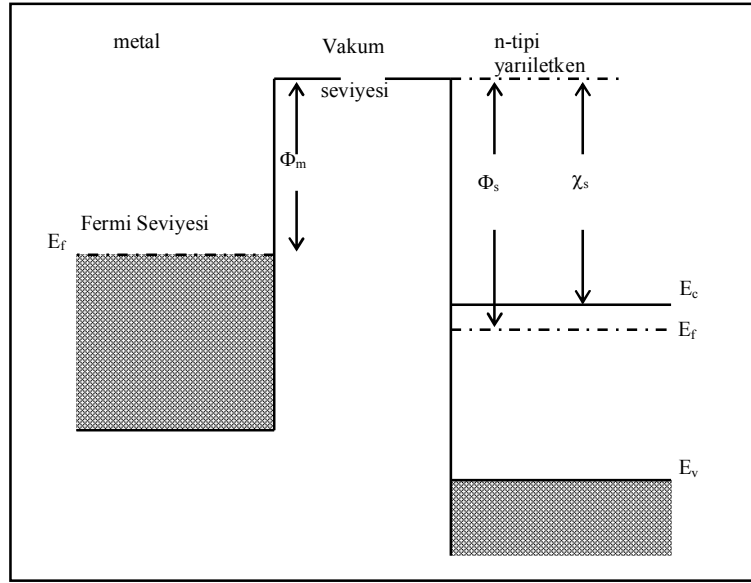
2.2.b. Omik kontaklar

Taşıyıcıların bir maddeden diğerine kolayca geçebildiği kontaklar “omik kontak” olarak adlandırılır. Omik kontaktaki akım-gerilim ilişkisi ohm yasasına uygundur. Omik kontak elde edebilmek için *n*-tipi yarıiletken yüzeyine buharlaştırılan metal, yarıiletken ile alaşım haline getirilir. Yarıiletken yüzeyinde bir *n*+ tabaka oluşturmak için belirli sıcaklıkta tavlama yapılır. Tavlama sonucu yarıiletken içine difüze olan tabaka elektron bakımından yarıiletkene göre daha zengindir.

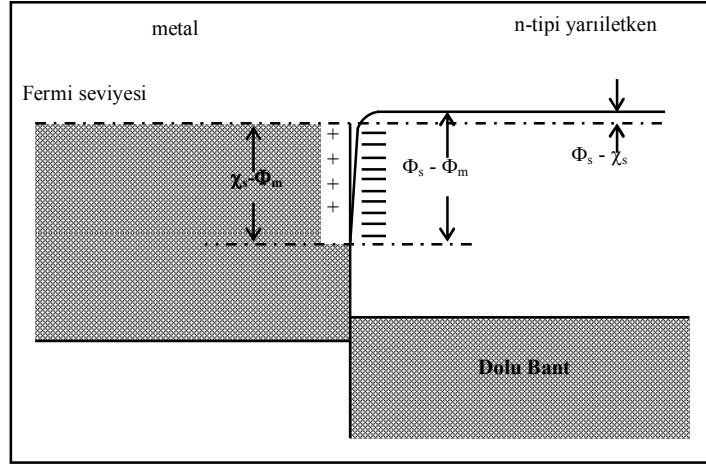
2.2.c. Metal/*n*-tipi yarıiletken omik kontaklar

$\Phi_s > \Phi_m$ durumunda, bir metalle bir *n*-tipi yarıiletken arasında omik kontak oluşur. Şekil 2.5’de kontakdan önce metalin ve yarıiletkenin enerji bant diyagramları verilmiştir. Kontakdan önce metalin Fermi seviyesi yarıiletkenin Fermi seviyesinden $\Phi_s - \Phi_m$ kadar yukarıdadır. Kontakdan sonra metaldeki elektronlar geride pozitif yükleri bırakarak yarıiletkene geçerler. Metal tarafında pozitif yüzey yükü, yarıiletken tarafında ise negatif yüzey yükü tabakası oluşur. Böylece kontak bölgesinde bir dipol tabakası oluşur. Yük alış verişi bittikten sonra yarıiletkenin Fermi seviyesi Şekil 2.6’da görüldüğü gibi $\Phi_s - \Phi_m$ kadar yükselir. Kontak haline getirilmiş ve dengedeki metal-yarıiletken omik kontakta, metalden yarıiletkene ve yarıiletkenden metale kolayca yük akışı olur.

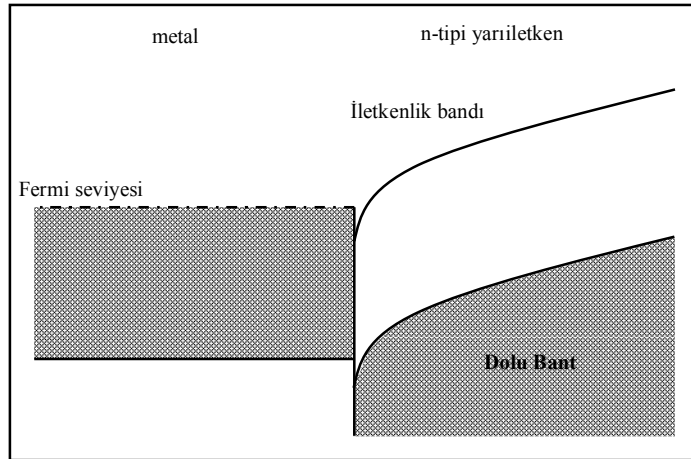
Metal tarafına pozitif bir V gerilimi uygulanırsa yarıiletkenden metale akan elektronlar için engel olmadığından elektronlar bu yönde kolayca hareket ederler. (Şekil 2.7) Yarıiletkene bir pozitif gerilim uygulanırsa elektronların karşılaşılabilecekleri engel yüksekliği yine çok küçük olacak ve elektronlar metalden yarıiletkene kolayca akacaktır (Şekil 2.8).



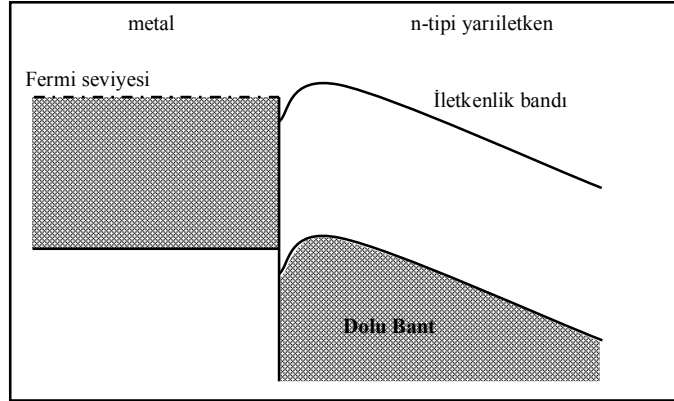
Şekil 2.5 Kontak yapılmadan önce metal ve n -tipi yarıiletkene enerji bant diyagramı ($\Phi_s > \Phi_m$)



Şekil 2.6 Kontakta sonra metal ve yarıiletken omik kontağın enerji bant diyagramı



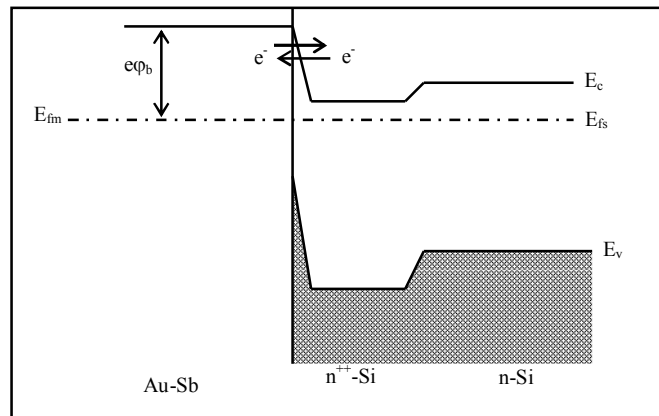
Şekil 2.7 Düz beslem durumunda metal ve *n*-tipi yarıiletken omik kontağın enerji bant diyagramı



Şekil 2.8 Ters beslem durumunda metal ve n -tipi yarıiletken omik kontağın enerji bant diyagramı

2.3. Tünelleme Engeli

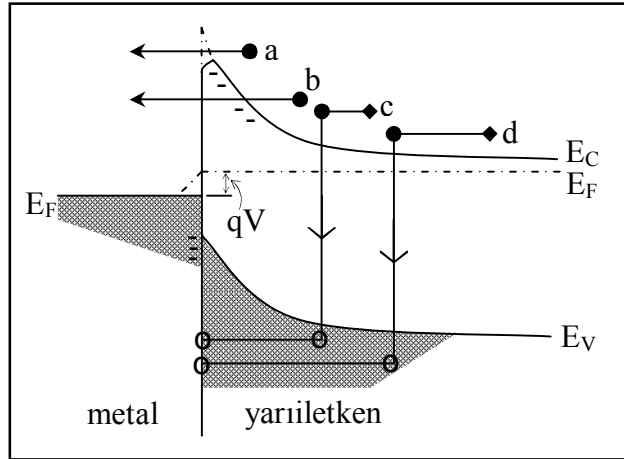
Tünelleme metal-yarıiletken doğrultucu diyotlardaki önemli bir akım iletim mekanizmasıdır. Elektronlar engel yüksekliğini aşmak yerine küçülen engel genişliği sayesinde Schottky engeli boyunca tünellenirler. Deplasyon bölgesinin genişliğinin azaltılması yarıiletken yüzeyinin aşırı tiplilik gösterecek biçimde katkılanması suretiyle mümkün olur. Katkılama işlemi termal difüzyon, iyon ekme veya epitaksiyel büyütme tekniklerinden biri kullanılarak yapılır.



Şekil 2.9 n -tipi Silisyumda tünelleme ile omik kontak oluşumu

2.4. Metal - Yarıiletken Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları

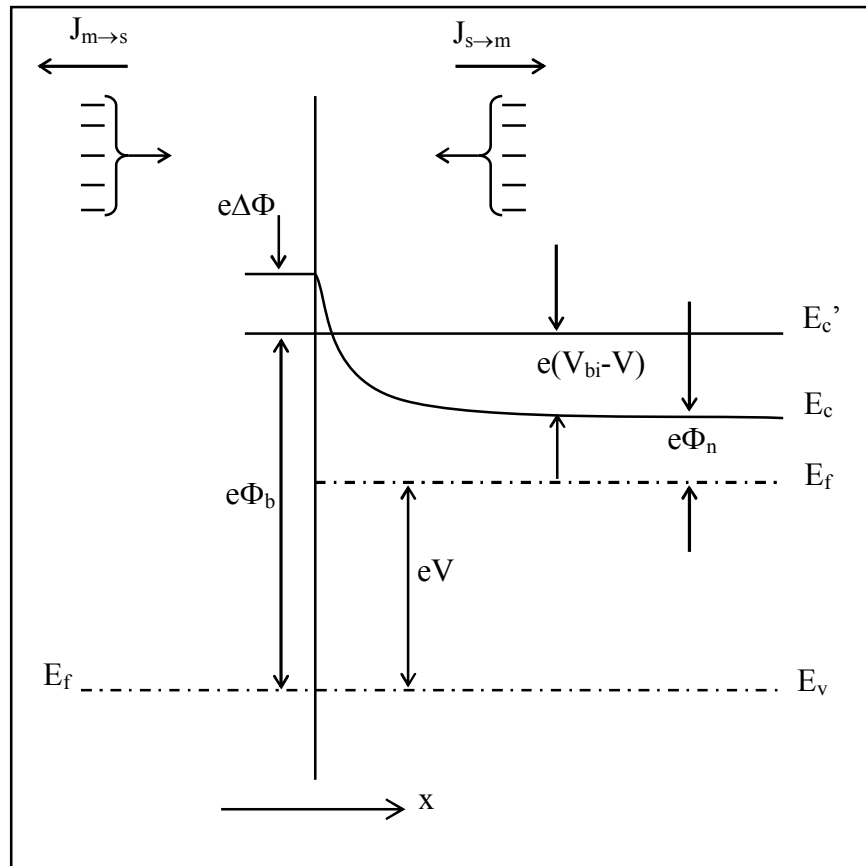
Metal-yarıiletken kontaklarda akımın taşınması genellikle çoğunluk taşıyıcılarıyla gerçekleşir. Schottky engelinde geçen akım için birkaç farklı akım iletim mekanizması vardır. Şekil 2.10'da doğru beslem altında metal/*n*-tipi yarıiletkende dört temel akım iletim mekanizması gösterilmiştir. Bunlardan birincisi (a) termoyonik emisyon teorisi, ikincisi (b) engel boyunca kuantum mekaniksel tünelleme, üçüncüsü (c) uzay yük bölgesinde yeniden birleşmeler ve dördüncüsü (d) nötral bölgelerde birleşmelerdir. Birinci durum; potansiyel engelin tepesi üzerinden yarıiletkenden metalin içine doğru elektronların iletimidir. Bu ideal katkılanmış Schottky diyotlar için ideal bir modeldir. İkinci durum; elektronların engel içinden kuantum mekaniksel olarak tünellenmesidir. Bu durum yüksek katkılı yarıiletkenler ile çoğu omik kontaklar için uygun bir modeldir. Üçüncü durum orta sıcaklık bölgesinde önemli bir mekanizmadır. Dördüncü durum ise düşük sıcaklıklarda ve ters beslem durumunda etkin olan bir mekanizmadır.



Şekil 2.10 Metal-yarıiletken kontaklarda düz beslem altında akım iletim mekanizmaları

2.5. Schottky Diyotlarda Termoyonik Emisyonla Akım İletimi

“Termoyonik emisyon” sıcak bir yüzeyden taşıyıcıların yayınlanması demektir. Metal-yarıiletken doğrultucu kontaklarda yeterince termal enerji kazanan taşıyıcıların potansiyel engeli üzerinden metalden yarıiletkene veya yarıiletkenden metale geçmesi olarak bilinir. Metal/*n*-tipi yapılarda bu olay çoğunluk taşıyıcıları olan elektronlarla sağlanır. Metal tarafı uygulanan voltajdan bağımsızdır. Termal enerjileri yardımıyla metal tarafındaki engeli aşan elektronların oluşturduğu akım yoğunluğu $J_{s \rightarrow m}$ termoyonik akım yoğunluğudur. Termoyonik emisyon teorisi oluşturulurken; potansiyel engelinin yüksekliğinin kT/e enerjisinden çok yüksek olduğu, deplasyon bölgesinde taşıyıcı çarpışmalarının olmadığı, hayali kuvvetlerin etkisi ihmal edilmektedir.



Şekil 2.11 Düz beslem altındaki metal/yarıiletken kontakta imaj kuvvet azalma etkisi

Şekil.2.11’de V büyüklüğünde düz beslem gerilimi uygulanmış bir Schottky kontak görülmektedir. Burada $J_{s \rightarrow m}$ yarıiletken den metale doğru akan akım yoğunluğu ve $J_{m \rightarrow s}$ ise metalden yarıiletkene doğru olan akım yoğunluğudur. $J_{s \rightarrow m}$ akım yoğunluğu, x yönünde ve engeli aşabilecek büyüklükte hızlara sahip elektronların konsantrasyonunun bir fonksiyonudur. Bu nedenle,

$$J_{s \rightarrow m} = e \int_{E_c}^{\infty} v_x dn \quad (2.4)$$

şeklinde yazılabilir. Burada E_c' metal içindeki termoiyonik emisyon için gerekli minimum enerji, v_x taşınma yönündeki hızdır. Artan elektron konsantrasyonu,

$$dn = g_c(E) f_F(E) d(E) \quad (2.5)$$

ile verilir. Burada $g_c(E)$, iletkenlik bandındaki hal yoğunluğu ve $f_F(E)$, Fermi-Dirac ihtimaliyet fonksiyonudur. Maxwell-Boltzmann yaklaşımı uygulanarak elektron konsantrasyonu için,

$$dn = \frac{4\pi(2m_n^*)^{3/2}}{h^3} \sqrt{E - E_c} \exp\left[\frac{-(E - E_F)}{kT}\right] dE \quad (2.6)$$

yazılabilir. $(E - E_c)$ enerjisi serbest elektronun kinetik enerjisi olarak kabul edilirse, bu durumda,

$$\frac{1}{2} m_n^* v^2 = E - E_c \quad (2.7)$$

$$dE = m_n^* v dv \quad (2.8)$$

ve

$$\sqrt{E - E_c} = v \sqrt{\frac{m_n^*}{2}} \quad (2.9)$$

olur. Bu sonuçlar kullanılarak (2.9) ifadesi yeniden düzenlenirse,

$$dn = 2 \left(\frac{m_n^*}{h} \right)^3 \exp \left(\frac{-e\phi_n}{kT} \right) \exp \left(\frac{-m_n^* v^2}{2kT} \right) 4\pi v^2 dv \quad (2.10)$$

elde edilir. Bu denklem, hızları v ve $v + dv$ aralığında değişen elektronların sayısını verir. Hız, bileşenlerine ayrılırsa;

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

şeklinde olur. Buradan (2.4) ifadesi,

$$J_{s \rightarrow m} = 2e \left(\frac{m_n^*}{h} \right)^3 \exp \left(\frac{-e\phi_n}{kT} \right) \int_{v_{0x}}^{\infty} v_x \exp \left(\frac{m_n^* v_x^2}{2kT} \right) dv_x \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(\frac{-m_n^* v_y^2}{2kT} \right) dv_y \times \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(\frac{-m_n^* v_z^2}{2kT} \right) dv_z, \quad (2.11)$$

şeklinde yazılabilir. v_{0x} hızı, x doğrultusundaki harekette elektronun potansiyel engelini aşabilmesi için gerekli olan minimum hızdır. Son ifadede aşağıdaki değişken değiştirmeleri yapılabilir:

$$\frac{m_n^* v_x^2}{2kT} \equiv \alpha^2 + \frac{e(V_{bi} - V)}{kT} \quad (2.12)$$

$$\frac{m_n^* v_y^2}{2kT} \equiv \beta^2 \quad (2.13)$$

$$\frac{m_n^* v_z^2}{2kT} \equiv \gamma^2 \quad (2.14)$$

Ayrıca minimum v_{ox} hızı için,

$$\frac{1}{2} m_n^* v_{0x}^2 = e(V_{bi} - V) \quad (2.15)$$

yazılabilir. Bu durumda $v_x \rightarrow v_{ox}$ şartı için $\alpha = 0$ olur. Yine $v_x dv_x = \left(\frac{2kT}{m_n^*} \right) \alpha d\alpha$

yazılabilir. Bu ifadeler (2.11) denkleminde kullanılırsa;

$$J_{s \rightarrow m} = 2e \left(\frac{m_n^*}{h} \right)^3 \left(\frac{2kT}{m_n^*} \right)^2 \exp \left(\frac{-e\phi_n}{kT} \right) \exp \left[\frac{-e(V_{bi} - V)}{kT} \right] \\ \times \int_0^\infty \alpha \exp(-\alpha^2) d\alpha \int_{-\infty}^\infty (-\beta^2) d\beta \int_{-\infty}^\infty (-\gamma^2) d\gamma \quad (2.16)$$

n ifadenin integrali alınırsa;

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[\frac{-e(\phi_n + V_{bi})}{kT} \right] \exp \left(\frac{eV}{kT} \right) \quad (2.17)$$

ya da

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[\frac{-e\phi_b}{kT} \right] \exp \left(\frac{eV}{kT} \right) \quad (2.18)$$

olur. Uygulama gerilimi sıfır olduğunda $J_{s \rightarrow m}$ ile $J_{m \rightarrow s}$ tamamen eşittirler. Yani,

$$J_{m \rightarrow s} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[\frac{-e\phi_b}{kT} \right] \quad (2.19)$$

olur. Eklemdeki net akım yoğunluğu $J = J_{s \rightarrow m} - J_{m \rightarrow s}$ olur. Daha açık ifadeyle net akım yoğunluğu,

$$J = \left[A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.20)$$

olur. Burada A^* termoiyonik emisyon için Richardson sabiti olup,

$$A^* = \frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \quad (2.21)$$

ile verilir (Rhoderick 1988). Genel bir durum için (2.20) ifadesi,

$$J = J_{sT} \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.22)$$

olarak yazılabilir. Burada J_{sT} ters-doyma akım yoğunluğu olarak bilinir ve

$$J_{sT} = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \quad (2.23)$$

şeklinde ifade edilir. ϕ_b Schottky engel yüksekliğinin imaj kuvveti nedeniyle azaldığı ve $\phi_b = \phi_{b0} - \Delta\phi$ şekline verildiği dikkate alınarak (2.23) ifadesi yeniden,

$$J_{sT} = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{e\Delta\phi}{kT}\right) \quad (2.24)$$

şeklinde yazılır. Engel yüksekliğindeki $\Delta\phi$ değişimi, artan elektrik alanla ya da artan ters beslem gerilimi ile artacaktır.

2.6. Schottky Etkisinden Dolayı Engel Yüksekliğinin Azalması

Schottky etkisi veya imaj etkisi metal-yarıiletken yapılarda elektrostatik etkileşmeden dolayı potansiyel engelinin $\Delta\Phi$ kadar alçalmasıdır.

Metalden x kadar uzaklıktaki bir mesafede bir dielektrikteki bir 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 $+e$ imaj yükününkü ile aynı olacaktır. Bu imaj etkisi Şekil 2.12.a'da gösterilmiştir. İmaj yükü ile Coulumb etkileşmesinden dolayı elektron üzerine etki eden kuvvet,

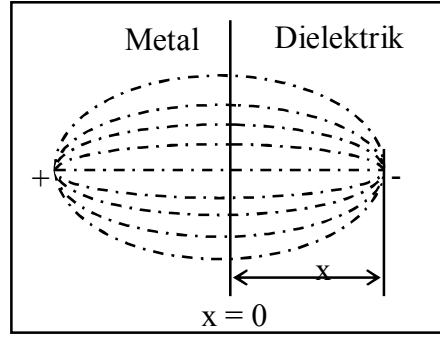
$$F = \frac{-e^2}{4\pi\epsilon_s(2x)^2} = -Ee \quad (2.25)$$

ifadesi ile verilir (Neamen 1992). Potansiyel ifadesi ise,

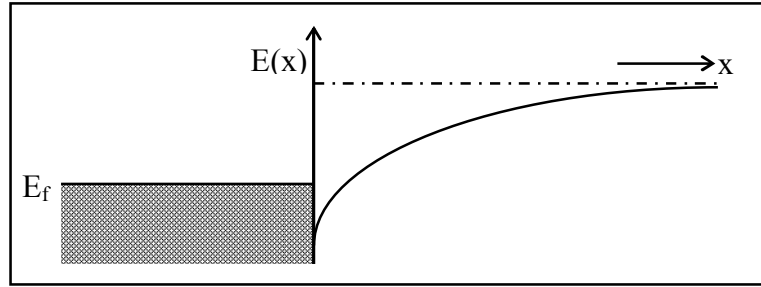
$$-\Phi(x) = + \int_x^{\infty} E dx' = + \int_x^{\infty} \frac{e}{4\pi\epsilon_s 4(x')^2} dx' = \frac{-e}{16\pi\epsilon_s x} \quad (2.26)$$

ile verilir. Burada x' integral değişkeni olup, $x=\infty$ için potansiyel sıfır kabul edilmektedir.

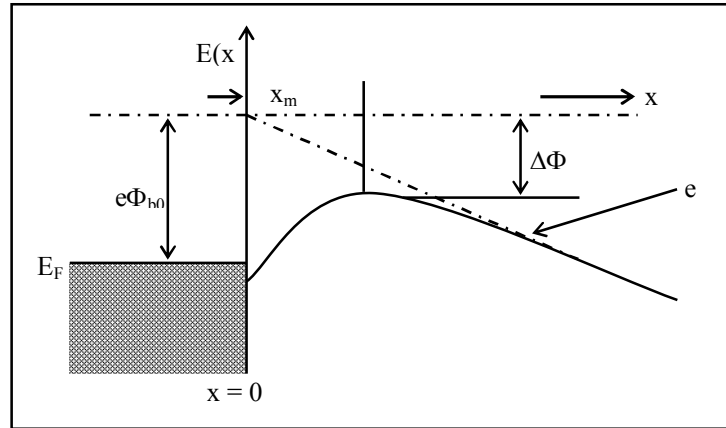
Elektronun potansiyel enerjisinin $-e\Phi(x)$ değişimi başka elektrik alanının olmadığı kabul edilerek Şekil 2.12.b'de gösterilmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.12 (a) Metal dielektrik arayüzeyinde imaj yükü ve elektrik alan çizgileri, (b) Elektrik alan sıfırken potansiyelde meydana gelen bükülme, (c) Sabit elektrik alanda imaj yükünden dolayı oluşan bükülme

Dielektrikteki bir elektrik alanının varlığında potansiyel ifadesi ilave bir terim alarak modifiye edilir ve

$$-\Phi(x) = \frac{-e}{16\pi\epsilon_s x} - Ex \quad (2.27)$$

Sabit bir elektrik alanının varlığında elektronun potansiyel enerji değişimi Şekil 2.12.c'de gösterilmiştir. Bu şekilde potansiyel engeli piki azalmıştır. Potansiyel engeli pikinin bu şekilde azalması Schottky etkisi ve imaj kuvveti etkisi ile engel yüksekliğinin azalması olarak bilinir.

$$\frac{d(e\Phi(x))}{dx} = 0 \quad (2.28)$$

Şartı dikkate alınarak maksimum engelin konumu,

$$x_m = \sqrt{\frac{e}{16\pi\epsilon_s E}} \quad (2.29)$$

ve Schottky engel yüksekliğinin azalması,

$$\Delta\Phi = \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_s}} \quad (2.30)$$

ile verilir (Ziel 1968).

2.7. Schottky Kontakların Karakterizasyonu

2.7.1. Düz beslem akım-gerilim (I - V) karakteristikleri ve Cheung fonksiyonları

I - V grafiğinin düz beslem kısmındaki değişimden faydalanarak idealite faktörü (n), engel yüksekliği ($e\Phi_b$) ve seri direnç değerleri hesaplanır. Diyodun kalitesini belirleyen önemli bir parametre olan idealite faktörü birimsiz olup n ile gösterilir. İdealite faktörü ideal bir diyot için 1 olmalıdır.

İdealite faktörü;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.31)$$

Eşitliği ile hesaplanır. $eV \gg kT$ olması durumunda 1 ihmal edilebilir ve ifade,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \right] \quad (2.32)$$

olarak yazılır.

Eşitliğin her iki tarafının logaritması alındıktan sonra V 'ye göre türev alındığında idealite faktörü için ;

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (2.33)$$

ifadesi elde edilir. $\ln I$ - V grafiği çizilip düz beslem kısmın lineer bölgesine doğrusal fit uygulanır. Bu doğrunun eğiminden $dV/d\ln I$ değeri elde edilir. Elde edilen bu değerle birlikte (2.33) ifadesinde elektronun yükü ($e=1.6 \times 10^{-19}$ C), Boltzmann sabiti ($k=8.625 \times 10^{-5}$ eV/K) ve sıcaklık (T) yerlerine yazılarak idealite faktörünün değeri bulunur. Fit edilen doğrunun $V=0$ ' da düşey eksenini kestiği nokta I_0 doyma akım yoğunluğunu verir.

I_0 doyma akım yoğunluğu;

$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right)$ ifadesiyle verilmektedir. Bu eşitliğin her iki tarafının logaritması alınarak Φ_b 'ye göre düzenlenirse engel yüksekliği için;

$$e\Phi_b = kT \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (2.34)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadede yer alan A, diyodun etkin alanı ($A=0.0227 \text{ cm}^2$), A^* Richardson sabitidir. Richardson sabitinin değeri *n*-Si için $110 \text{ A/K}^2\text{cm}^2$ 'dir.

Termoiyonik teorisinde akım yoğunluğu için bulunan denklem diyodun etkin alanı ile çarpıldığında diyottan geçen toplam akım;

$$I = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.35)$$

olarak elde edilir. $eV \gg kT$ olduğunda 1 terimi ihmal edilebilir. Bu ifade ideal diyotlar için geçerlidir. Ancak uygulanan potansiyelin tamamı deplasyon bölgesine düşmeyeceğinden ideal durumdan sapmalar olacaktır. Bu sapmalar denkleme ilave edilen birimsiz sabit olan *n* idealite faktörü ile temsil edilir. İdealite faktörü dikkate alınarak denklem tekrar düzenlenirse;

$$I = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \right] \quad (2.36)$$

ifadesine dönüşür. Uygulanan V gerilimin IR_s kadarlık kısmı seri direnç üzerine düşeceğinden V yerine $(V - IR_s)$ yazılabilir. Bu durumda akım denklemi;

$$I = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{e(V - IR_s)}{nkT}\right) \right] \quad (2.37)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadenin logaritması alınarak V yalnız bırakılırsa;

$$V = \left(\frac{nkT}{e} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) + n\Phi_b + IR_s \quad (2.38)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadenin $\ln I$ 'ya göre türevi alınır;

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (2.39)$$

olur. Denklemdaki $\frac{dV}{d(\ln I)}$, 'nın I 'ya karşı grafiği bir doğruyu verir. Bu doğrunun eğimi seri direnci (R_s) ve $I=0$ için düşey eksenini kestiği noktanın kT/e 'ye oranı idealite faktörü (n)'yi verecektir. (2.38) denklemindeki son iki terim yalnız bırakılarak ifade düzenlenirse;

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{e} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (2.40)$$

şeklinde ifade elde edilir. Bu ifadedeki $H(I)$ fonksiyonu;

$$H(I) = n\Phi_b + IR_s \quad (2.41)$$

şeklinde yazılabilir. $H(I)$ - I grafiği yine bir doğruyu verir. Bu doğrunun eğimi nötral bölgenin direncini (R_s) verir. $I=0$ değeri için düşey eksenini kestiği nokta engel yüksekliği ($e\Phi_b$)'yi verir (Aydoğan 2003).

2.7.2. Schottky diyotlarında ters beslem C - V (kapasite-gerilim) karakteristikleri

Metal/ n -tipi yarıiletken doğrultucu kontaklarda yük taşıyıcı konsantrasyonlarının metal ve yarıiletken arasında yeniden dağılımı sonucunda, yarıiletkenin sınır bölgesinde elektronlardan arınmış yüksek dirençli bir tabaka (deplasyon tabakası) oluşmaktadır. Bu tabakanın kalınlığı uygulanan gerilimle değişmektedir. Bu tabakanın direnci yarıiletken bölgenin (bulk) direncinden çok büyüktür. Bu tabaka hareketli yük içermeyen yüksek

dirençli yalıtkan bir tabakadır. Bu tabakanın kapasitesi, metal-yarıiletken arayüzeyin oluşumu hakkında önemli bilgiler vermektedir. Kapasitenin ters beslem durumunda gerilime bağlı olarak değişiminden; doğrultucu kontağın engel yüksekliği, yarıiletkendeki taşıyıcı konsantrasyonu, difüzyon potansiyeli ve Fermi enerji seviyesi gibi parametreler elde edilebilir.

$$C = A \left(\frac{\epsilon_s \epsilon_0 e N_d}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(V_d - \frac{kT}{e} \right) \quad (2.42)$$

Eşitliğindeki ϵ_s , yarıiletkenin dielektrik sabiti (Si için $\epsilon_s = 11.8$), ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14}$ F/m), e elektronun yükü, V_d difüzyon potansiyeli, k Boltzmann sabiti ($k = 8.625 \times 10^{-5}$ eV/K), N_d iyonize olmuş donör konsantrasyonu, T ise Kelvin cinsinden sıcaklıktır. Bu ifade düzenlenirse;

$$C^{-2} = \frac{2(V_d + V)}{\epsilon_s \epsilon_0 e A^2 N_d} \quad (2.43)$$

elde edilir. $1/C^2$ - V grafiği çizilerek uygun lineer fit yapıldığında $1/C^2=0$ için $V_d=V$ olur. Böylece difüzyon potansiyeli elde edilmiş olur. Bu ifadenin V 'ye göre türevi alınırsa

$$\frac{d(C^{-2})}{dV} = \frac{2}{\epsilon_s \epsilon_0 e A^2 N_d} \quad (2.44)$$

elde edilir. Bu eşitlikte N_d yalnız bırakılırsa;

$$N_d = \frac{2}{\epsilon_s \epsilon_0 e A^2 \frac{d(C^{-2})}{dV}} \quad (2.45)$$

bağıntısı elde edilir. Termal dengede n-tipi yarıiletkendeki elektron konsantrasyonu;

$$n = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \quad (2.46)$$

ile verilmektedir. Burada N_c , termal dengede iletkenlik bandındaki hal yoğunluğudur. Si için $N_c=2.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ tür. n-tipi bir yarıiletken $N_d \gg n_i$ olduğundan $n_0=N_d$ olur. Burada n_i intrinsic elektron konsantrasyonudur. Bu durum dikkate ifade;

$$N_d = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \quad (2.47)$$

olarak elde edilir. Son ifadenin logaritması alınır ve iletkenlik bandı referans seviyesi olarak ($E_c=0$) kabul edilirse;

$$E_f = kT \ln\left(\frac{N_d}{N_c}\right) \quad (2.48)$$

şeklindeki ifade Fermi enerji seviyesini vermiş olur. Ayrıca C-V grafiğinden ideal bir diyot için engel yüksekliği;

$$\Phi_b = E_f + V_d \quad (2.49)$$

ile verilir. İdeal olmayan bir durum için bu ifade;

$$\Phi_b = \frac{V_d}{n} + E_f \quad (2.50)$$

ile verilir. Bu ifadede elde edilen engel yüksekliği değerleri “düzeltilmiş engel yüksekliği” değerleri olarak adlandırılır (Aydoğan 2003).

2.8. Radyasyonun Yarıiletken Malzemelere Etkileri

Yarıiletken malzemeler radyasyon sonucu yüksek enerjili fotonlara ve parçacıklara maruz kalırlar. Yüksek enerjili parçacıklar enerjilerini yarıiletken malzemelere aktararak kusurlar oluştururlar. Bunlar yarıiletken malzemeler üzerinde iyonizasyon

zararları ve yerdeğiştirme zararları olmak üzere iki çeşitir. Radyasyon malzemeler üzerinde performans alçalmasına neden olan hasarlar oluşturur. Bu hasarlar; parçacıkların enerjilerine, kütlelerine, atom numaralarına, hedef malzemelerin kütlesine ve hedef atomların atom numarasına bağlıdır.

2.8.1. Radyasyon birimleri

Radyasyon, çeşitli kaynaklardan yayınlanan ve madde içine nüfuz edebilen girici ışınlar için kullanılan bir terimdir. Çeşidi türdeki radyasyonların enerjilerin bağlı olarak giricilikleri farklıdır. Çeşitli radyasyon birimleri aşağıda belirtilmiştir.

Aktivite birimi: Radyoaktif maddelerin birim zamandaki bozunma sayısıdır. Birimi Becquerel'dir (Bq). Kullanılan diğer birim Curie dir (Ci) ve $1 \text{ Bq} = 2.7 \times 10^{-11} \text{ Ci}$ 'dir.

Işınlama birimi: Birimi Röntgen'dir. Normal hava şartlarında havanın 1 kg'ında $2.58 \times 10^{-4} \text{ C}$ ' luk yük değerinde pozitif ve negatif iyon oluşturan ışın miktarıdır.

Soğurulmuş doz: Birimi Gray'dir (Gy). 1 kg'lık kütlede depolanan enerjinin ölçüsüdür. $1 \text{ Gray} = 1 \text{ joule/kg}$. Kullanılan eski birim rad'dır. $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$ 'dır.

Eşdeğer doz: Birimi Sievert'tir (Sv). Vücutta kg başına depolanan enerjinin değeridir. Kullanılan diğer birim rem'dir. $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$ 'dir.

Etkin doz: Doku ve organların aldığı dozun tüm vücut için yüklediği riski ifade eder. Birimi Sievert'tir. $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Sv}$ 'dir.

2.8.2. Elektron radyasyonu

Radyasyon kaynağı olarak elektron radyasyonu kullanılmıştır. Elektronların düşük enerjiye sahip oldukları için yarıiletken malzemelerin atom yapısını değiştirmemeleri, numunelerin homojen olarak ışınlanmaları, giriciliklerinin yüksek oluşu nedeniyle elektron radyasyonu tercih edilmiştir (Çınar 2008).

2.8.3. İyonizasyon zararları

Bir atomdan veya molekülden bir ya da daha fazla elektron uzaklaştırılması işlemine iyonizasyon denir. Radyasyon sonucu iyonizasyon sağlamak için gönderilen parçacıkların enerjisinin, atom veya molekülden bir elektron sökmek için yeterli kuantum enerjisine sahip olması gerekir. Yüksek enerjiye sahip olan X ışınları ve gama ışınları iyonizasyona sebep olurlar.

2.8.4. Yerdeğiştirme zararları

Radyasyon, kristal örgüden bir atom sökerek boşluk oluşturabilir. Sökülen atom boşluğun karşısına yerleşir. Bu durum yarıiletken malzemelerde örgü uyumunu bozduğu için “örgü kusuru” olarak tanımlanır. Parçacık ışınlamasıyla oluşturulan nokta kusurları yüksek enerjili olduğu için, örgü içinde uzak mesafeye gidebilir. Bu durum yüksek enerji ve büyük kütle için daha büyük bir olasılıktır. Yarıiletken malzemelerdeki yerdeğiştirme kusurları, malzemenin elektrik ve optik özellikleri üzerine büyük etkiler oluşturur. Bu etkiler;

- * Radyasyon sonucu oluşan kusurlar tarafından elektron-hol çifti üretimi
- * Radyasyon sonucu oluşan tuzak merkezleri tarafından elektron-hol çiftlerinin rekombinasyonu
- * Donor ve akseptörlerin telafisi
- * Taşıyıcıların tünellenmesi

Serbest taşıyıcı mobilitesi, yoğunluğu, direnci, oluşma ve yok olma ömürleri gibi önemli malzeme parametreleri yer değiştirme zararından etkilenir. Sonuç olarak radyasyona maruz kalan devre elemanları bundan olumsuz etkilenirler. Yarıiletken malzemelerde oluşan bu kusurları yok etme yöntemlerinden en önemlisi tavlama dır. Tavlama ile radyasyon altındaki devre elemanlarının ömrü uzatılabilir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Giriş

Bu kısım, Au/n-Si/AuSb Schottky kontaklarının yapımı için gerekli olan malzeme, numune hazırlanması, temizlenmesi ve kontakların üretimiyle ilgili gerekli bilgileri kapsamaktadır.

3.2. *n*-Si Kristalinin Temizlenmesi ve Numunenin Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan *n*-Si kristalleri 400 µm kalınlıkta ve 1-10 Ωcm öz direncine sahiptir. Kristallerin üzerinde mekanik temizleme yapıldığından yalnızca kimyasal temizleme yapıldı. Kimyasal temizleme için aşağıdaki işlem basamakları uygulandı:

- 1-Asetonda ultrasonik olarak 10 dakika yıkandı.
- 2-Metanolda ultrasonik olarak 10 dakika yıkandı.
- 3-Deiyonize su ile iyice yıkandı.
- 4-RCA1 (H₂O: HF: NH₃; 6:1:1)' de 60°C'de 10 dakika kaynatıldı.
- 5-Seyreltik HF (H₂O: HF; 10:1) ile 30 saniye yıkandı.
- 6-RCA2 (H₂O: H₂O₂: HCl; 6:1:1)' de 60°C'de 10 dakika kaynatıldı.
- 7-Deiyonize su ile iyice yıkandı.
- 8-Seyreltik HF (H₂O: HF; 10:1) ile 30 saniye yıkandı.
- 9-15-20 dakika akan deiyonize su içerisine konuldu ve sonra iyice kurutuldu.

Omik kontak yapımında numuneyi tavlama için konulacak kuartz pota, asetonla 5 dakika ve metanolle 5 dakika ultrasonik olarak yıkandı. Buharlaştırmada kullanılacak olan Au-Sb alaşımı %10 seyreltilmiş HF ile yıkandı ve kurutuldu.

İlk işlem olarak numunelerin mat tarafına omik kontak yapılması gerekir. Bunun için temizlenmiş olan numunelerin üzerine Au-Sb alaşımı kullanılmaktadır. Bu işlemde kullanılacak olan ısıtıcı %10 HCl ile 2 dakika yıkandı ve deiyonize su ile temizlenerek kurutuldu. Daha sonra vakum ünitesinde akkor hale getirilerek temizlendi. Kimyasal olarak temizlenmiş olan Au-Sb alaşımı ısıtıcı üzerine yerleştirilerek vakum sisteminde 10^{-5} torr basınç altında numunelerin mat yüzeyine buharlaştırıldı. Buharlaştırma işleminden sonra numunelerden birisi N_2 ortamında $420^{\circ}C$ 'de 3 dakika, diğeri de $450^{\circ}C$ 'de 3 dakika tavlama fırınında tavlandı. Böylece omik kontak işlemi tamamlanmış oldu. Buharlaştırma ünitesi ve tavlama fırını Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.1 Buharlaştırma ünitesi

İkinci aşamada numunelerin diğer yüzeylerine Schottky kontak yapıldı. Bunun için önceden hazırlanan ısıtıcı üzerine altın konulduktan sonra buharlaştırma ünitesine yerleştirildi. Numunelerin parlak yüzeylerine Schottky kontak yapımı için gölge maskeler yerleştirildi. 10^{-5} torrluk vakum altında buharlaştırma yapıldı. Böylece Schottky kontak yapımı tamamlandı.



Şekil 3.2 Tavlama fırını

3.3. Deney ve Ölçüm Sistemleri

Elde edilmiş olan Au/*n*-Si/AuSb Schottky diyotların I - V ölçümlerini almak için “KEITLEY 487 Picoammeter/Voltage Source” cihazı, C-V ve C-f ölçümlerini almak için “HEWLET PACKART 4192 A (50 Hz-13 MHz) LF IMPEDENCE ANALYZER” cihazı kullanıldı. Ölçümler oda sıcaklığında ve karanlık ortamda alındı. I - V ve C - V ölçüm sistemleri Şekil 3.3’te görülmektedir.

Işınlamada Siemens-Primus lineer elektron hızlandırıcı kullanıldı. Numuneler $3 \times 10^{12} \text{ e}^-/\text{cm}^2$ etkiye sahip elektron radyasyonuna maruz bırakıldı.



Şekil 3.3 Akım-gerilim, kapasite-gerilim ve kapasite-frekans ölçüm sistemi

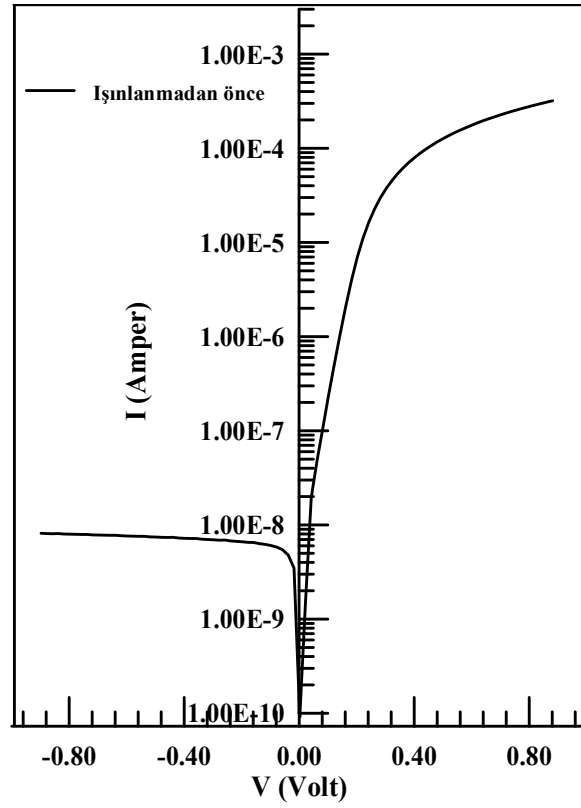
4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Giriş

Bu bölümde farklı sıcaklıklarda tavlanan Au/*n*-Si/AuSb diyotları farklı dozlarda elektron radyasyonuna maruz bırakılarak I - V ve C - V karakteristikleri yardımıyla radyasyonun diyotlar üzerindeki etkileri değerlendirilecektir.

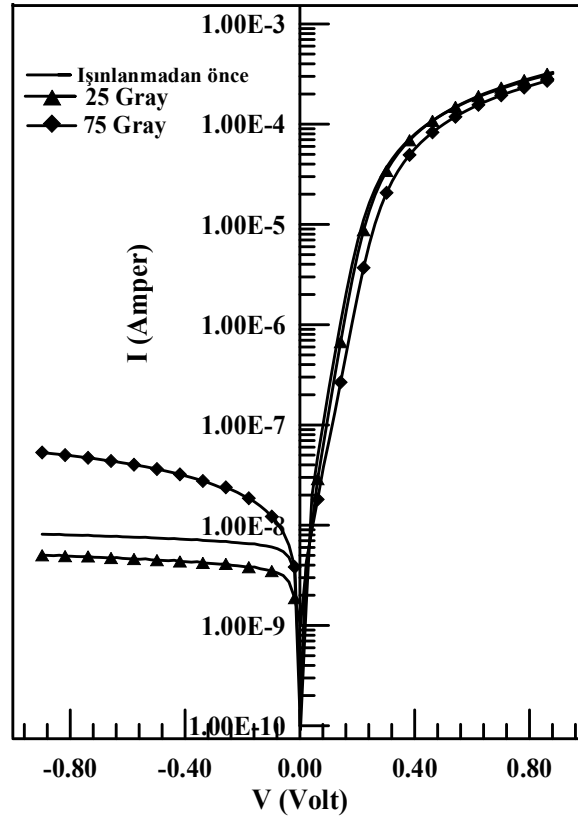
4.2. Radyasyona Bağlı I - V (Akım-Gerilim) Ölçümleri

D-1 ve D-2 diyotları belirli dozlarda radyasyona maruz bırakıldı. Radyasyondan önce ve radyasyondan sonra Schottky kontakların I - V ölçümleri KEITLEY 487 Picoammeter/Voltage Source cihazı ile ölçüldü. Bu ölçümler yardımıyla idealite faktörü ve engel yüksekliği hesaplandı. Radyasyondan önce D-1 Schottky diodunun idealite faktörü 1.152 ve engel yüksekliği 0.772 eV olarak bulundu. Şekil 4.1 ışınlanmadan önce D-1 diodunun I - V grafiğini göstermektedir.



Şekil 4.1 Işınlanmadan önce D-1 diyodunun I - V grafiği

25 gray ışınlanmadan sonra idealite faktörü 1.172 ve engel yüksekliği 0.780 eV olarak bulundu. 75 gray ışınlanmadan sonra ise idealite faktörü ve engel yüksekliği sırasıyla 1.254 ve 0.794 eV olarak bulundu. Çizelge 4.1’de görüldüğü gibi ışınlamayla idealite faktörü ve engel yüksekliği artış göstermiştir. 25 gray ışınlanmadan sonra ters beslem akımı azalmış, 75 gray ışınlanmadan sonra ise artış meydana gelmiştir (Ha *et al.* 2007). Artan ışınlamayla birlikte düz beslem akımında azalma meydana gelmiştir. Şekil 4.2 ışınlamalar sonucu elde edilen D-1 diyotunun I - V grafiğini göstermektedir.



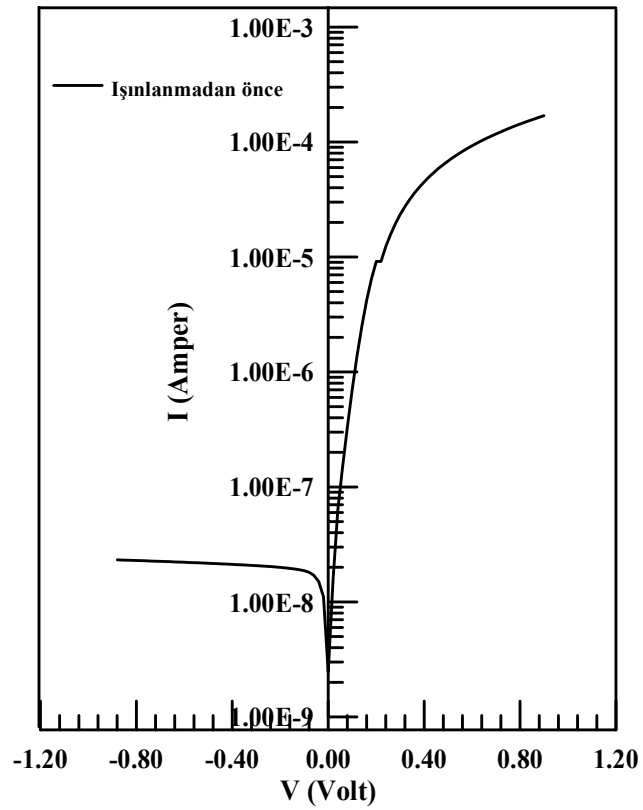
Şekil 4.2 Işınlanmalar sonucu elde edilen D-1 diyodunun I - V grafiği

Çizelge 4.1 D-1 diyodunun akımın gerilime bağlı değişiminden elde edilen deneysel verilerle bulunan idealite faktörü (n) ve engel yüksekliği (Φ_b) değerleri

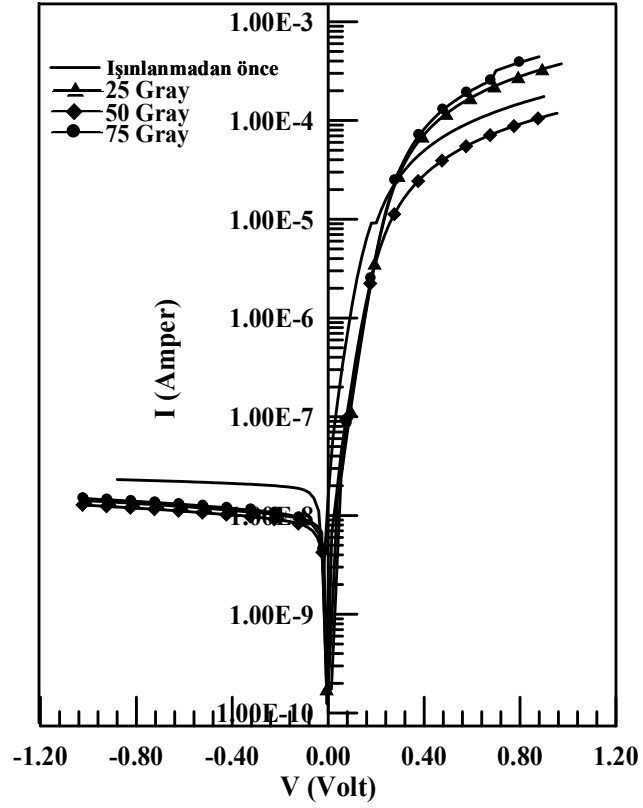
İşlem	n	Φ_b (eV)
Işınlanmadan önce	1.152	0.772
25 gray ışınlamadan sonra	1.172	0.780
75 gray ışınlamadan sonra	1.254	0.794

Işınlanmadan önce D-2 diyodunun idealite faktörü 1.231 engel yüksekliği 0.742 eV olarak bulundu. 25 gray ışınlamadan sonra idealite faktörü 1.306 , engel yüksekliği 0.768 eV olarak bulundu. 50 gray ışınlamadan sonra ise idealite faktörü 1.350 ve engel yüksekliği 0.761 eV olarak bulundu. 75 gray ışınlamadan sonra idealite faktörü 1.384

olarak engel yüksekliği ise 0.761 eV olarak bulundu (Çizelge 4.2). D-2 diyodunda da D-1 diyodunda olduğu gibi ışınlanmayla birlikte idealite faktörü ve engel yüksekliğinin arttığı görüldü. Artan ışınlamaya bağlı olarak ters beslem akımı ve düz beslem akımı azalmıştır (Karataş vd 2009). Şekil 4.3 D-2 diyodunun ışınlanmadan önce, Şekil 4.4 ışınlanmalar sonucu elde edilen I - V grafiklerini göstermektedir.



Şekil 4.3 Işınlanmadan önce D-2 diyodunun I - V grafiği



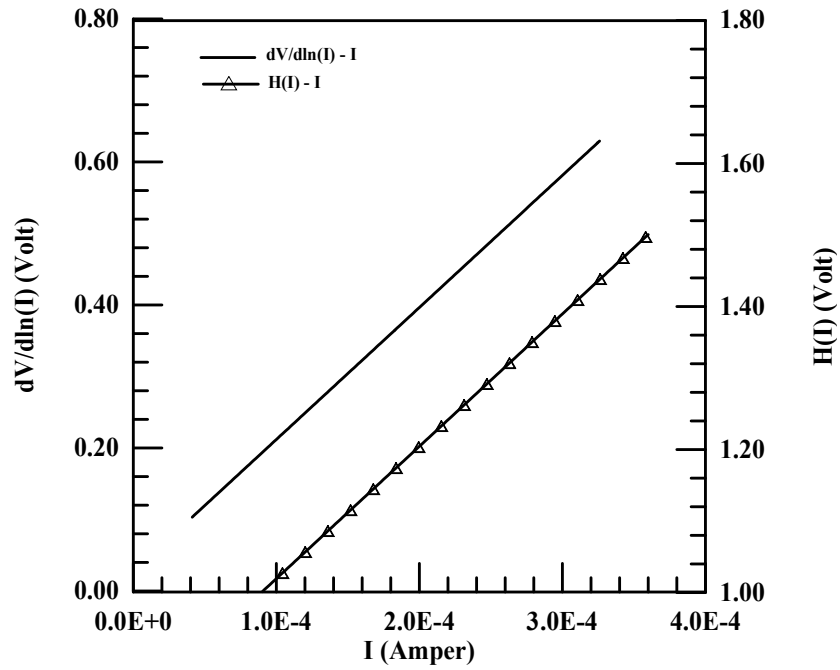
Şekil 4.4 Işınlanmalar sonucu elde edilen D-2 diyodunun I - V grafikleri

Çizelge 4.2 D-2 diyodunun akımın gerilime bağlı değişiminden elde edilen deneysel verilerle bulunan idealite faktörü (n) ve engel yüksekliği (Φ_b) değerleri

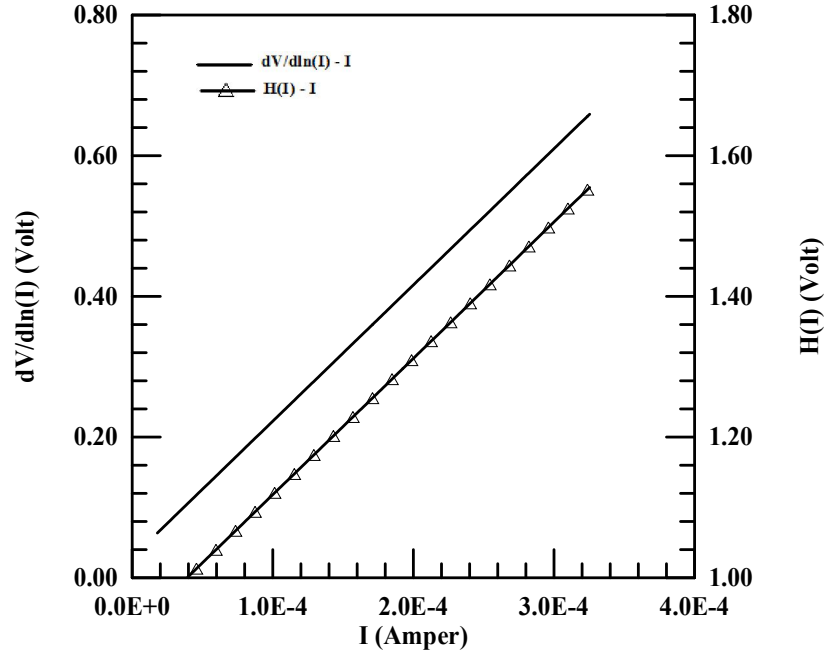
İşlem	n	Φ_b (eV)
Işınlanmadan önce	1.231	0.742
25 gray ışınlamadan sonra	1.306	0.768
50 gray ışınlamadan sonra	1.350	0.761
75 gray ışınlamadan sonra	1.384	0.761

4.3. Cheung Fonksiyonları Kullanılarak Yapılan Hesaplamalar

Cheung fonksiyonları yardımıyla $dV/d\ln(I)$ 'nın (I) 'ya karşı değişiminden yararlanarak seri direnç değerleri ve idealite faktörü hesaplanırken, $H(I)$ 'nın (I) 'ya karşı değişiminden yararlanarak yine seri direnç değerleri ve engel yükseklikleri hesaplandı. Şekil 4.5 D-1 diyodunun ışınlanmadan önce Şekil 4.6 ışınlanmadan sonra $dV/d\ln(I)$ - (I) ve $H(I)$ -(I) grafiklerini göstermektedir.



Şekil 4.5 Işınlanmadan önce D-1 diyodunun $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ 'nın (I) 'ya karşı değişim grafikleri



Şekil 4.6 75 gray ışınlanmadan sonra D-1 diyodunun $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ 'nin (I) 'ya karşı değişim grafikleri

Çizelge 4.3 D-1 diyodunun $dV/d\ln(I)$ 'nin (I) 'ya karşı değişiminden elde edilen seri direnç (R_s) ve idealite faktörü (n) değerleri

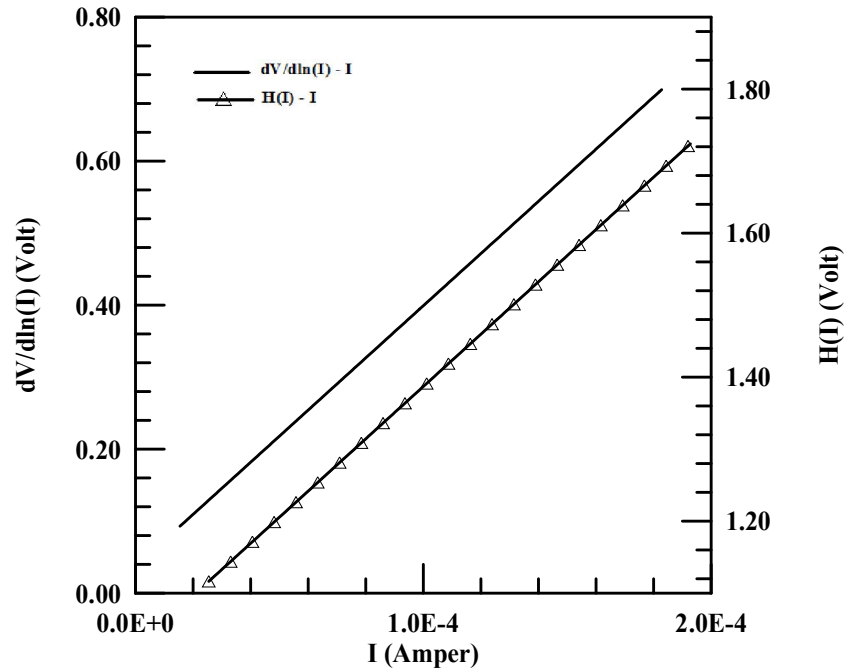
İşlem	R_s (Ω)	n
Işınlanmadan önce	1846	1.044
75 gray ışınlanmadan sonra	1934	1.131

Çizelge 4.4 D-1 diyodunun $H(I)$ 'nin (I) 'ya karşı değişiminden elde edilen seri direnç (R_s) ve engel yüksekliği (Φ_b) değerleri

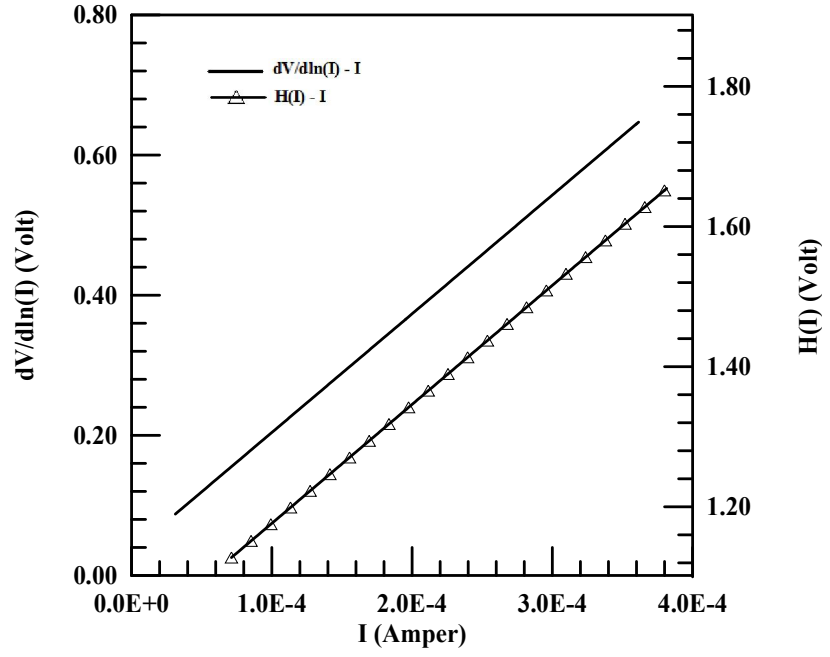
İşlem	R_s (Ω)	Φ_b (eV)
Işınlanmadan önce	1846	0.795
75 gray ışınlanmadan sonra	1937	0.818

Çizelge 4.3’de görüldüğü gibi $dV/d\ln(I)$ -(I) grafiğinden ışınlanmadan önce D-1 diyodunun idealite faktörü 1.044 seri direnç değeri 1846 Ω olarak hesaplanmıştır. Işınlanmadan sonra idealite faktörü 1.131, seri direnç değeri ise 1934 Ω olarak hesaplanmıştır. $H(I)$ -(I) grafiğinden seri direnç değeri ışınlanmadan önce 1846 Ω ışınlanmadan sonra ise 1937 Ω olarak bulunmuştur. Engel yüksekliği ışınlanmadan önce 0.795 eV, ışınlanmadan sonra 0.818 eV olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü üzere ışınlanmanın etkisiyle idealite faktörü, seri direnç değeri ve engel yüksekliği artış göstermiştir (Karadeniz 2007).

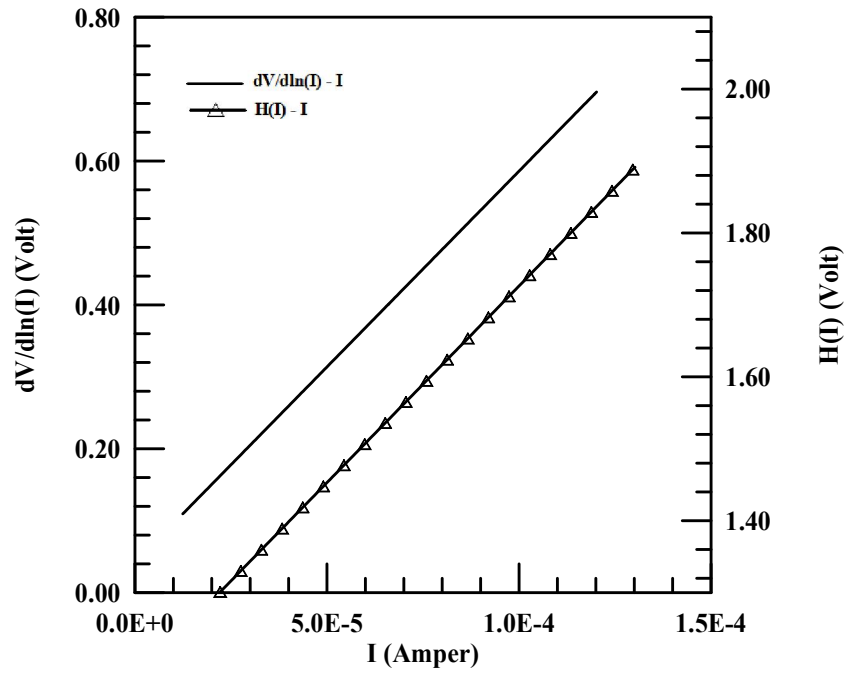
Şekil 4.7, 8, 9, 10 D-2 diyodunun ışınlanmadan önce ve ışınlanmalardan sonra $dV/d\ln(I)$ -(I) ve $H(I)$ -(I) grafiklerini göstermektedir.



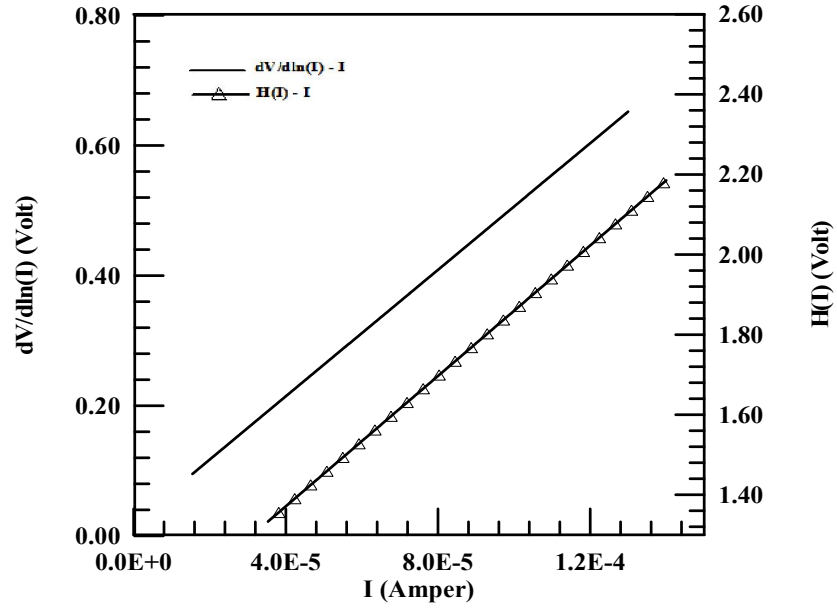
Şekil 4.7 Işınlanmadan önce D-2 diyodunun $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ ’nın (I)’ya karşı değişim grafikleri



Şekil 4.8 25 gray ışınlanmadan sonra D-2 diyodunun $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ 'nin (I) 'ya karşı değişim grafikleri



Şekil 4.9 50 gray ışınlanmadan sonra D-2 diyodunun $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ 'nin (I) 'ya karşı değişim grafikleri



Şekil 4.10 75 gray ışınlanmadan sonra D-2 diyodunun $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ 'nin (I) 'ya karşı değişim grafikleri

Çizelge 4.5 D-2 diyodunun $dV/d\ln(I)$ 'nin (I) 'ya karşı değişiminden elde edilen seri direnç (R_s) ve idealite faktörü (n) değerleri

İşlem	$R_s(\Omega)$	n
İşinlanmadan önce	3622	1.428
25 gray işinlanmadan sonra	1693	1.342
50 gray işinlanmadan sonra	5463	1.555
75 gray işinlanmadan sonra	6552	1.712

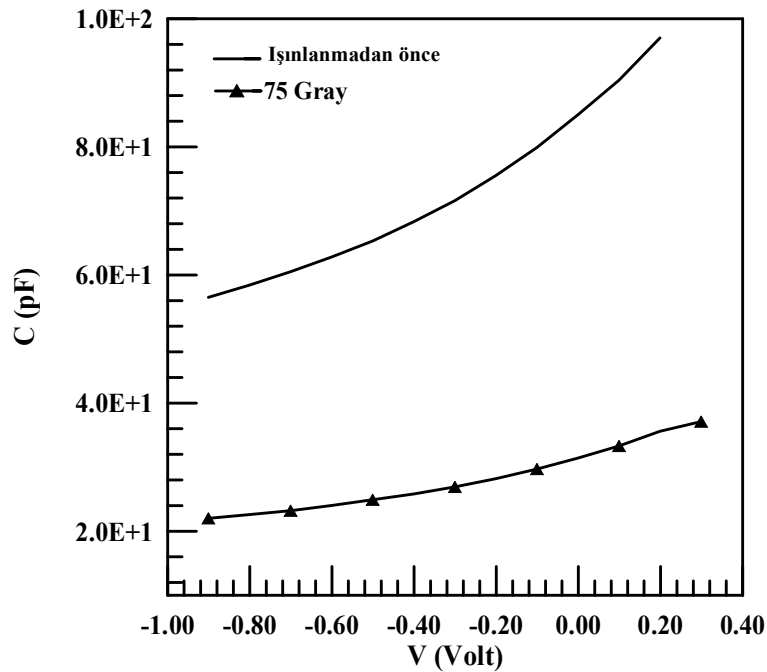
Çizelge 4.6 D-2 diyodunun $H(I)$ 'nın I 'ya karşı değişiminden elde edilen seri direnç (R_s) ve engel yüksekliği (Φ_b) değerleri

İşlem	$R_s(\Omega)$	Φ_b (eV)
Işınlanmadan önce	3626	0.717
25 gray ışınlanmadan sonra	1696	0.751
50 gray ışınlanmadan sonra	5493	0.738
75 gray ışınlanmadan sonra	6577	0.764

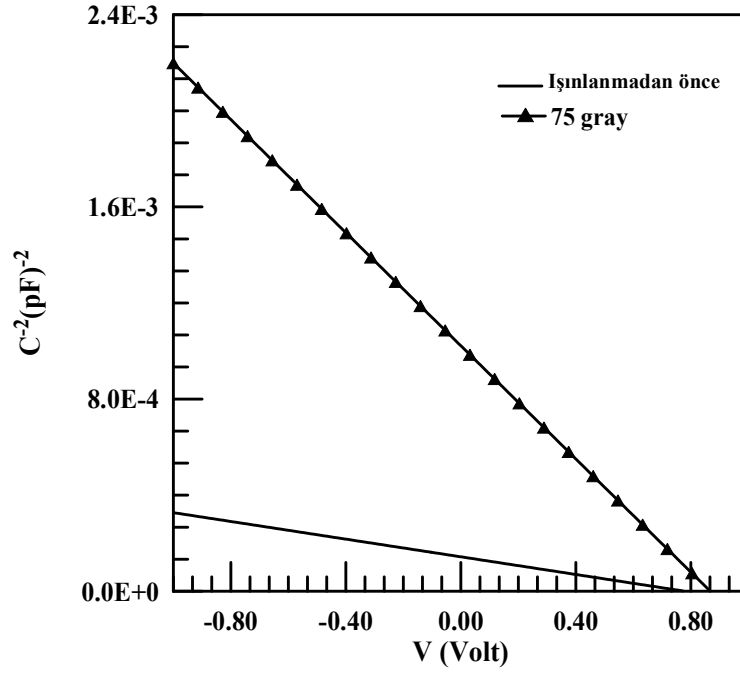
D-2 diyodunun $dV/d\ln(I)-(I)$ grafiğinden ışınlanmadan önce idealite faktörü 1.428 seri direnç değeri 3622 Ω olarak hesaplanmıştır. 25 gray ışınlanmadan sonra idealite faktörü 1.342, seri direnç değeri ise 1693 Ω olarak hesaplanmıştır. 50 gray ışınlanmadan sonra idealite faktörü 1.555, seri direnç değeri ise 5463 Ω olarak hesaplanmıştır. 75 gray ışınlanmadan sonra idealite faktörü 1.712, seri direnç değeri ise 6552 Ω olarak hesaplanmıştır. $H(I)-(I)$ grafiğinden seri direnç değeri ışınlanmadan önce 3626 Ω , 25 gray ışınlanmadan sonra ise 1696 Ω , 50 gray ışınlanmadan sonra ise 5493 Ω , 75 gray ışınlanmadan sonra ise 6557 Ω olarak bulunmuştur. Engel yüksekliği ışınlanmadan önce 0.717 eV, 25 gray ışınlanmadan sonra 0.751 eV, 50 gray ışınlanmadan sonra 0.738 eV, 75 gray ışınlanmadan sonra 0.764 eV olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü üzere D-2 diyodunda da D-1 diyodunda olduğu gibi ışınlamanın etkisiyle idealite faktörü, seri direnç değeri ve engel yüksekliği artış göstermiştir (Çizelge 4.6).

4.4. Radyasyona Bağlı $C-V$ (Kapasite-Gerilim) Ölçümleri

$C-V$ ölçümleri 100 kHz’de HP-4192 A kapasitemetresi kullanılarak alındı. Bu ölçümler yardımıyla D-1 ve D-2 Schottky diyotlarının difüzyon potansiyeli, Fermi enerji seviyesi ve donör konsantrasyonu hesaplandı. Işınlanmadan önce D-1 diyodunun difüzyon potansiyeli 0.734 eV, donör konsantrasyonu $1.03 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, Fermi enerji seviyesi 0.264 eV ve engel yüksekliği 0.998 eV olarak bulundu. 75 gray ışınlanmadan sonra difüzyon potansiyeli 0.867 eV, donör konsantrasyonu $1.66 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, Fermi enerji seviyesi 0.311 eV ve engel yüksekliği 1.178 eV olarak bulundu. Çizelge 4.7’de görüldüğü gibi difüzyon potansiyeli, Fermi enerji seviyesi ve engel yüksekliği artan radyasyonla birlikte artış gösterirken donör konsantrasyonunda azalma meydana gelmektedir. Şekil 4.11 ışınlanmadan önce ve ışınlanmadan sonra D-1 diyodunun $C-V$ grafiklerini, Şekil 4.12 ışınlanmadan önce ve ışınlanmadan sonra elde edilen $1/C^2-V$ grafiklerini göstermektedir.



Şekil 4.11 Işınlanmadan önce ve sonra D-1 diyodunun 100 kHz’de alınan $C-V$ grafikleri



Şekil 4.12 Işınlanmadan önce ve sonra D-1 diyodunun 100 kHz’de $1/C^2$ - V grafikleri

Çizelge 4.7 D-1 diyodunun radyasyona bağlı olarak elde edilen Schottky kontak değerleri

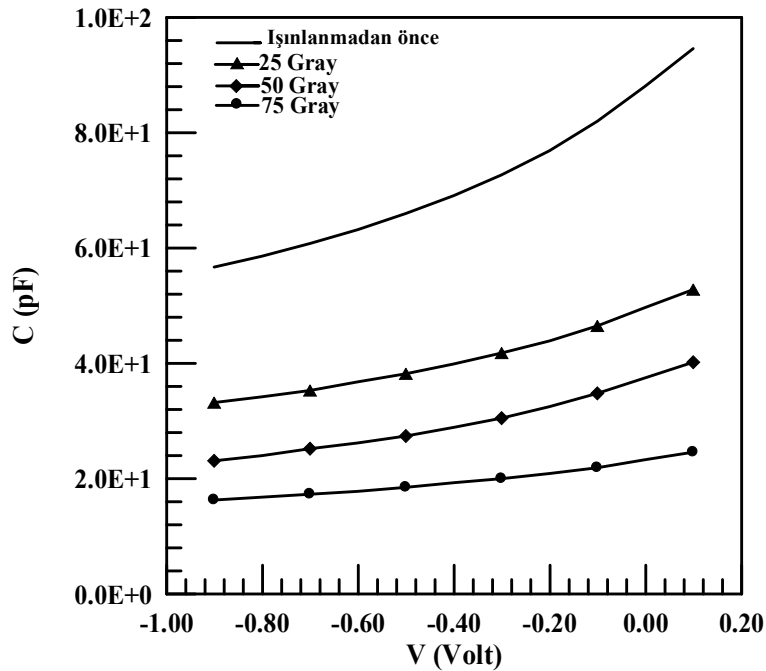
İşlem	V_{dif} (eV)	N_d (cm ⁻³)	E_f (eV)	Φ_b (eV)
Işınlanmadan önce	0.734	1.03×10^{15}	0.264	0.998
75 gray ışınlanmadan sonra	0.867	1.66×10^{14}	0.311	1.178

Işınlanmadan önce D-2 diyodunun difüzyon potansiyeli 0.642 eV, donör konsantrasyonu $9.74 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, Fermi enerji seviyesi 0.266 eV ve engel yüksekliği 0.907 eV olarak bulundu.

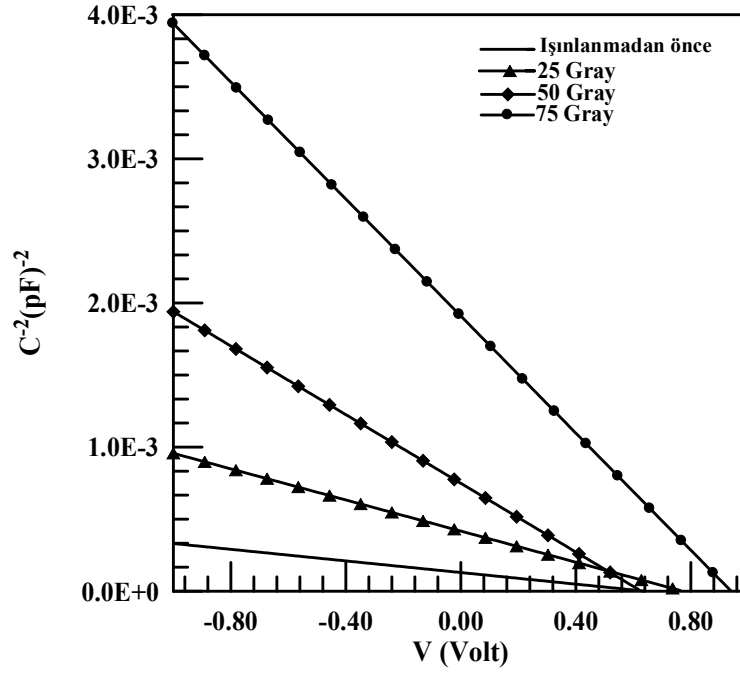
25 gray ışınlanmadan sonra difüzyon potansiyeli 0.733 eV, donör konsantrasyonu $3.53 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, Fermi enerji seviyesi 0.292 eV ve engel yüksekliği 1.025 eV olarak bulundu.

50 gray ışınlanmadan sonra difüzyon potansiyeli 0.560 eV, donör konsantrasyonu $1.55 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, Fermi enerji seviyesi 0.313 eV ve engel yüksekliği 0.873 eV olarak bulundu.

75 gray ışınlanmadan sonra difüzyon potansiyeli 0.878 eV, donör konsantrasyonu $9.26 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, Fermi enerji seviyesi 0.326 eV ve engel yüksekliği 1.204 eV olarak bulundu. Çizelge 4.8’de görüldüğü gibi difüzyon potansiyeli, Fermi enerji seviyesi ve engel yüksekliği artan radyasyonla birlikte artış gösterirken donör konsantrasyonunda azalma meydana gelmektedir (Selçuk ve Ocak 2007). Şekil 4.13 ışınlanmadan önce ve ışınlanmadan sonra D-2 diyodunun C - V grafiklerini, Şekil 4.14 ışınlanmadan önce ve ışınlanmadan sonra elde edilen I/C^2 - V grafiklerini göstermektedir.



Şekil 4.13 Işınlanmalardan önce ve sonra D-2 diyodunun 10 kHz’de alınan C - V grafiğikleri



Şekil 4.14 Işınlanmadan önce ve sonra D-2 diyodunun 10 kHz’de I/C^2 - V grafikleri

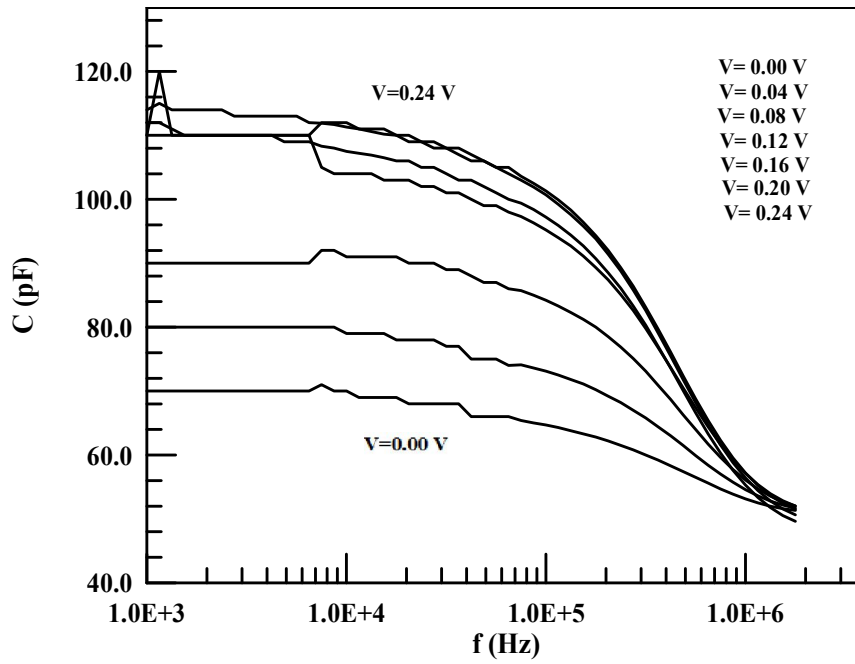
Çizelge 4.8 D-2 diyodunun radyasyona bağlı olarak elde edilen Schottky kontak değerleri

İşlem	V_{dif} (eV)	N_d (cm ⁻³)	E_f (eV)	Φ_b (eV)
Işınlanmadan önce	0.642	9.74×10^{14}	0.266	0.907
25 gray ışınlıktan sonra	0.733	3.53×10^{14}	0.292	1.025
50 gray ışınlıktan sonra	0.560	1.55×10^{14}	0.313	0.873
75 gray ışınlıktan sonra	0.878	9.26×10^{13}	0.326	1.204

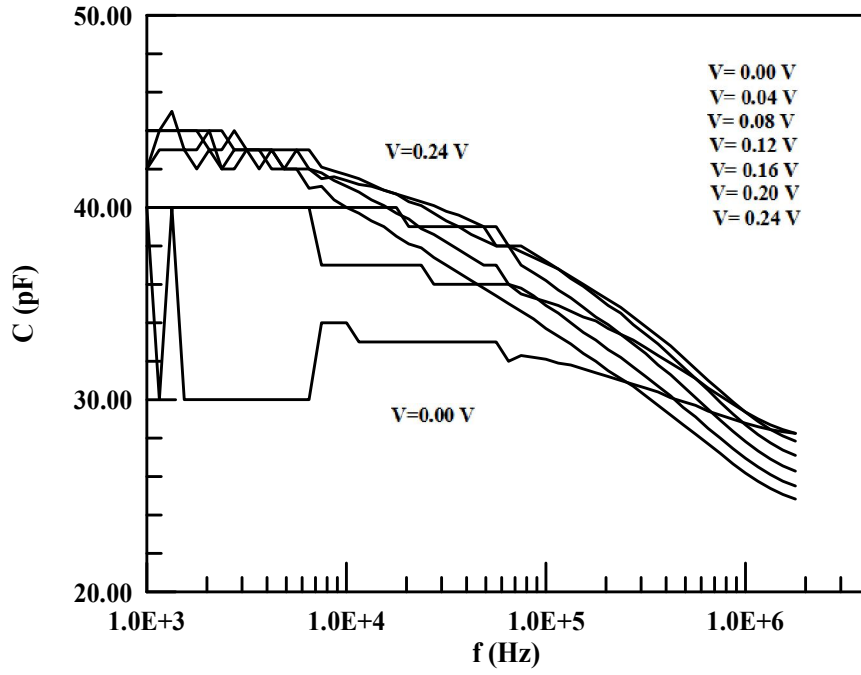
4.5. Radyasyona Bağlı C - f (Kapasite-Frekans) Ölçümleri

D-1 diyodu ve D-2 diyodu için (C - f) ölçümleri 1kHz-10MHz aralığında radyasyondan önce ve radyasyondan sonra farklı gerilim değerlerinde alındı. D-1 diyodu için ölçümler; 0.00 V, 0.04 V, 0.08 V, 0.12 V, 0.16 V, 0.20 V ve 0.24 V sabit gerilim değerleri altında alındı. D-2 diyodu için ise ölçümler; 0.00 V, 0.04 V, 0.08 V, 0.12 V,

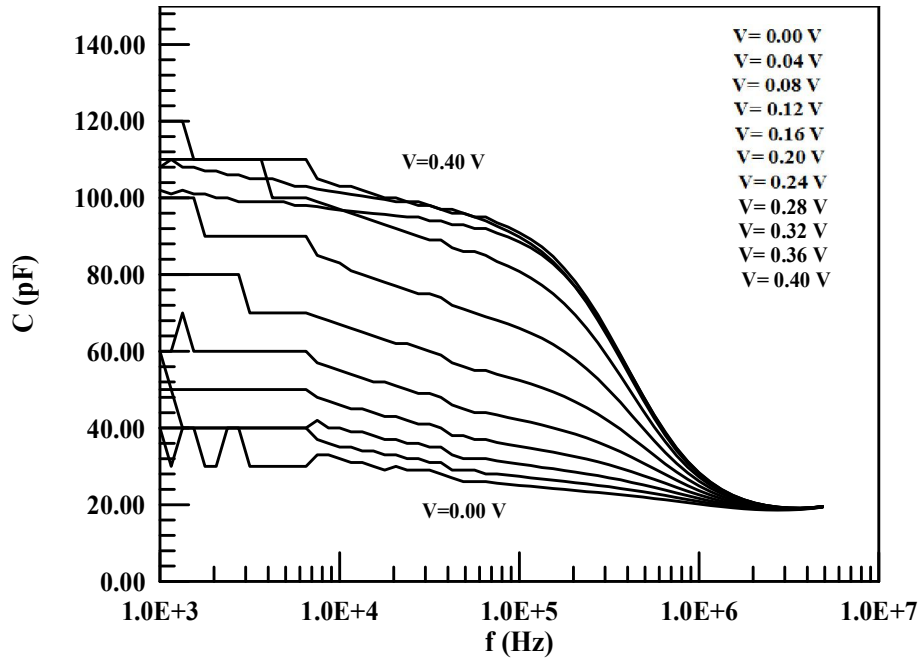
0.16 V, 0.20 V, 0.24 V, 0.28 V, 0.32 V, 0.36 V ve 0.40 V sabit gerilim değerleri altında alındı. Böylece hem gerilimin hem de radyasyonun kapasite üzerindeki etkisi incelenmiş oldu. Şekil 4.15 ve 4.16 D-1 diyodunun, Şekil 4.17, 18, 19 ve 20 D-2 diyodunun radyasyondan önce ve radyasyondan sonra elde edile C - f grafiklerini göstermektedir.



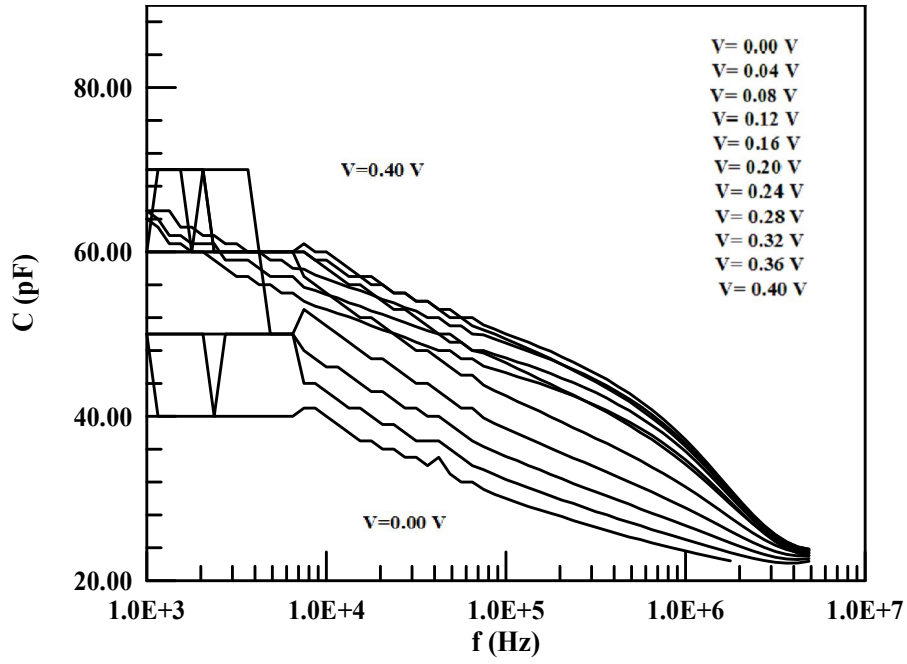
Şekil 4.15 Işınlanmadan önce D-1 diyodunun 0.04 Volt'luk adımlarla 0.00 V-0.24 V aralığında elde edilen C 'nin f 'ye karşı değişim grafikleri



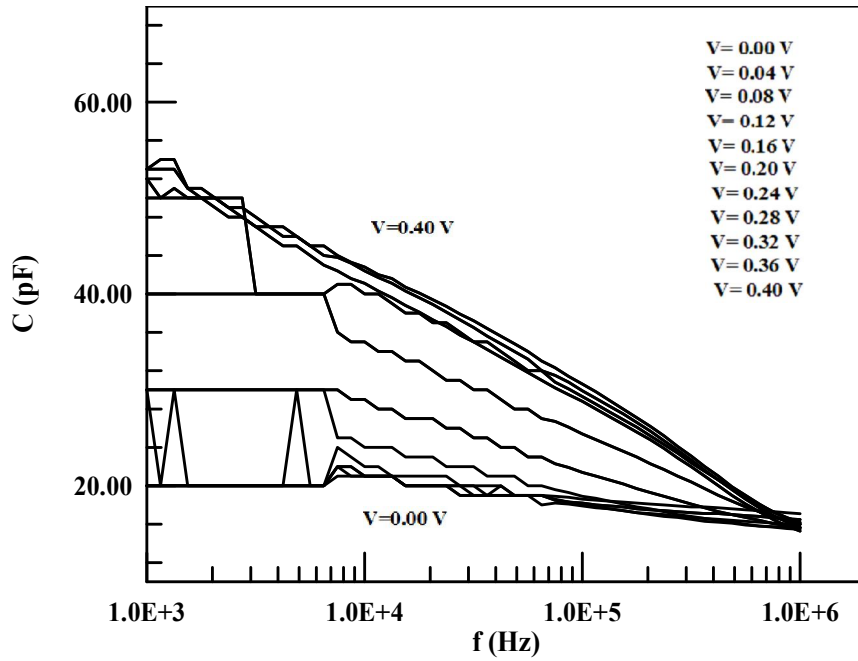
Şekil 4.16 75 gray ışınlanmadan sonra D-1 diyodunun 0.04 Volt'luk adımlarla 0.00 V-0.24 V aralığında elde edilen C'nin f'ye karşı değişim grafikleri



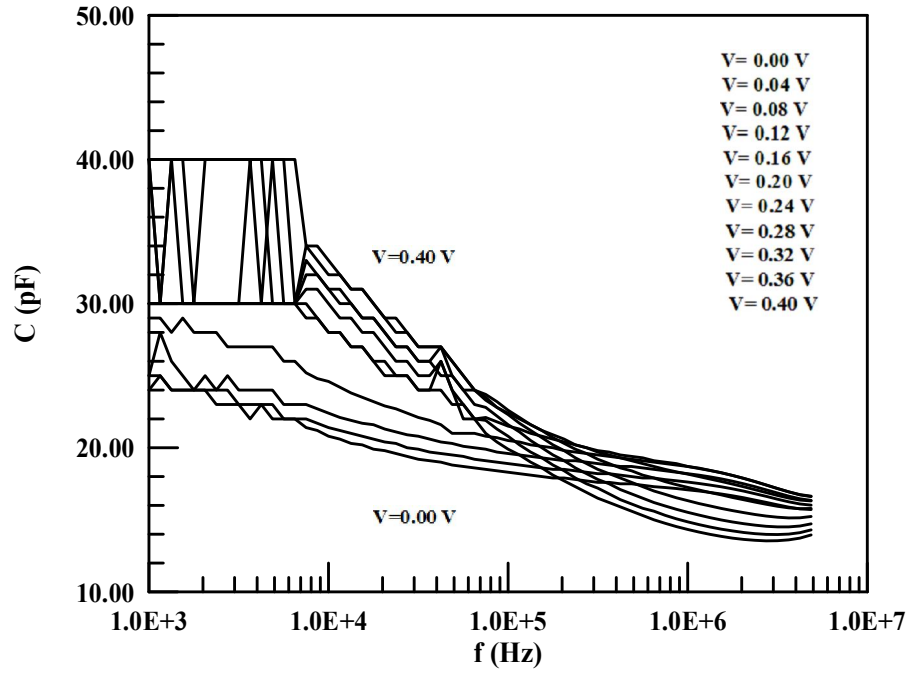
Şekil 4.17 Işınlanmadan önce D-2 diyodunun 0.04 Volt'luk adımlarla 0.00 V-0.40 V aralığında elde edilen C'nin f'ye karşı değişim grafikleri



Şekil 4.18 25 gray ışınlanmadan sonra D-2 diyodunun 0.04 Volt'luk adımlarla 0.00 V-0.40 V aralığında elde edilen C 'nin f 'ye karşı değişim grafikleri



Şekil 4.19 50 gray ışınlanmadan sonra D-2 diyodunun 0.04 Volt'luk adımlarla 0.00 V-0.40 V aralığında elde edilen C 'nin f 'ye karşı değişim grafikleri



Şekil 4.20 75 gray ışınlanmadan sonra D-2 diyodunun 0.04 Volt'luk adımlarla 0.00 V-0.40 V aralığında elde edilen C 'nin f 'ye karşı değişim grafikleri

Hem D-1 diyodunda hem de D-2 diyodunda ışınlamayla birlikte kapasite azalmaktadır. Ayrıca frekansın artmasıyla birlikte kapasitenin azaldığı görülmektedir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

5.1 Giriş

Bu çalışmada, [100] doğrultusunda büyütülmüş, 400 μm kalınlığında, 1-10 Ωcm öz direncine sahip n -Si yarıiletken kristali kullanıldı. Kristale Au-Sb alaşımı buharlaştırılarak omik kontak ve Au metali kullanılarak Schottky kontak yapıldı. Farklı sıcaklıklarda tavlanan Au/ n -Si/Au-Sb Schottky kontaklarının I - V ve C - V değişimleri ve bu değişimler üzerine elektron radyasyonunun etkisi çalışıldı.

Elektron radyasyonunun kontağı kirletmemesi ve kontak yüzeyin homojen olarak etki etmesinden dolayı tercih edilmiştir. Radyasyon kaynağı olarak $3 \times 10^{12} \text{ e}^-/\text{cm}^2$ doza sahip kaynak kullanıldı.

5.2 Radyasyona Bağlı I - V Ölçümlerinin Tartışılması

Diyotların I - V ölçümleri “ KEITLEY 487 Picoammeter/Voltage Source” cihazı ile (+1) V-(-1) V aralığında alındı. D-1 diyodu için ışınlanmadan önce ve 25 ve 75 gray ışınlanmadan sonra idealite faktörü sırasıyla 1.152, 1.172 ve 1.254 olarak bulundu. D-2 diyodu için ışınlanmadan önce ve 25, 50 ve 75 gray ışınlanmadan sonra idealite faktörü sırasıyla 1.231, 1.306, 1.350 ve 1.384 olarak bulundu. Cheung fonksiyonları yardımıyla D-1 diyodunun idealite faktörü ışınlanmadan önce ve ışınlamalardan sonra sırasıyla 1.044 ve 1.131 olarak, D-2 diyodunun ise 1.428, 1.342, 1.555 ve 1.712 olarak bulundu. D-1 diyodunun 25 gray ışınlamayla birlikte ters beslem akımının artmasının sebebi; radyasyon sonucu oluşan örgü kusurları nedeniyle bulk deplasyon bölgesinde taşıyıcıların oluşmasındandır (Krishnan *et al.* 2008). Ters beslem akımındaki azalmanın sebebi ise; ışınlamayla birlikte oluşan derin seviyelerin rekombinasyon merkezi olarak davranmalarıdır (Güllü vd 2008). Artan dozadaki radyasyonla birlikte her iki diyot için idealite faktörünün artması, diyotların akım taşıma mekanizmalarının termoiyonik

emisyona teoriden sapmasıyla açıklanır. Işınlamayla birlikte arayüzeyde oluşan kusurlar, tuzak ve rekombinasyon merkezleri olarak davranır. Arayüzeyde oluşan bu homojensizlik idealite faktörünün artmasına neden olur. İdealite faktöründeki bu artış; imaj kuvveti etkisi, rekombinasyon, oluşum ve tünelleme gibi nedenlere atfedilir (Krishnan *et al.* 2008).

D-1 diyodu için engel yüksekliği ışınlanmadan önce 0.772 eV, 25 gray ışınlanmadan sonra 0.780 eV, 75 gray ışınlanmadan sonra 0.794 eV olarak bulundu. D-2 diyodu için engel yüksekliği ışınlanmadan önce, 25 gray, 50 gray ve 75 gray ışınlanmadan sonra sırasıyla; 0.742 eV, 0.768 eV, 0.761 eV ve 0.761 eV olarak bulundu. Cheung fonksiyonlarıyla bulunan değerler D-1 diyodu için 0.795eV ve 0.818 eV olarak, D-2 diyodu için ise 0.717 eV, 0.751 eV, 0.738 eV ve 0.764 eV olarak bulundu. Engel yüksekliğinin her iki diyot için artma eğiliminde olduğu gözlemlendi (Vaitkus *et al.* 1998; Bose *et al.* 2001). Engel yüksekliğinde ışınlamayla meydana gelen artış; arayüzey kusur yoğunluğunun artması ve buna bağlı olarak da arayüzeyde taşıyıcıların tuzaklanmasına atfedildi (Uğurel vd 2008).

$dV/d\ln(I)$ 'nın I 'ya karşı çizilen grafiğinden elde edilen seri direnç değerleri; D-1 diyodu için ışınlanmadan önce ve 75 gray ışınlanmadan sonra 1846 Ω ve 1934 Ω olarak, D-2 diyodu için ışınlanmadan önce, 25 gray, 50 gray ve 75 gray ışınlanmadan sonra sırasıyla 3622 Ω , 1693 Ω , 5463 Ω ve 6552 Ω olarak bulundu. $H(I)$ 'nın I 'ya karşı değişiminden elde edilen seri direnç değerleri; D-1 diyodu için ışınlanmadan önce ve 75 gray ışınlanmadan sonra sırasıyla 1846 Ω ve 1937 Ω olarak, D-2 diyodu için ışınlanmadan önce, 25 gray, 50 gray ve 75 gray ışınlanmadan sonra sırasıyla; 3626 Ω , 1696 Ω , 5493 Ω ve 6557 Ω olarak bulundu. $dV/d\ln(I)$ - I ve $H(I)$ - I grafiklerinden elde edilen değerlerin birbirleriyle uyum içinde olduğu gözlemlendi (Karataş ve Türüt 2006). Artan ışınlamanın etkisiyle seri direnç değerinde artış olduğu gözlemlendi. Bu durum ışınlamanın taşıyıcı konsantrasyonunu azaltmasının ve böylece seri dirençte artışa neden olmaktadır şeklinde yorumlandı. D-2 diodunun seri direncinin 25 graylık ışınlanmadan sonra artması ışınlamayla kristalde yeni taşıyıcıların oluşmasına bağlandı (Coşkun 2006).

5.3 Radyasyona Bağlı C-V Ölçümlerinin Tartışılması

C-V ölçümlerini almak için “HEWLET PACKART 4192 A (50 Hz-13 MHz) LF IMPEDENCE ANALYZER” cihazı kullanıldı. D-1 diyodu için difüzyon potansiyeli ışınlanmadan önce 0.734 eV, 75 gray ışınlanmadan sonra 0.867 eV olarak bulundu. D-2 diyodu için difüzyon potansiyeli ışınlanmadan önce, 25 gray, 50 gray ve 75 gray ışınlanmadan sonra sırasıyla; 0.642 eV, 0.733 eV, 0.560 eV ve 0.878 eV olarak bulundu. Artan ışınlanmayla birlikte difüzyon potansiyelinde artış meydana geldi.

D-1 diyodu için Fermi enerji seviyesi ışınlanmadan önce 0.264 eV, 75 gray ışınlanmadan sonra 0.311 eV olarak bulundu. D-2 diyodu için Fermi enerji seviyesi ışınlanmadan önce, 25 gray, 50 gray ve 75 gray ışınlanmadan sonra sırasıyla; 0.266 eV, 0.292 eV, 0.313 eV ve 0.326 eV olarak bulundu. Artan ışınlanmayla birlikte Fermi enerji seviyesinde artış meydana geldi (Brudnyi *et al.* 2004; Çınar 2008).

Donor konsantrasyonu D-1 diyodu için ışınlanmadan önce $1.03 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ışınlanmadan sonra $1.66 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulundu. D-2 diyodu için ise ışınlanmadan önce, 25 gray, 50 gray ve 75 gray ışınlanmadan sonra sırasıyla; $9.74 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $3.53 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $1.55 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ve $9.26 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulundu. Bu sonuç ışınlama sonucu oluşan tuzakların yarıiletkenin serbest taşıyıcı yoğunluğunu azaltması olarak açıklandı (Prochazkova *et al.* 2005).

D-1 diyodu için engel yüksekliği ışınlanmadan önce 0.998 eV ve 75 gray ışınlanmadan sonra 1.178 eV olarak bulundu. D-2 diyodu için engel yüksekliği ışınlanmadan önce, 25 gray, 50 gray ve 75 gray ışınlanmadan sonra sırasıyla 0.907 eV, 1.025 eV, 0.873 eV ve 1.204 eV olarak bulundu. Artan ışınlamayla birlikte kapasitede azalma meydana geldi. Bu sonuç ışınlamayla arayüzey bölgesinin dielektrik sabitinin değişimine veya iyonize olmuş donör konsantrasyonunun azalmasına atfedilir.

5.4 Radyasyona Bağlı C - f Ölçümlerinin Tartışılması

Kapasitenin ışınlamaya ve frekansa bağlı olarak değişimi incelendi. Her iki diyot için de ışınlamayla kapasitenin azaldığı gözlemlendi. Artan doz ile kapasitede meydana gelen azalma arayüzey bölgenin dielektrik sabitinin değişimine veya iyonize olmuş yük konsantrasyonunun azalmasına atfedildi (Uğurel vd 2008).

Düşük frekanslarda kapasite değeri yüksek, yüksek frekanslarda kapasitenin düşük değerlerde bulunmuştur. Bu durum; diyodun arayüzeyindeki mevcut hallerin düşük frekanslarda alternatif akım sinyalini takip ederek kapasiteye katkıda bulunabilmeleri, buna karşılık yüksek frekanslarda arayüzey hallerinin alternatif akım sinyalini takip edememesi ve kapasiteye katkıda bulunamamasına atfedildi (Güllü vd 2008). Frekans değişiminden dolayı kapasitede oluşan bu fark arayüzey hallerinden kaynaklanır ve “artık sığa” olarak adlandırılır. Yüksek frekanslardaki kontak sığası sadece uzay yükü kapasitesinden ibarettir. Düşük frekanslarda ise; uzay yükü kapasitesiyle, arayüzey hallerinden ileri gelen kapasitenin toplamına eşittir (Temirci 2000; Tataroğlu ve Altındal 2007).

KAYNAKLAR

- Akkılıç, K., Kılıçoğlu, T., Türüt, A., 2003. Linear Correlation Between Barrier Heights and Ideality Factors of Sn/n-Si Schottky Diodes With and Without the Interfacial Native Oxide Layer. *Physica. B*, 337, 388-393.
- Aydoğan, S., 2003. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Erzurum.
- Brudnyi, V. N., Grinyaev, S. N., Kolin, N. G., 2004. A model for Fermi-level pinning in semiconductors: radiation defects, interface boundaries. *Physica B*. 348, 213–225.
- Bose, S., Gupta, M., Gupta, R. S., 2001. *I-V* characteristics of optically biased short channel GaAs MESFET. *Microelectronics Journal*. 32, 241–247.
- Cheung, S. K., ve Cheung, N. W., 1986. Extraction of Schottky Diode Parameters From I-V Characteristics. *Appl. Phys. Lett*, 49, 85-87.
- Coşkun, C., 2006. The effect of high-energy electron irradiation on ZnO-based ohmic and Schottky contacts. *Semiconductor Science and Technology* 21,1656-1660
- Çınar, K., 2008. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Erzurum.
- Çınar, K., Coşkun, C., Gür, E., Aydoğan, Ş., 2009. Radiation effects on ohmic and Schottky contacts based on 4H and 6H-SiC. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 267, 87-90
- Dökme, İ., Durmuş, P., Altındal, Ş., 2008. Effects of γ -ray irradiation on the C–V and G/ω –V characteristics of Al/SiO₂/p-Si (MIS) structures. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 266, 791-796
- Güllü, Ö., Aydoğan, Ş., Şerifoğlu, K., Türüt, A., 2008. Electron irradiation effects on the organic-on-inorganic silicon Schottky structure. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 593, 544-549.
- 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*, 82, 789-793.
- Ha, J. H., Kang, S. M., Park, S.H., Kim, H. S., Cho, Y. H., Lee, J. H., Lee, N. H., Kim, J. B., Kim, Y. K., 2007. Annealing effect of the 6H-SiC semiconductor detector for alpha particles. *Radiation Measurements*, 43, 1140-1143.
- Heine, V., 1965. Theory of surface states. *Phys. Rev.*, 138A: 1689.
- Karadeniz, S., 2007. ⁶⁰Co γ -ray irradiation effects on dielectric characteristics of tin oxide films of different thicknesses on n-type Si(111) substrates. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 260, 571-578.
- Karataş, Ş., Türüt, A., 2006. Electrical properties of Sn/p-Si (MS) Schottky barrier diodes to be exposed to ⁶⁰Co γ -ray source. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 566, 584-589.

- Karataş, Ş., Türüt, A., Altındal, Ş., 2005. Effects of ^{60}Co γ -ray irradiation on the electrical characteristics of Au/n-GaAs (MS) structures. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 555, 260-265.
- Karataş, Ş., Türüt, A., Altındal, Ş., 2009. Irradiation effects on the C-V and G/ω -V characteristics of Sn/p-Si (MS) structures. *Radiation Physics and Chemistry* 78, 130-134.
- Krishnan, S., Sanjeev, G., Pattabi, M., 2008. Electron irradiation effects on the Schottky diode characteristics of p-Si. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 266, 621-624.
- Neamen, D. A., 1992. *Semiconductors Physics and Devices*, R. R. Donnelley & Sons Company, Sydney.
- Prochazkova, O., Grym, J., Zavadil, J., Zdansky, K., 2005. Preparation of p-type InP layers for detection of radiation. *Journal of Crystal Growth*, 275, 959-963.
- Rhoderick, E. H., 1982. *Metal-Semiconductor contacts*. Proc. Inst. Electr. Eng., 129, 1
- Rhoderick, E. H., and Williams, R. H., 1988. *Metal-Semiconductor contacts*. 2nd ed. Clarendon, Oxford.
- 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, 123502-123509.
- Sağlam, M., Ayyıldız, E., Gümüş, A., Efeoğlu, H., Tüzemen, S., 1996. Series Resistance Calculation for The Metal-Insulator-Semiconductor Schottky Barrier Diodes. *Appl. Phys. A*, 62, 269-273.
- Schottky, W., 1938. The development of silicon crystal rectifiers for microwave radar receivers, *Z. Phys.*, 113, 367-414.
- Selçuk, A. B., Ocak, S. B., 2007. ^{60}Co γ -ray irradiation effects on the capacitance and conductance characteristics of tin oxide films on Si. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 577, 719-723.
- Sharma, B. L. ve Gupta, S. C., 1980. Metal-semiconductor Schottky barrier junctions-1: Fabrication. *Solid State Technol.*, 23 (5), 97.
- Sharma, B. L. ve Gupta, S. C., 1980. Metal-semiconductor Schottky barrier junctions-2: Fabrication. *Solid State Technol.*, 23 (6), 90.
- Sze, M., 1969. *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley and Sons, New York.
- Tataroğlu, A., Altındal, Ş., 2007. The effects of frequency and γ -irradiation on the dielectric properties of MIS type Schottky diodes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 254, 113-117.
- Tataroğlu, A., Altındal, Ş., 2006. Electrical characteristics of ^{60}Co γ -ray irradiated MIS Schottky diodes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 252, 257-262.
- Türüt, A., Sağlam, M., 1992. Determination of The Density of Si-Metal Interface States and Excess Capacitance Caused by Them. *Physica B*, 179 (4), 285-294.

- Uğurel, E., Aydoğan, Ş., Şerifoğlu, K., Türüt, A., 2008. Effect of 6 MeV electron irradiation on electrical characteristics of the Au/n-Si/Al Schottky diode. *Microelectronic Engineering*, 85, 2299–2303.
- Vaitkus, J., Kazukauskas, V., Didziulis, R., Storasta, J., Bates, R., Da Via, C., O'Shea, V., Raine, C., Smith, K. M., 1998. Defects and radiation damage in semi-insulating GaAs radiation detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 410, 61-67.
- Ziel, A., 1968. *Solid State Physical Electronics*, Prentice-Hall International Inc., Minnesota, 108-144.

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Oltu’da doğdu. İlköğrenimini Narman, ortaöğrenimini Erzurum’da yaptı. 2000 yılında Balıkesir Üniversitesi Necatibey Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliği bölümünü bitirdi. 2006 yılında Atatürk Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği dalında yüksek lisansa başladı. Halen Erzurum İbrahim Hakkı Fen Lisesi’nde fizik öğretmenliği yapmaktadır.