

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TERMAL NÖTRONLAR İLE IŞINLANAN Au/n-Si SCHOTTKY
DİYOTLARININ AKIM-GERİLİM VE KAPASİTE-GERİLİM
KARAKTERİSTİKLERİNDEKİ DEĞİŞİMLERİN
İNCELENMESİ**

Rukiye ALDEMİR

**Danışman
Prof. Dr. Ahmet Faruk ÖZDEMİR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2025**



© 2025 [Rukiye ALDEMİR]

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
3. METAL-YARIİLETKEN KONTAKLAR	11
3.1. Metal n-tipi Yarıiletken Kontaklar	12
3.1.1. Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak	13
3.1.2. Metal n-tipi yarıiletken omik kontak	15
3.1.3. Metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda Schottky kapasitesi	17
3.1.4. Schottky diyotlarda termoyonik emisyon teorisi.....	20
3.1.5. Engel yüksekliği üzerine etkiler	22
3.1.5.1. İmaj kuvveti alçalması-Schottky etkisi	22
3.1.5.2. Seri Direnç	24
3.2. Radyasyonun Malzeme Üzerine Etkisi	25
3.2.1. Radyoaktivitenin keşfi	25
3.2.2. Radyasyon türleri.....	26
3.2.3. Termal nötron ışınlamanın Schottky diyotlar üzerindeki etkileri....	27
4. MATERYAL-YÖNTEM	28
4.1. Materyal.....	28
4.2. Yöntem	30
4.2.1. Schottky diyot parametrelerinin geleneksel I-V yöntemiyle hesaplanması	30
4.2.2. Schottky diyot parametrelerinin C-V yöntemiyle hesaplanması	31
4.2.3. Schottky diyot karakteristiklerinin Cheung fonksiyonlarıyla belirlenmesi.....	32
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	34
5.1. Termal Nötronlarla Işınlanmış Diyotların SEM Analizi	34
5.2. Işınlamadan Önce Elde Edilen Kontak Parametreleri	36
5.3. Işınlamanın Akım-Gerilim Karakteristikleri Üzerindeki Etkileri	38
5.4. Işınlamanın Ters Beslem Akım-Gerilim Karakteristiklerinden Elde Edilen Parametreler Üzerindeki Etkileri	40
5.5. Işınlamanın Seri Direnç Üzerindeki Etkileri	42
5.6. Işınlamanın Kapasite-Gerilim Karakteristikleri Üzerindeki Etkileri	44
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	49
KAYNAKLAR	54
ÖZGEÇMİŞ	61

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TERMAL NÖTRONLAR İLE IŞINLANAN Au/n-Si SCHOTTKY DİYOTLARININ AKIM-GERİLİM VE KAPASİTE-GERİLİM KARAKTERİSTİKLERİNDEKİ DEĞİŞİMLERİN İNCELENMESİ

Rukiye ALDEMİR

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Faruk ÖZDEMİR

Termal nötron dönüşümü ve yer değiştirme hasarı etkilerini araştırmak amacıyla, Au/n-Si/Ag Schottky diyotları termal nötron ışınlamasına maruz bırakılmıştır. Schottky diyotları ıslak kimyasal temizleme işlemine tabi tutulan n-tipi Si dilimleri üzerine termal olarak altın (Au) buharlaştırılarak üretilmiştir. Işınlamanın Schottky engel yüksekliği (Φ_b), idealite faktörü (n), sızıntı akımı (I_0), seri direnç (R_s), donör konsantrasyonu (N_d) ve difüzyon potansiyeli (V_d) üzerindeki etkileri; akım-gerilim ($I-V$), kapasite-gerilim ($C-V$) karakteristikleri ve Cheung yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Işınlamadan önce oda sıcaklığındaki alınan $I-V$ ölçümlerinden en iyi idealite faktörü 1.24 ve sıfır beslem engel yüksekliği değeri 0.82 eV olarak elde edilmiştir.

Schottky diyotları termal nötronlar ile 10 s ve 30 s olmak üzere iki doz ışınlanmıştır. 10 saniyelik ilk ışınlama, diyot parametrelerinde küçük değişimlere yol açmıştır. 30 saniyelik ikinci ışınlama sonrası, diyot parametrelerinde belirgin değişiklikler gözlenmiştir. Toplam doz sonrası; doyma akımında ve engel yüksekliği inhomojenitesinde artış ve taşıyıcı konsantrasyonunda azalma meydana gelmiştir. Bu değişimler, termal nötronların sebep olduğu taşıyıcı yok etme etkisi ile ilişkilendirilmiştir. Işınlama sonrası idealite faktörü değerlerinde artış görülürken, sıfır beslem engel yüksekliği değerlerinde ışınlama sonrası çok az değişim kaydedilmiştir. Tüm diyotlar için sıfır beslem Schottky engel yüksekliği, ters beslem akım karakteristiklerinden de hesaplanmıştır. İkinci dozun ardından bu değerlerin tüm diyotlarda azaldığı tespit edilmiştir. Aynı şekilde sızıntı akımı ters beslem akım karakteristiklerinden de hesaplanmıştır. İlk doz sonrası sızıntı akımı değerlerinde küçük bir artış olmuş, ikinci dozun sonunda önemli derecede arttığı gözlemlenmiştir. Seri direnç değerleri, ışınlama öncesi ve sonrasında Cheung fonksiyonları kullanılarak hesaplanmıştır. Işınlama öncesinde bu değerler 2.10 k Ω ile 2.76 k Ω arasında değişirken, ikinci doz sonrası tüm diyotların seri direnç değerleri azalarak 1.59 k Ω ile 2.20 k Ω aralığında bulunmuştur.

Ayrıca, cihazlardaki elementlerin termal nötron dönüşümüne uğradığı, enerji saçılım spektroskopisi (EDS) haritalama yöntemi ile kanıtlanmıştır. $C-V$ karakteristikleri incelendiğinde ışınlamadan sonra doğru ve ters beslem bölgesindeki kapasite

değerleri açık bir şekilde azalmıştır. Bu durum ışınlama ile taşıyıcı konsantrasyonundaki azalmaya bağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Schottky diyot, metal-yarıiletken kontaklar, termal nötron, radyasyon etkisi, elektriksel karakterizasyon.

2025, 61 sayfa



ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF CHANGES IN CURRENT-VOLTAGE AND CAPACITANCE-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF Au/n-Si SCHOTTKY DIODES IRRADIATED WITH THERMAL NEUTRONS

Rukiye ALDEMİR

Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet Faruk ÖZDEMİR

Au/n-Si/Ag Schottky diodes were subjected to thermal neutron irradiation to investigate the effects of thermal neutron transmutation and displacement damage. Schottky diodes were fabricated by thermally evaporating gold (Au) onto n-type Si wafers that had undergone a wet chemical cleaning process. The effects of irradiation on the Schottky barrier height (Φ_b), ideality factor (n), leakage current (I_o), series resistance (R_s), donor concentration (N_d), and diffusion potential (V_d) were determined using the current-voltage (I - V), capacitance-voltage (C - V) characteristics and Cheung's method. From the I - V measurements taken at room temperature before irradiation, the best ideality factor was found to be 1.24, and the zero-bias barrier height was determined to be 0.82 eV.

The Schottky diodes were irradiated with thermal neutrons at two different doses: 10 seconds and 30 seconds. The initial 10-second irradiation caused minor changes in the diode parameters. After the second 30-second irradiation, significant changes in the diode parameters were observed. After the total dose, an increase in the saturation current and barrier height inhomogeneity, as well as a decrease in carrier concentration, were observed. These changes were attributed to the carrier removal effect caused by thermal neutrons. An increase in the ideality factor was observed after irradiation, while very little change was recorded in the zero-bias Schottky barrier height values. For all diodes, the zero-bias barrier height was also calculated from the reverse bias current characteristics. After the second dose, these values were found to have decreased in all diodes. Similarly, leakage current was also calculated from reverse bias current characteristics. A slight increase in leakage current was noted after the first dose, and a significant increase was observed after the second dose. The series resistance values were calculated before and after irradiation using Cheung's functions. Prior to irradiation, these values ranged from 2.10 k Ω to 2.76 k Ω , while after the second dose, the series resistance values for all diodes decreased and were found to be in the range of 1.59 k Ω to 2.20 k Ω .

Additionally, the transmutation of elements in the devices due to thermal neutrons was confirmed using energy-dispersive spectroscopy (EDS) mapping. When the C - V characteristics were examined, the capacitance values in both the forward and

reverse bias regions clearly decreased after irradiation. This situation was attributed to the reduction in carrier concentration caused by the irradiation.

Keywords: Schottky diode, metal-semiconductor contacts, thermal neutron, radiation effect, electrical characterization.

2025, 61 pages



TEŞEKKÜR

Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne yüksek lisans tezi olarak sunduğum çalışmamda, engin bilgi ve tecrübesi ile beni yönlendiren, çalışmam boyunca desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam Pof. Dr. Ahmet Faruk ÖZDEMİR'e teşekkürlerimi sunarım.

Diyotların imalinde yardımcı olan Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Fakültesi öğretim üyelerinden Prof. Dr. Songül DUMAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Diyotların termal nötron ışınlaması İstanbul Teknik Üniversitesi Triga Mark II araştırma reaktöründe (ITU-TRR) gerçekleştirilmiştir. Işınlamalar için İstanbul Teknik Üniversitesi Triga Mark II araştırma reaktörü ekibine teşekkür ederim.

Son olarak, bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan sevgili annem, babam ve kardeşlerime; tezimin her aşamasında yanımda olan, desteğini ve sevgisini hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli eşim Durmuş Ali ALDEMİR'e ve varlıklarıyla bana güç veren sevgili çocuklarım Ramazan ve Yusuf'a sonsuz teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunarım. İyi ki varsınız.

Rukiye ALDEMİR
ISPARTA, 2025

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Doğrultucu (Schottky) kontak ve omik kontakın akım-gerilim grafiği.....	11
Şekil 3.2. Metal ve n-tipi yarıiletkenin enerji band diyagramı	12
Şekil 3.3. ($\Phi_m > \Phi_s$) olduğu durumda metal ve n-tipi yarıiletkenin enerji band diyagramları a) kontakdan önce, b) kontakdan sonra.....	13
Şekil 3.4. Metal yarıiletken kontakın yarıiletken tarafına $-V$ geriliminin uygulandığı durum doğru beslem şartı	14
Şekil 3.5. Metal-yarıiletken omik kontakın enerji band diyagramı. a) Kontakdan önce, b) Kontakdan sonra	16
Şekil 3.6. Metal-yarıiletken omik kontakın enerji band diyagramı. a) Kontakta $(+V)$ uygulandığı durum, b) Kontakta $-V$ uygulandığı durum	16
Şekil 3.7. Metal n tipi yarıiletken kontakın a) konuma bağlı uzay yükü tabakasındaki potansiyel dağılımı, b) konuma bağlı uzay yükü yoğunluğu	17
Şekil 3.8. Metal-yarıiletken kontakta Schottky engelini imaj yükü alçalması..	23
Şekil 3.9. Radyasyonun iyonlaştırma özelliklerine göre sınıflandırılması	26
Şekil 4.1. Au/n-Si/Ag Schottky diyotun yapısı.....	29
Şekil 5.1. Au Schottky temasının sınırına ve Si bölgesine yakın SEM görüntüsü ve EDS haritalaması. a) Sem görüntüsü, b) elementlerin yüzdesi ve haritalaması, c) Oksijen haritalaması, d) Florür haritalaması, e) Silikon haritalaması, f) Fosfor haritalaması, g) Altın haritalaması, h) Civa haritalaması	35
Şekil 5.2. (a)-(d) Au/n-Si/Ag SBD'lerin termal nötron ışınlamalarından önce ve sonra ters ve doğru beslem akım-gerilim ($I-V$) karakteristikleri....	39
Şekil 5.3. (a)-(d) Au/n-Si/Ag Schottky diyotlarının ışınlamadan önce ve sonra $I_r \sim V^{0.5}$ eğrileri	41
Şekil 5.4. Au/n-Si/Ag Schottky diyotlarının ışınlamadan önce ve sonra $dV/d\ln I \sim I$ ve $H(I) \sim I$ eğrileri	42
Şekil 5.5. (a)-(d) Au/n-Si Schottky diyotlarının ışınlamadan önce ve sonra kapasite-gerilim karakteristikleri	45
Şekil 5.6. (a)-(d). Termal nötron ışınlamalarından önce ve sonra Au/n-Si/Ag Schottky diyotlarının C^2-V grafikleri.....	46

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 4.1. Silisyumun bazı fiziksel özellikleri.....	28
Çizelge 5.1. Au/n-Si Schottky diyotlar için bildirilen I - V den hesaplanan idealite faktörü, sıfır beslem engel yüksekliği ve doğrultma oranı değerleri	36
Çizelge 5.2. Diyotların termal nötron ışınlamalarından önce ve sonra I - V karakteristiklerinden elde edilen bazı önemli kontak parametreleri	40
Çizelge 5.3. Termal nötron ışınlamalarından önce ve sonra ters beslem I - V karakteristiklerinden elde edilen bazı önemli kontak parametreleri	41
Çizelge 5.4. Termal ışınlamadan önce ve sonra $dV/d\ln I$ - I ile hesaplanan parametreler	43
Çizelge 5.5. Termal ışınlamadan önce ve sonra $H(I)$ - I ile hesaplanan parametreler	44
Çizelge 5.6. Termal ışınlamadan önce ve sonra C^{-2} - V karakteristiklerinden elde edilen parametreler.....	47

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Diyotun alanı
$\text{\AA}$	Angström
A^*	Etkin Richardson sabiti
C	Kapasite
e	Elementer yük
$\Delta\Phi_{bi}$	İmaj yükünden meydana gelen engel yüksekliği alçalması
E_c	Yarıiletkenin iletkenlik bandının tabanının enerji seviyesi
E_f	Fermi seviyesi
E_{fm}	Metalin Fermi seviyesi
E_{fs}	Yarıiletkenin Fermi seviyesi
E_g	Yarıiletkenin yasak band aralığı
E_{max}	Yarıiletkendeki elektrik alanının en yüksek değeri
E_p	Potansiyel enerji
E_v	Yarıiletkenin valans bandının enerji seviyesi
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ϵ_0	Boş uzayın dielektrik sabiti
ϵ_r	Yarıiletkenin bağıl dielektrik sabiti
F	Elektriksel kuvvet
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_{bo}	Sıfır beslem engel yüksekliği
γ	Gama ışını
h	Planck sabiti
H	Cheung fonksiyonu
I	Diyot akımı
I_0	Diyotun sızıntı akımı
I_r	Ters beslem akımı
k	Boltzmann sabiti
χ_s	Yarıiletkenin elektron yakınlığı
n	İdealite faktörü
N_C	İletkenlik bandındaki durumların etkin yoğunluğu
N_D	Katkılanan verici atomların yoğunluğu
m_e^*	Elektronun etkin kütlesi
Ψ_s	Yarıiletkenin yüzey potansiyeli
R_s	Seri direnç
RR	Doğrultma oranı
ρ	Uzay yük yoğunluğu
Q	Yük yoğunluğu
T	Sıcaklık
V	Kontağa uygulanan gerilim
V_{d0}	Difüzyon potansiyeli
V_n	Yarıiletkenin iletkenlik bandının tabanı ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkı
W	Engel kalınlığı
Ag	Gümüş
Au	Altın
Ge	Germanyum
Hg	Civa

<i>N</i>	Azot
<i>O</i>	Oksijen
<i>P</i>	Fosfor
<i>Si</i>	Silisyum
<i>eV</i>	Elektonvolt
<i>keV</i>	Kilo elektronvolt
<i>MeV</i>	Mega elektronvolt
<i>CCD</i>	Charge Coupled Device (Yük Bağlantılı Aygıt)
<i>EDS</i>	Energy Dispersive Spectroscopy (Enerji Dağılımlı Spektroskopi)
<i>IAEA</i>	International Atomic Energy Agency (Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı)
<i>SEM</i>	Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskopi)



1. GİRİŞ

Yarıiletken cihazlar, nükleer reaktör ve uzay gibi radyasyonlu ortamlarda yaygın olarak kullanıldığı için radyasyonun bu cihazlar üzerine etkilerini incelemek büyük önem arz etmektedir. Elektronik devre elemanları kullanıldıkları ortama bağlı olarak parçacık temelli radyasyona maruz kalabilmektedir. Bu ortamlarda, cihazlar hem elektromanyetik (Gama, kozmik ışınlar) hem de parçacık (nötron, proton, elektron, ağır iyon) radyasyonuna maruz kalabilirler (Newman, 1982; Dharmarasu vd., 1998; Duzellier, 2005). Işınlamanın cihaz üzerindeki etkisini görmek ve cihazların radyasyon sertliğini test etmek amacıyla hem deneysel ve teorik açıdan birçok araştırma yapılmıştır (Sumathi vd., 2001; Kaschieva vd., 2003; Sciortino vd., 2005; Kumar vd., 2007). Parçacık temelli radyasyona maruz kalan yarıiletken malzemelerde bazı etkiler ortaya çıkar. Bu etkiler aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir:

Toplam iyonlaştırıcı doz: Çoğunlukla elektron ve proton gibi parçacıklara uzun süre maruz kalan yarıiletken aygıtlarda atomların iyonlaşması ile ortaya çıkan etkidir. Cihazın elektriksel özelliklerinde kayba yol açmaktadır. İyonlaştırıcı olmayan doz: Yüksek enerjili proton, nötron ve elektron gibi parçacıkların yarıiletkendeki atomları yerinden sökmeleriyle ilgili olan etkidir. Bu parçacıklar Yerdeğiştirme Hasarı Etkisine (Displacement Damage Effect) yol açmaktadır. Sensörler, CCD Yük bağlantılı kameralar (Charge Coupled Device), yükselticiler gibi yarıiletken aygıtların elektriksel özelliklerinde değişime sebep olmaktadır. Parçacık kapılması: Düşük enerjili (termal) nötronların atomlar tarafından kapılmasıyla ortaya çıkan etkidir. Bu etkide atomlar transmutasyona uğrayarak başka bir atoma dönüşmektedir, dolayısıyla bu durum yarıiletken aygıtların elektriksel özelliklerini etkilemektedir.

Nötronlar yüksüz parçacıklardır ve diğer yüklü parçacıklarla kıyaslandığında çekirdeklerle düşük enerjilerde etkileşime girerler ve nötr parçacıklar olduğundan elektromanyetik etkileşime katılamazlar. Bu nedenle, diğer parçacık radyasyonlarına kıyasla nüfuz derinlikleri daha büyüktür. Nötronlar enerjilerine göre hızlı (10 keV-15 MeV), epitermal (0.5 eV-10 keV) ve termal (<0.5 eV) olarak adlandırılır (Dennis, 1966). Hızlı nötronlarla ışınlama yarıiletken üzerinde yer değiştirme hasarına neden olurken, düşük enerjili nötronlarla (termal nötronlar) ışınlama yarıiletkenin atomlarını dönüştürür (Hoffman, 1981; Abdul ve Chik, 2009). Atom çekirdeği

tarafından kapılan termal nötron, çekirdeği mutasyona uğratar ve farklı bir elemente dönüştürür. Bu özelliklerinden dolayı Si, Ge ve GaAs gibi bazı yarıiletken malzemeleri homojen katkılamak için nötron dönüşüm katkılama ile termal nötrona maruz bırakmak iyi bir yöntemdir (Haller, 1995; Morvic vd., 2002). Yarıiletken cihazlardaki atomlar, termal nötronlarla etkileşime girdiklerinde dönüşürler ve bu durum yarıiletken cihazın performansını etkileyebilir. Termal nötronların silikondaki nüfuz derinliği çok büyük olduğu için (yaklaşık 100 cm), katkılama levha kalınlığı boyunca çok düzgündür (Sze ve Kwok, 2007).

Elektronik endüstrisindeki uygulama çeşitliliği, birçok araştırmacıyı metal-yarıiletken arayüzeylerini anlamaya, geliştirmeye ve kontrol etmeye teşvik etmiştir (Lapa vd., 2020). Bir metal ile yarıiletkenin kontak haline getirilmesiyle oluşturulan Schottky diyotları, yarıiletken endüstrisinde çok yaygın olarak kullanılmaktadır (Sharma, 1984). Bu tür diyotlar, elektronik endüstrisinde karıştırıcı diyotlar, nötron dedektörleri, güneş pilleri, radyo frekansı elektroniği, fotodedektörler, güneş hücreleri ve anahtarlama diyotları gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Anderson vd., 1977; Dharmarasu vd., 1998; Giudice vd., 2007; Ejderha vd., 2017). Bu kadar yaygın olarak kullanılan aygıtın kullanıldığı ortamlar da çok çeşitlilik göstermektedir. Bu ortamlarda sıcaklık, basınç ve radyasyon gibi farklı etkenlere maruz kalabilmektedir. Dolayısıyla bu etkenlere karşı Schottky diyotlarının karakteristiklerindeki değişimler önceden test edilmelidir (Aldemir vd., 2019). Schottky diyotlarının birçok yeni alanda kullanılması nedeniyle, radyasyonun bu diyotlar üzerine etkilerinin incelenmesi büyük önem arz etmektedir. (Yu ve Snow, 1969).

Borrego ve Gutman (1976) düşük nötron akısının Au/n-GaAs Schottky diyot parametreleri üzerindeki etkilerini araştırdılar. İleri akım-gerilim ($I-V$) ve kapasite-gerilim ($C-V$) özelliklerinin değişmediğini, ters akımın ise hızlı nötron akıları nedeniyle arttığını gördüler. Bu durumu tuzaklardan kaynaklanan alan emisyonuna bağladılar. Hızlı nötron radyasyonun n-tipi Si'deki kapasitans ve taşıyıcı konsantrasyonunda neden olduğu değişiklikler ise (Novoselnik vd., 2010) tarafından incelendi. 1 MeV'luk nötronların ürettiği radyasyon hasarı (Hazdra vd., 2014) tarafından W/n-4H-SiC Schottky diyotlar için araştırdılar. Işınlamanın alıcı seviyelerine neden olan farklı nokta kusurları olduğunu gösterdiler.

Literatürde, nötron radyasyonunun elektronik cihazlar üzerindeki etkileri incelenirken, özellikle enerjisi 1 MeV ve üzeri olan hızlı nötronların yarıiletkenlerin ve yarıiletken tabanlı cihazların elektriksel özelliklerine olan etkilerine odaklanan birçok çalışma bulunmaktadır (Yu ve Snow, 1969; Cindro vd., 2002; Frontasyeva ve Steinnes, 2004; Omar vd., 2012; Huseynov ve Garibli, 2016). Ancak termal nötron ışınlamasının yarıiletkenler ve yarıiletken cihazların elektriksel özellikleri üzerindeki etkileri hakkında çok az çalışma vardır. Basit yapılarından dolayı Schottky diyotlar, termal nötron ışınlamanın yarıiletken aygıtların üzerine etkilerini gözlemleyebilmek adına iyi bir adaydır.

Dolayısıyla bu çalışmada, Au/n-Si/Ag Schottky diyotlar üzerindeki nötron transmutasyonu ve yer değiştirme hasarı gibi termal nötron ışınlama etkilerinin ortaya çıkarılmasına odaklanılmıştır. Bu amaçla termal buharlaştırma yapılarak imal edilen Au/n-Si/Ag Schottky diyotlar üzerinde termal nötron radyasyonunun etkileri bu tezde araştırılmıştır. Au/n-Si/Ag Schottky kontak diyotların $I-V$ ve $C-V$ karakteristiklerindeki değişimler ışınlama süresine bağlı olarak incelenmiştir. Termal nötron ışınlamalarından önce ve ışınlamalardan sonra, idealite çarpanı (n), difüzyon potansiyeli (V_d), engel yüksekliği (Φ_b), seri direnci (R_s) ve donör konsantrasyonu (N_d) gibi önemli kontak parametreleri; geleneksel $I-V$ metodu, Cheung ve Schottky-Mott metotları kullanılarak da hesaplanmıştır. Tüm ölçümler oda sıcaklığında alınmıştır. Au/n-Si/Ag Schottky diyotlarının termal nötron ışınlama süresine göre dayanıklılığı ve kontak parametrelerindeki değişimler belirlenmiştir. Au/n-Si/Ag Schottky diyotlarında, altının silisyum üzerine Schottky diyot yapıldığı bölgelerde SEM görüntülemesi yapılmıştır. Termal nötron ışınlamaya maruz kalan diyotların yüzeyinde meydana gelen değişiklikler, enerji dağılım spektroskopisi (EDS) aracılığıyla analiz edilerek, radyasyonun neden olduğu element dağılımları ve mutasyona uğrayan elementlerin oranları tespit edilmiştir. Ayrıca termal nötron transmutasyonunun izlerinin EDS kullanılarak tespit edilmesi ilk kez bu tezde gerçekleştirilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Metal-yarıiletken kontaklarla ilgili ilk çalışma Braun tarafından 1874 yılında, yarıiletkene demir sülfür ve bakır gibi metalleri kontak haline getirmesiyle başlamıştır. 1906 yılında Pickard, silisyum tabanlı bir nokta doğrultucu kontak için patent almıştır. Ertesi yıl ise Pierce, farklı yarıiletkenlerin üzerine metal püskürtülerek elde edilen diyotların doğrultma özelliklerine dair çalışmalarını yayımlamıştır (Rhoderick ve Williams, 1988).

Coltman vd. (1967), yaptıkları çalışmada Ag, Au, Cd, Co, Cu, In, Mo, Ni, Pd, Pt, Re, Rh, W ve Zn olmak üzere, 14 yüksek saflıkta metalik elementi termal nötrona maruz bırakarak ışınlama sonucu oluşan yapısal bozulmaları ve sonrasındaki ardışık eş süreli tavlama (ısıtma işlem) davranışlarını incelemişlerdir. Au elementi 3.6 K sıcaklıkta 10.3 saat ışınlanmış olup, bu ışınlamadan dolayı ^{198}Hg izotopuna dönüşmüştür. Çeşitli metallerin hasar sonrasındaki iyileşme davranışları ile diğer hasar üretim yöntemlerini karşılaştırmalı olarak kıyaslamışlardır.

Yu ve Snow (1969), Silisyum Schottky diyotta radyasyonun etkilerini gözlemlemişlerdir. Nötron ve düşük enerjili elektron ışınlamasını kullanarak çeşitli Schottky diyot yapılarını incelemişlerdir. Deneylerde Schottky diyotlarının dört farklı yapısını kullanarak ışınlamadan sonra diyotların yapısındaki değişiklikleri gözlemlemişlerdir. Düşük enerjili elektron ışınlamasıyla oksitte pozitif uzay yükü oluşmuş ve yüzey rekombinasyon hızı artmıştır. Düşük enerjili elektron ışınlamasının dışında nükleer radyasyon etkilerini gözlemleyebilmek için hızlı nötron ışınlamasıyla Schottky diyotlarını ışınlamaya maruz bırakmışlardır. Nötron radyasyon dozlarından önce ve sonra kapı kontrollü Pt Schottky diyotlarının akım-gerilim özelliklerini incelemişler, radyasyondan sonra düz bant geriliminin daha negatife kaydığını rapor etmişlerdir. Buradan düz bant akımındaki artıştan da yola çıkarak nükleer radyasyonun ana etkilerinin yüzeysel değil kütleli olduğu sonucuna varmışlardır. Bütün bu çalışmadan Schottky diyotlarının engel yüksekliğinin radyasyondan etkilenmediğini gözlemlemişlerdir.

Borrego ve Gutmann (1976), düşük nötron akısına sahip Au/GaAs Schottky diyotlarındaki değişimleri incelemişlerdir. Au/n-GaAs Schottky diyotlarının taşıyıcı

konsantrasyonlarını sırasıyla 2.2×10^{16} ve $7.8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ olan epitaksiyel ve dökme malzemeden imal edilmiştir. Diyotları 3.6×10^{14} nötron/ cm^2 ve 2.2×10^{15} nötron/ cm^2 arasındaki hızlı nötron ışınlarına maruz bırakmışlardır. Akım-gerilim ve kapasite-gerilim karakteristiklerinin taşıyıcı kompanzasyonunun küçük olduğu düşük akılarda ışınlamalardan sonra az miktarda değişimler olduğunu bildirmişlerdir. Fakat oda sıcaklığında ters akımın fazla arttığını, bunun sebebinin ise tuzaklardan dolayı oluşan alan emisyonunun artışından kaynaklandığını ifade etmişlerdir.

Borrego vd. (1976), $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ile $8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 'lük verici konsantrasyonuna sahip Au/n-GaAs ve Al/n-GaAs Schottky diyotlarının nötronlarla ışılandıktan sonra elektriksel karakteristiklerindeki değişimleri incelemişlerdir. Çalışmalarında belirttikleri üzere, %20'den daha az bir taşıyıcı giderme oranına sahip düşük nötron akıları, kapasite-gerilim ($C-V$) ve doğru beslem akım gerilim ($I-V$) karakteristiklerindeki küçük değişikliklere yol açarken ters beslem akımında büyük bir artışa neden olmuştur. Bu durum metal yarıiletken arayüzeyinde bulunan arayüzey durumların dağılımının değişimine atfedilmiştir.

Ashok vd. (1978), 60 Å doğal arayüzey oksit tabakasına sahip GaAs MIS Schottky diyotlarının iyonlaştırıcı γ -ışını ve hızlı nötronlarla ışınlaması ile elektriksel karakteristiklerinde meydana gelen değişimleri incelemişlerdir. Referans MS (metal-yarıiletken) ve MIS (metal-yalıtkan-yarıiletken) diyotları $5 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2$ 'den $8 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ 'ye kadar akılara sahip hızlı nötronlarla ışınlamışlardır. Bu ışınlama seviyelerinde GaAs'teki taşıyıcı kompanzasyonunun ihmal edilebilir olduğunu $I-V$ karakteristiğindeki değişimlerin ise önemli boyutlarda olduğunu bildirmişlerdir. Ters beslem akımının ışınlamayla birlikte arttığını ifade etmişlerdir. Arayüzeydeki oksit tabakanın sebep olduğu ters beslem akımındaki zırlamanın nötron ışınlamasıyla azaldığını belirtmişlerdir. Ters beslem akımının nötron akısıyla orantılı olarak değiştiğini ifade etmişlerdir.

Lischka vd. (1993), ticari olarak mevcut olan ledleri, lazer diyotları, fotodiyotları ve optik bağlayıcıları X ışınlarına, ^{60}Co gama kaynağına ve 1 MeV'luk nötron ışınlamalarına maruz bırakıp, bu aygıtların karakteristiklerindeki değişimleri incelemişlerdir. 10^{13} n/cm^2 'den fazla akılara sahip 1 MeV'luk nötronların lazer diyotların eşik akımında

önemli bir değişime neden olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca fotodiyotların radyasyona çok duyarlı olduğunu belirtmişlerdir. Özellikle nötronlar ile ışınlamadan sonra karanlık akımında güçlü bir artışın meydana geldiğini ve bunun da cihazın performansında sınırlayıcı bir etken olduğunu ifade etmişlerdir.

Biggeri vd. (1998), iki farklı dirence sahip silisyum levhalarını 10^{13} n/cm² ile 4×10^{15} n/cm² arasında değişen akılarda yüksek nötronla ışınlamışlardır. Diyotları (111) yönelimli silisyum dilimlerinden elde etmişlerdir. Diyotun aktif alanı 0.5×0.5 cm² olup lazer aydınlatması için, metalik olmayan bir merkezi alana sahip olduğunu söylemişlerdir. Ölçümleri alırken $C-V$, $I-V$, Termal Olarak Uyarılmış Akımlar (TSC), Geçici Akımlar Tekniği (TCT) ve lazerle indüklenen akım ve Derin Seviye Geçici Spektroskopisi (I-DLTS) olmak üzere dört farklı prob yöntemi kullanmışlardır. Işınlamadan önce alınan ölçüm değerinde ortalama 3.9 k Ω ·cm'lik direnç değeri elde etmişlerdir. Örnekleri ortalama 1 MeV enerjiye sahip hızlı nötronlarla ışınlamışlardır. Işınlama akıları (10^{13} n/cm² cinsinden): 1.7 , 3.6 , 21 , 37.5 , 119 , 200 ve 390 'dır. Işınlamalardan sonra diyotlar üzerindeki deneysel sonuçlar 10^{14} n/cm²'nin üzerindeki ışınlama sonrasında $I-V$ değerlerinde bozulma olduğunu saptamışlardır.

Singh vd. (2001), 100 MeV $^{16}\text{O}^{7+}$ hızlı ağır iyon ışınlamasıyla Au/n-Si Schottky diyotun elektriksel özelliklerindeki değişimi incelemişlerdir. 1×10^{12} ile 1×10^{13} iyon/cm² aralığında ışınlamaya maruz bırakılan diyotun in situ (hemen yerinde, anında) kapasite-gerilim (C^2-V) ve $I-V$ ölçümlerini almışlardır. $C-V$ 'den alınan ölçümlerden, engel yüksekliği değeri ışınlama öncesi 0.93 eV, ışınlamadan sonra her dozda düşerek son dozda 0.57 eV olarak hesaplanmıştır. $I-V$ 'den alınan ölçümler sonucunda, idealite faktörü ışınlama öncesi 2.37 iken, 1×10^{12} iyon/cm² ışınlama sonrası 3.97 'ye çıkmış ve diğer dozlarda da neredeyse aynı kalmıştır. Engel yüksekliği değeri ışınlama öncesi 0.83 eV olurken, ışınlama sonrası bütün dozlarda 0.66 eV olarak sabit kalmıştır. Işınlamayla kusur konsantrasyonunun artışı engel yüksekliğinin Bardeen limitine kaymasına neden olduğunu söylemişlerdir.

Kumar vd. (2007), Au/n-Si Schottky diyotunu 180 MeV $^{107}\text{Ag}^{14+}$ hızlı ağır iyonla maruz bırakarak, ışınlamanın etkisini in situ (hemen yerinde, anında) diyotun akım-gerilim karakteristiği kullanılarak analiz etmişlerdir. Işınlama öncesi ve sonrası, $I-V$

karakteristiklerinden engel yüksekliğini, idealite faktörünü ve seri direnç değerlerini elde etmişlerdir. Işınlama öncesi idealite faktörünü 1.71, engel yüksekliği değerini 0.74 ± 0.01 eV bulmuşlardır. 1×10^{11} iyon/cm² ve 5×10^{12} iyon/cm² ışınlama akısı aralıklarında diyotu ışınlamışlar ve ilk dozda engel yüksekliği 0.69 ± 0.01 eV'a düşmüştür. Işınlama akısı artırılrsa bile engel yüksekliğinde belirgin değişiklik olmadığını gözlemlemişlerdir. Işınlamaya maruz kalan diyotun engel yüksekliğindeki düşüşü, hızlı ağır iyonların neden olduğu yapısal bozulmalara ve kusurlara atfetmişlerdir. Fakat belirli bir eşik ışınlama akısından sonra bu etkilerin doygunluğa ulaştığını ve engel yüksekliğinin sabit kaldığına değinmişlerdir.

Uğurel vd. (2008), Au/n-Si/Al Schottky diyotu 6 MeV elektron ve 3×10^{12} e⁻/cm² akı ile ışınlamaya, diyotun elektriksel özelliklerindeki değişimleri incelemişlerdir. (100) yönelimli, 400 µm kalınlığında ve 1-10 Ω-cm dirençli n-tipi Si dilimi kullanmışlardır. Si dilimini alüminyum ile omik kontak, altın ile Schottky kontak haline getirmişlerdir. Schottky diyotların $I-V$, $C-V$ ve kapasite-frekans ($C-f$) karakteristiklerini ışınlamadan önce ve sonra analiz etmişlerdir. Işınlama öncesi ve sonrası $I-V$ 'den hesaplanan n değerleri 1.44 ve 1.96, engel yüksekliği değerleri 0.73 eV ve 0.80 eV olarak bulunmuştur. Işınlama sonrası idealite faktörü değerinin artmasını elektron ışınlaması sebebiyle kristal örgü kusurlarının oluşmasına atfetmişlerdir. Engel yüksekliğindeki artışı ise diyotun ters yöndeki akımının azalmasına bağlamışlardır.

Novoselnik vd. (2010), hızlı nötronlarla ışınlanmış aşırı katkılı n-tipi Si diyotların kapasitelerinin nötron akısına bağlı olarak değişimini ve bu etkiyi tanımlayan bir model geliştirmeye çalışmışlardır. 30 Ω-cm öz dirence sahip fosfor katkılı Czochralski metodu ile büyütülmüş silisyum kristalleri kullanmışlardır. Diyotlar 0.7 MeV nötronlarla ışınlanmıştır. Nötron ışınlaması sırasında termal nötronları filtrelemek için 1 mm kalınlığındaki kadmiyum kutusu kullanmışlardır. Bu çalışmada göstermişlerdir ki, taşıyıcı gidermesi akıya bağlı değil iken termal olarak uyarılmış kapasite akıya bağlıdır. Termal olarak uyarılan kapasitedeki değişimleri nötron akısı ile ilişkili model önermişlerdir. Önerilen modelin kesin şekilde doğrulanması için daha çok çalışma yapılması gerektiğini vurgulamışlardır.

Akkurt vd. (2010), (100) yönelimli ve $2\text{-}5\times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ taşıyıcı konsantrasyonuna sahip Au/n-GaAs Schottky diyotu ortalama 2.14 MeV enerjide nötron salan ^{252}Cf kaynağından yayılan nötronlarla ışınlamışlardır. Işınlamadan önce ve sonra I - V karakteristiklerinden engel yüksekliği (Φ_{b0}), seri direnç (R_s) ve idealite faktörü (n) verilerindeki değişimleri elde etmişlerdir. Işınlamadan önce diyotun I - V ölçümü yapılmış sonra ise, diyot 0.72 kGy, 1.44 kGy ve 2.34 kGy doz oranlarında nötrona maruz bırakılmış ve her doz için I - V ölçümlerini tekrar yapmışlardır. Işınlamadan önce ve sonra idealite faktörü değerlerine göre ışınlama dozu arttıkça diyotun ideallikten saptığını belirtmişlerdir. Aynı şekilde engel yüksekliği değerleri göz önüne alındığında ışınlamanın dozunun artmasıyla engel yüksekliğinin azaldığını ifade etmişlerdir.

Omar vd. (2012), hızlı nötronlarla ışınlanan ticari olarak mevcut olan Si (1N4148) ve GaAs (TSKS5400S) diyotlarının doğru ve ters beslem akım gerilim karakteristiklerinin doz miktarına bağlı olarak değişimlerini incelemişlerdir. Işınlamadan sonra TSKS5400S kızılaltı diyotlarının ters beslem akımında büyük bir artış olduğunu rapor etmişlerdir. Bu artışı atomların yer değiştirmesinden kaynaklanan jenerasyon-rekombinasyon akımlarına bağlamışlardır. Bunun aksine 1N4148 silisyum diyotlarının karanlık akımında bir azalma gözlemişler ve bunu kullanılan diyotların türüne bağlamışlardır.

Verma vd. (2014), Au/n-Si Schottky diyotunu farklı dozlarda ^{60}Co gama radyasyonu ile ışınlamışlar ve diyotun elektriksel karakterizasyonundaki değişiklikleri tespit etmeyi amaçlamışlardır. Au/n-Si Schottky diyotun I - V ve C - V karakteristiklerinden idealite faktörü, engel yüksekliği, akım satürasyonunu, seri direnci ve donör konsantrasyonu parametrelerinin, radyasyon öncesi ve farklı doz sonrasındaki değerlerini hesaplamışlardır. Yüksek dozlarda radyasyonun Schottky bariyer yüksekliği ve donör konsantrasyonu üzerinde küçük etkisi olmaktadır. İdealite faktörü düşük gama dozlarında iyileşme görülmüş fakat doz arttıkça ışınlama öncesine dönmüştür. Diyot parametrelerindeki toparlama etkisini, elektronik enerji kaybı ile tavlama sırasındaki kusurların oluşmasıyla ilişkilendirmişlerdir.

Vali vd. (2020), termal nötron ışınlamasının n-4H-SiC'nin yapısal özellikleri ve Al/n-4H-SiC Schottky diyot kontaklarının elektriksel özellikleri üzerindeki etkilerini

gözlemlemiştir. Deneylerinde 2 inçlik n-tipi 4H-SiC (0001) dilimleri kullanılmışlardır. Plakaların direnci 0.012-0.03 $\Omega\cdot\text{cm}$, yoğunluğu ve kalınlığını ise sırasıyla 3.21 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ve $330 \pm 25 \mu\text{m}$ 'dir. N-4H-SiC ve Al/n-4H-SiC numuneleri alüminyum folyoya sarılarak ışınlama için reaktör ortamında saklamışlardır. Ve numuneler nükleer reaktöründe nötron ışınlamasına maruz bırakmışlardır. Schottky kontakların akım-gerilim özellikleri sıfır beslem ve ileri akımdaki azalma açısından etkilendiğini ifade etmişlerdir. İdealite faktörü, bariyer yüksekliği ve seri direnç gibi parametrelerin artışıyla birlikte bu değişimler, nötronun neden olduğu etkilere ve indüklenen kusur durumlarından dolayı serbest taşıyıcı konsantrasyonundaki azalmaya atfedilmiştir.

Akgül vd. (2021), 10 kGy dozunda ^{60}Co γ -ışını ile ışınlayarak, ışınlamadan önce ve sonra Au/SnO₂/n-Si Schottky diyotunun I - V karakteristiklerini incelemiştir. Czochralski tekniği ile büyütülmüş, 20 $\Omega\cdot\text{cm}$ öz dirence ve 380 μm kalınlığa sahip, (100) yönelimli n-tipi Si dilimleri kullanmışlardır. I - V 'den elde edilen veriler göre idealite faktörünün değerlerini ışınlama öncesi ve sonrası 3.49 ve 2.45 olarak belirlemiştir. İdealite faktörünün 1'den büyük olmasının nedenini, üretilen diyotun akım taşıma mekanizmasının hem termoiyonik emisyonu hem de tuzak destekli tünellemeyi içermesinden kaynaklandığını söylemişlerdir. Gama ışınlamasından dolayı SnO₂ tabakasında arayüz kusurları meydana gelmiştir. Radyasyondan sonra ters beslem akımındaki azalmayı, ^{60}Co γ -ışını ile uyarılan kusurlardan kaynaklanan azınlık taşıyıcılarındaki azalmanın etkisine bağlamışlardır. Φ_b ve R_s değerlerinde radyasyondan sonra arttığını, n ve I_0 değerlerinin azaldığını gözlemlemiştir. Işınlamadan sonra N_{ss} değerleri rekombinasyon merkezlerindeki azalma nedeniyle düşmüştür. Schottky emisyonu ve uzay yükü sınırlı akım etkilerini ışınlama dozuna bağlı olarak incelemiştir.

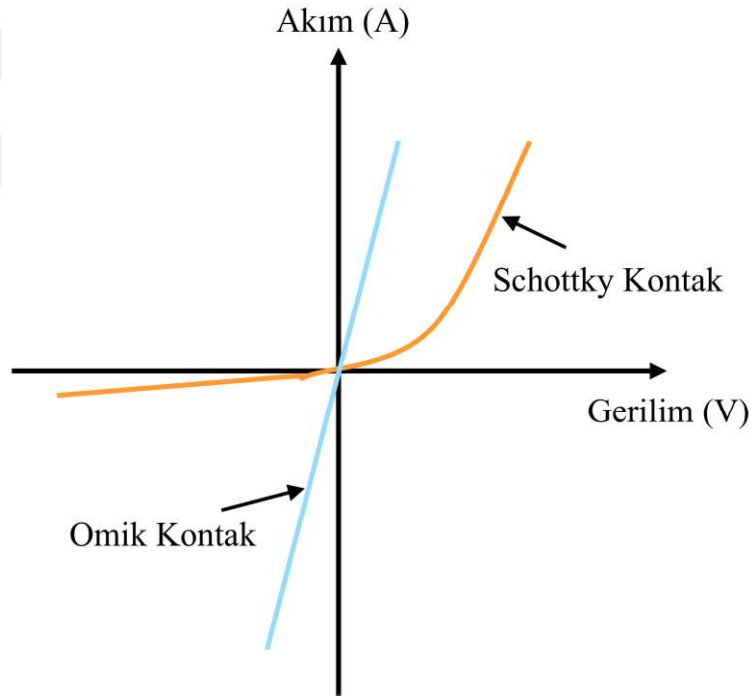
Bernat vd. (2021), termal nötron dönüştürücülerle çevrelenmiş 4H-SiC Schottky diyotlarının dedektörlerinin verimliliğini incelemiştir. 4H-SiC Schottky diyotları radyasyon işlemine tabi tutmadan önce ve sonra sıcaklığa bağlı I - V ve C - V ölçümleriyle karakterize etmişlerdir. Termal nötron dönüştürücü malzemesi olarak $^{10}\text{B}_4\text{C}$ ve ^6LiF kullanmışlardır. $^{10}\text{B}_4\text{C}$ ve ^6LiF termal nötron dönüştürücülerle sırasıyla %2.24 ve %4.67 termal nötron verimliliğine ulaşarak dedektörlerin tepkisinde

belirgin fark olduğunu saptamışlardır. Termal nötronlar için 4H-SiC bazlı nötron dedektörü için bildirilen en yüksek verime (yaklaşık olarak %5) ulaşmışlardır.

Bodunrin ve Moloi (2025), Au/n-Si/Al Schottky diyotunu 1 MeV'luk 10^{15} ve 10^{16} n/cm²'lik yüksek akılı nötron ışınlarına maruz bırakarak ışınlamadan önce ve sonra diyotun elektriksel özelliklerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Yapılan araştırmada, akım-gerilim (I - V) karakteristiğinden idealite faktörü değerleri ışınlama öncesi, ilk doz ve ikinci doz sonunda sırasıyla 2.11, 2.26 ve 3.89 olarak hesaplanmıştır. Diyotun engel yüksekliği değerleri ışınlama öncesi, ilk doz ve ikinci doz sonrası sırasıyla 0.71, 0.73 ve 0.60 eV olarak elde edilmiştir. Diyotun sızıntı akımı değerleri radyasyon öncesi, ilk doz ve ikinci dozdan sonra sırasıyla 3.23×10^{-8} , 1.76×10^{-8} ve 2.31×10^{-6} A olarak hesaplanmıştır. Işınlamalardan sonra idealite faktöründeki artışı, engel yüksekliğindeki azalmayı ve sızıntı akımındaki değişimleri ışınlama sırasında oluşan kusurlardan kaynaklandığını bildirmişlerdir.

3. METAL-YARIİLETKEN KONTAKLAR

Metal-yarıiletken kontak, yarıiletken malzemenin yüzeyine metali buharlaştırılarak kontak haline getirilmesiyle oluşur. İki maddenin de Fermi seviyesinin eşit olduğu denge durumuna gelinceye kadar yük dağılımı devam eder (Ziel, 1968). Kontakın daha verimli olabilmesi için, yüzeylerin kusursuz ve iyi temizlenmiş olması gerekir. Bir metal ve yarıiletkeni kontak haline getirdiğimizde, kontak omik ya da doğrultucu (Schottky) kontak olur. Doğrultucu kontakta yükler bir yönden diğerine daha rahat hareket eder. Omik kontakta ise, yükler metalden yarıiletkene veya yarıiletkenden metale kolayca geçebilir (Rhoderick ve Williams, 1998). Omik kontakta akım ile gerilim arasındaki ilişki doğrusal (lineer) iken, doğrultucu (Schottky) kontakta akım-gerilim karakteristiği doğrusal değildir (Şekil 3.1).



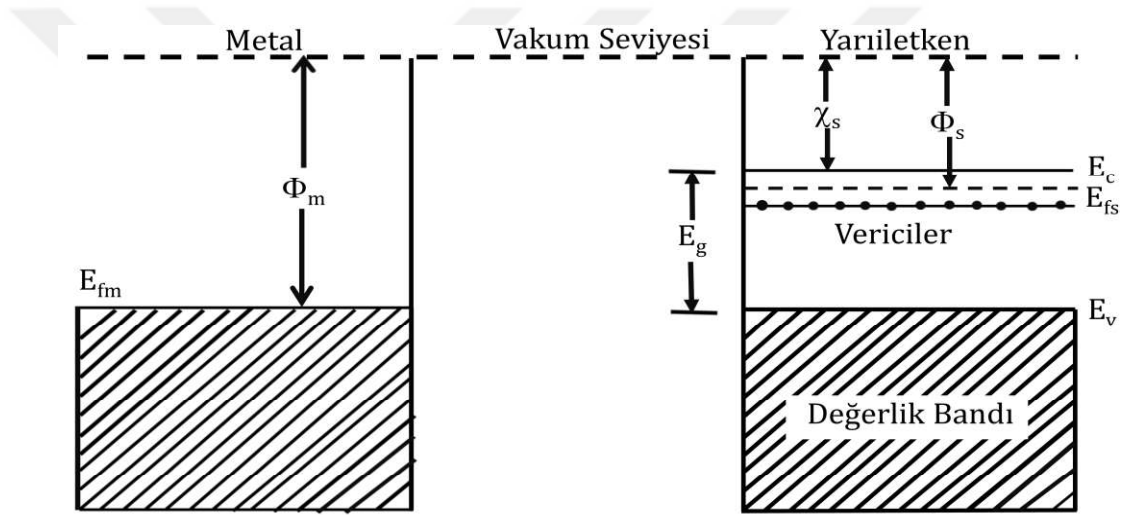
Şekil 3.1. Doğrultucu (Schottky) kontak ve omik kontakın akım-gerilim karakteristiği

Bir metal ile bir yarıiletken kontak haline getirildiğinde kontakın omik veya doğrultucu olmasını metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonu belirler. p-tipi yarıiletken ile metal kontak haline getirilirse metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyükse ($\Phi_m > \Phi_s$) kontak omiktir, yarıiletkenin iş fonksiyonu metalin iş fonksiyonundan büyük olduğunda ($\Phi_s > \Phi_m$) ise, kontak doğrultucudur.

n-tipi yarıiletken ile metal kontak haline getirildiğinde, metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyükse ($\Phi_m > \Phi_s$) kontak doğrultucudur. Diğer bir durumda yarıiletkenin iş fonksiyonu metalin iş fonksiyonundan büyük olduğunda ($\Phi_s > \Phi_m$) ise kontak omik yapıdadır.

3.1. Metal n-tipi Yarıiletken Kontaklar

Metal-yarıiletken kontaklarda akım hem elektronlar hem de boşluklar tarafından taşınır. n-tipi yarıiletken kontaklarda ise çoğunluk taşıyıcıları elektronlardır (Deshpande, 2007).



Şekil 3.2 Metal ve n-tipi yarıiletkenin enerji band diyagramı

Şekil 3.2’de metalin iş fonksiyonu (Φ_m), metalin Fermi seviyesinden (E_{fm}) sökülen elektronun vakum seviyesine çıkması için gerekli olan minimum enerjidir. Yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) ise yarıiletkenin Fermi seviyesinden (E_{fs}) sökülen elektronun vakum seviyesine çıkması için harcanan minimum enerjidir. Yarıiletkenin iletkenlik bandı ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkına yarıiletkenin elektron yakınlığı (χ_s) denir.

Metal ve n-tipi yarıiletken kontak haline getirildiğinde termal dengede Fermi seviyeleri eşitlenene kadar yük alışverişi olur.

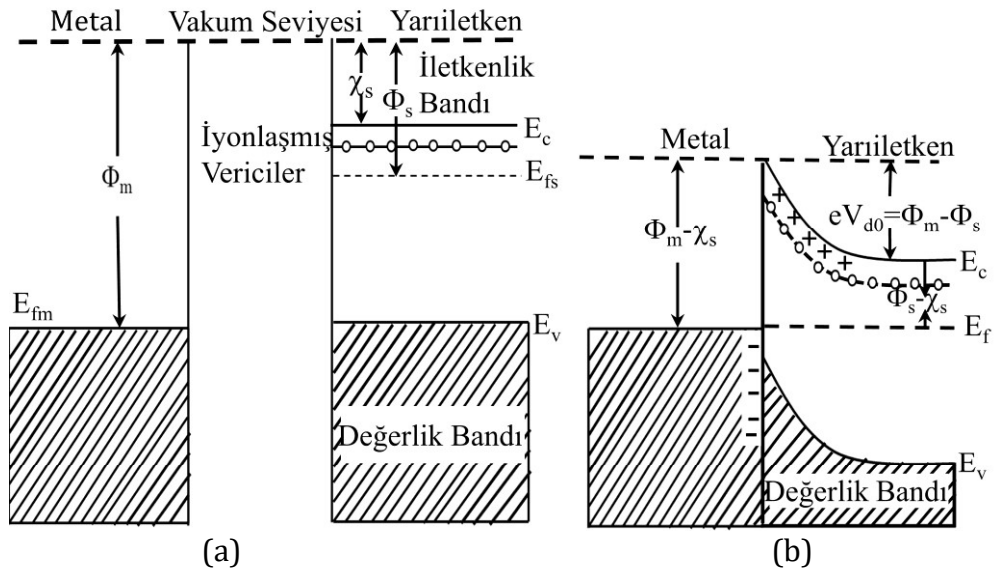
3.1.1. Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak

Metal ve n-tipi yarıiletken kontak haline getirildiğinde akım bir yönden kolayca geçebilmesine karşın diğer yönde potansiyel engelden dolayı akımın hareketi zordur. Bu duruma doğrultucu kontak denir. Şekil 3.3.a'da görüldüğü üzere kontak durumundan önce metalin iş fonksiyonu, yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyüktür.

Doğrultucu kontak olduğu durumda oda sıcaklığında metal ve yarıiletken kontak haline geldiğinde yarıiletkenin yüzeyinden metalin yüzeyine elektron akışı olur ve yarıiletkenin iletkenlik bandının altında iyonize olmuş vericiler kalır. Yük alışverişi tamamlandıktan sonra termal denge durumunda metalin ve yarıiletkenin Fermi seviyeleri eşitlenir. Yarıiletkenin Fermi seviyesi $\Phi_m - \Phi_s$ kadar azalmıştır. Metale aktarılan elektronlardan dolayı yarıiletkenin iletkenlik ve valans bandının yüzeylerinde yukarı doğru bükülerek potansiyel engel oluşmuştur. Yarıiletken için potansiyel engel yüksekliği;

$$eV_{d0} = \Phi_m - \Phi_s \quad (3.1)$$

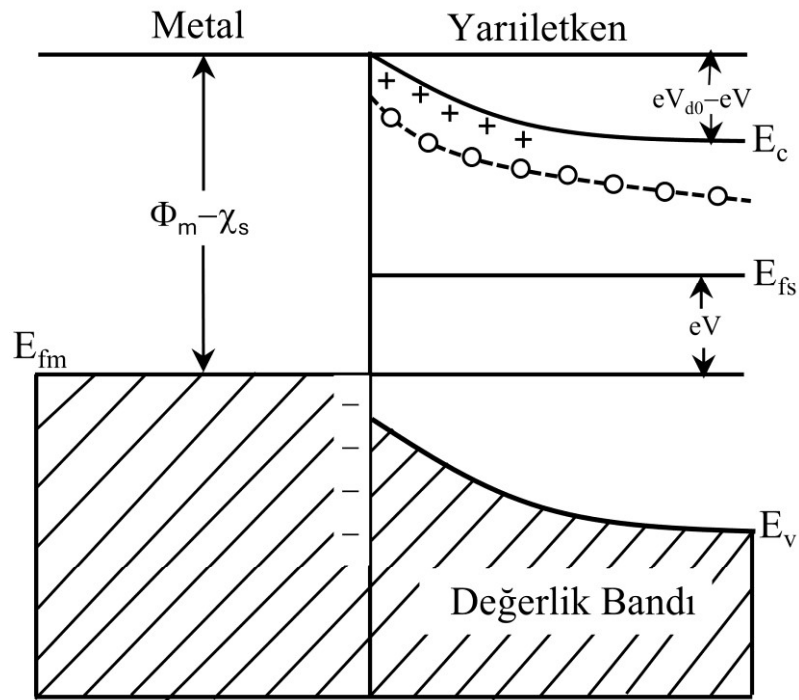
olur. Burada, V_{d0} difüzyon potansiyeli, e elementer yüküdür.



Şekil 3.3. ($\Phi_m > \Phi_s$) olduğu durumda metal ve n-tipi yarıiletkenin enerji band diyagramları a) kontak öncesi enerji band diyagramı, b) kontak sonrası enerji band diyagramı

Metalin yüzeyi baz alındığında, yarıiletkenin yüzeyindeki difüzyon potansiyeli $+V_{d0}$ 'dır. Kontağın yarıiletken tarafında bulunan pozitif yükler yüzey yükü değil, yük dağılımıdır. Bundan dolayı kontağın yüzey tabakası, uzay yükü tabakası olarak adlandırılır. Yarıiletken bölgede bu tabaka W kalınlığındadır. Kontak bölgesindeki potansiyel engelden ötürü, bu tabakaya engel tabakası da denir. Engel tabakasının kalınlığı V_{d0} difüzyon potansiyeline ve iyonlaşmış donörlerin yoğunluğuna bağlıdır. Bu tabakada serbest taşıyıcıların (serbest elektronlar) azlığından dolayı bu bölgeye deplasyon (tükenim) bölgesi denir. Deplasyon bölgesinde valans ve iletkenlik bantları kontak bölgesine yaklaştıkça yukarı doğru bükülmektedir (Şekil 3.3.b).

Metall ve yarıiletkenin kontak durumunda, termal uyarılmaların sonucunda metalden, yarıiletken bölgeye geçmek için bazı elektronlar yeterli enerjiye sahip olup potansiyel engeli aşabilirler. Aynı şekilde yarıiletkendten metale geçen bazı elektronlar potansiyel engelini aşabilecek enerjiye sahiptirler. Denge durumunda potansiyel engeli geçen elektronlar eşit ve zıt I_0 sızıntı akımlarına sebep olacaktır.



Şekil 3.4. Metall yarıiletken kontağın yarıiletken tarafına $-V$ geriliminin uygulandığı durum (doğru beslem)

Kontak durumundaki yarıiletken ($-V$) gerilimi uygulandığı durumda, metalden yarıiletkeni geçen elektronlar için engel yüksekliğinde ve akımda değişme olmaz. Fakat yarıiletken metale geçen elektronlar için iletkenlik bandında eV kadar yükselme olur. İletkenlik bandındaki eV kadar değişimin sonucunda da engel yüksekliği eV kadar azalır. Yani metalden yarıiletkeni doğru akan akım, $\exp(eV/kT)$ çarpanı kadar değişir. Burada karakteristik akım,

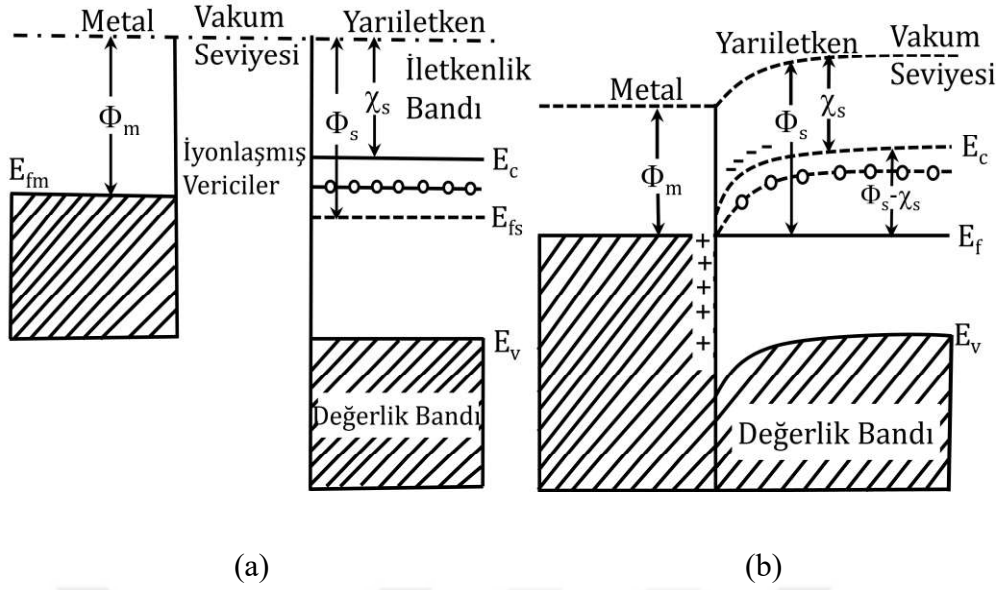
$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.2)$$

olur. Akım pozitif olup, k Boltzmann sabiti, e elementer yük ve T sıcaklığı ifade eder.

$V \gg kT/e$ şartında akım çok büyük ve pozitif olur. Bu şarta doğru beslem denir. $V \ll kT/e$ için ise, akım $-I_0$ 'a eşittir. İkinci durumdaki şart ters beslemdir. Kontakın metal kısmındaki engel yüksekliği gerilimden bağımsızdır. Yarıiletken tarafındaki potansiyel engelin yüksekliği ise uygulanan gerilime bağlı olarak değişir.

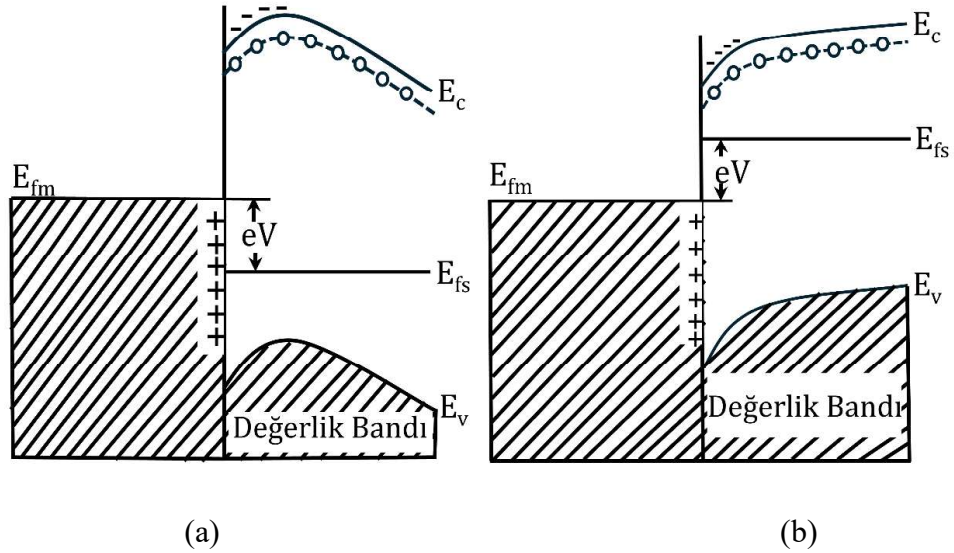
3.1.2. Metal n-tipi yarıiletken omik kontak

Daha önce n-tipi yarıiletken ile metalin kontak durumunda $\Phi_m < \Phi_s$ olduğunda kontakın omik olduğundan bahsetmiştik. Kontakta önceki durum Şekil 3.5 a'da gösterilmiştir. Metalin iş fonksiyonunun, yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçük olduğu bu durumda taşıyıcılar bir maddeden diğerine kolayca geçebilir. Kontakta önce yarıiletkenin Fermi seviyesi, metalin Fermi seviyesinin $\Phi_s - \Phi_m$ kadar altındadır. Kontakta sonra elektronlar metalden yarıiletkeni kolayca geçiş yaparlar. Yarıiletken tarafında negatif yüzey yükü oluşurken, metal tarafında ise pozitif yüzey yükü tabakası oluşur. Yani, kontak bölgesinde dipol tabakası oluşur. Omik kontakta, taşıyıcılar yarıiletken metale, metalden de yarıiletkeni rahatça geçebilirler. Elektron transferlerinin sonucunda yarıiletkenin Fermi seviyesi $\Phi_s - \Phi_m$ kadar yükselir (Şekil 3.5.b).



Şekil 3.5. Metal-yarıiletken omik kontakın enerji band diyagramı. a) Kontak öncesi, b) Kontak sonrası

Kontakın yarıiletken tarafına $+V$ gerilimi uygulandığında metalden yarıiletken tarafına elektron geçişi rahatlıkla olur. Yarıiletkenin Fermi seviyesinde metalin Fermi seviyesine göre eV kadar azalma görülür (Şekil 3.6.a).



Şekil 3.6. Metal-yarıiletken omik kontakın enerji band diyagramı. a) Kontakta $+V$ uygulandığı durum, b) Kontakta $-V$ uygulandığı durum

Kontak halindeki yarıiletkene $-V$ gerilimi uygulandığında ise, yarıiletkenden metale elektron aktarımı kolaylıkla olur. Yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden eV kadar yükselir (Şekil 3.6.b). Kontakta her iki tarafa da elektron geçişi kolay olduğundan kontak omik yapıdadır (Ziel,1968).

3.1.3. Metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda Schottky kapasitesi

Metal n-tipi yarıiletken kontağın, engel tabakasındaki potansiyel dağılımı Poisson eşitliğiyle verilir:

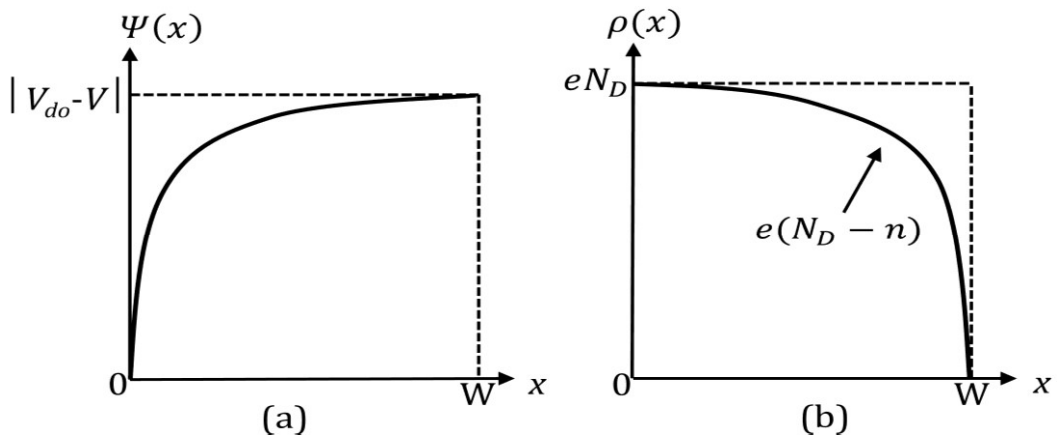
$$\frac{d^2\psi_s}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s} \quad (3.3)$$

Bu denklemde ψ_s yarıiletkenin yüzey potansiyeli, $\epsilon_0=8.85\times10^{-12}$ F/m boş uzayın dielektrik sabiti, $\epsilon_s=\epsilon_r\epsilon_0$ yarıiletkenin dielektrik sabiti, ϵ_r yarıiletkenin bağıl dielektrik sabiti, $\rho(x)$ konuma bağlı uzay yük yoğunluğudur. Yarıiletkenin yüzeyi potansiyeli $\psi_s=0$ ise, W engel kalınlığı olmak üzere, $x=W$ için $\psi_s=V_{do}-V$ olur.

n-tipi yarıiletkenin N_D verici atomların yoğunluğu ve n iletkenlik bandındaki elektron yoğunluğu olmak üzere ρ uzay yük yoğunluğu;

$$\rho(x) = e(N_D - n) \quad (3.4)$$

ile ifade edilir. Bir metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın, $\rho(x)$ uzay yükü yoğunluğu ve $\psi_s(x)$ potansiyel fonksiyonunun konuma göre değişimleri Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Metal n tipi yarıiletken kontak için a) konuma bağlı uzay yükü tabakasındaki potansiyel dağılımı, b) konuma bağlı uzay yükü yoğunluğu (Ziel, 1968)

Yukarıdaki Şekil 3.7.a' da konuma bağlı uzay yükü tabakasının potansiyel dağılımını verir. Uzay yükü tabakasındaki potansiyelin konuma bağlılığı Şekil 3.7.b'de verilmektedir. Elektronların yüksekliği $e(V_{do}-V)$ olan bir engeli aşmaları gerektiği için $x=W$ 'dan $x=0$ 'a gidişlerinde elektron yoğunluğu aniden azalır. Şekil 3.7 b'de $x \geq W$ olduğu durumda potansiyel sabit olduğu için $N_D \gg n$ olduğundan uzay yükü yoğunluğu;

$$\rho(x) = eN_D \quad (3.5)$$

şeklinde yazılır. Bu ifadeyi Denklem (3.3)'te yerine yazarsak, tek boyutta Poisson denklemini için;

$$\frac{d^2 \Psi_s(x)}{dx^2} = -\frac{eN_D}{\epsilon_s} \quad (3.6)$$

ifadesi elde edilir. $\Psi_s(x)$, potansiyel engeli bölgesi için, $x=0$, $x \geq W$ ve $x \leq W$ sınır şartlarında aşağıdaki gibidir:

$$x=0 \quad \Psi_s(x) = 0 \quad (3.7.a)$$

$$x \geq W \quad \Psi_s(x) = V_{do} - V \quad (3.7.b)$$

$$x \geq W \quad \frac{d\Psi_s(x)}{dx} = 0 \quad (3.7.c)$$

eşitlikleri elde edilir. (3.6) denkleminde üçüncü sınır şartı yerine yazılıp integrali alınırsa,

$$E(x) = -\frac{d\Psi_s(x)}{dx} = -\frac{eN_D}{\epsilon_s}(x - W) \quad (3.8)$$

Kontak bölgesindeki elektrik alanı elde edilir. $x=0$ 'da $\Psi_s(x)=0$ koşulu uygulandığında,

$$\Psi_s(x) = -\frac{eN_D}{\epsilon_s} \left(\frac{1}{2}x^2 - xW \right) \quad (3.9)$$

denklemleri bulunur. $x=W$ de $\Psi_s=V_{d0}-V$ şartında potansiyel engelin W kalınlığı için aşağıdaki bağıntı elde edilir:

$$W = \left[\frac{2\varepsilon_s}{eN_D} (V_{d0} - V) \right]^{1/2} \quad (3.10)$$

Denklem (3.10) $x=0$ için, Denklem (3.8)'de yerine yazılırsa,

$$E_{max}(x) = -\frac{eN_D}{\varepsilon_s} W = -\left[\frac{2eN_D}{\varepsilon_s} (V_{d0} - V) \right]^{1/2} \quad (3.11)$$

ifadesine ulaşılır. Birim alan başına yük yoğunluğu;

$$Q=eN_D W = [2\varepsilon_s eN_D (V_{d0} - V)]^{1/2} \quad (3.12)$$

ile ifade edilir. Toplam kapasite birim alan başına uygulanan gerilime göre yük değişimidir ve aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$C = A \frac{dQ}{dV} = \left[\frac{\varepsilon_s eN_D A^2}{2(V_{d0} - V)} \right]^{1/2} \quad (3.13)$$

Denklem (3.10)'da $(V_{d0}-V)$ eşitlikte yalnız bırakılıp eşitliğin diğer tarafındaki ifadeler Denklem (3.13)'te yerine yazıldığında;

$$C = \frac{\varepsilon_s A}{W} \quad (3.14)$$

elde edilir. Burada sığa yüzey alanı A , levhalar arası uzaklığı W olan, ε_s dielektrik sabitiyle doldurulmuş düzlem kondansatörüyle aynıdır (Ziel, 1968; Rhoderick ve Williams, 1988).

3.1.4. Schottky diyotlarda termoiyonik emisyon teorisi

Schottky diyotlarda elektronların potansiyel engel üzerinden taşınması işlemi termoiyonik emisyon teorisi ile açıklanır. Metal-yarıiletken Schottky diyotlarda taşıyıcılar termal enerjileri sebebiyle potansiyel engelini aşarak metalden yarıiletkene veya yarıiletkenenden metale geçmesi termoiyonik emisyon ile gerçekleşir. Schottky diyotlarda akım çoğunluk taşıyıcıları tarafından iletilir. Akım, metal/n-tipi yarıiletken Schottky diyotlarda elektronlar tarafından, metal/p-tipi yarıiletken Schottky diyotlarda ise boşluklar tarafından sağlanır.

Yarıiletkene V gerilimi uygulandığında, yarıiletkenenden metale iletilen elektronlar için potansiyel engel $e(V_{d0}-V)$ kadardır. $\exp(-e(V_{d0}-V)/kT)$ bir elektronun bu engeli geçebilmesi için bu enerjiye sahip olma olasılığıdır. Engeli geçebilen elektron sayısı bu durumla orantılıdır. Yarıiletkenenden metale elektron geçişi $V=0$ (sıfır ön beslem), I_0 akımına neden olur ve V gerilimi uygulandığında akım $I_0 \exp(eV/kT)$ 'dir.

Kontaga negatif V gerilim uygulandığında, $-eV/kT \gg I$ ise $I = -I_0$ değerini alır. Buna sızıntı akımı ya da doymuş akım denir. Akım burada elektronların metalden yarıiletkene aktığını gösterir ve akım yönü zordur. Gerilim (V) pozitif, kontağın yarıiletken kısmı negatif gerilimde ise $eV/kT \gg I$ olduğunda I 'nin işareti zıttır ve gerilim artarak hızlanacaktır. Akım burada elektronların yarıiletkenenden metale aktığını gösterir ve kolay akım yönüdür. Buradan yola çıkarak I_0 'ı hesaplamak için şu yollar izlenir. Kontak yüzeyine dik bir x bileşeni ve v_x yarıiletkendeki elektronların hızının x bileşeni olsun. Elektronların hız dağılımı Maxwell hız dağılımıdır ve hızı v_x ile $(v_x + dv_x)$ arasındadır. Elektronların yoğunluğu;

$$dn = N_D \left[\frac{m_e^*}{2\pi kT} \right]^{1/2} \exp \left[-\frac{\frac{1}{2} m_e^* v_x^2}{kT} \right] dv_x \quad (3.15)$$

ile ifade edilir. Bu denklemde m_e^* elektronun etkin kütlesi, N_D katkılanan verici atomlarının yoğunluğudur. Bunlar, x -yönündeki kinetik enerjileri potansiyel enerji engelinden büyük olan ($\frac{1}{2} m_e^* v_x^2 > eV_{d0}$) elektronlardır. Bu elektronların oluşturduğu akım I_0 olarak adlandırılır ve aşağıdaki integralin alınmasıyla elde edilir:

$$I_0 = \int A e v_x dn \quad (3.16)$$

Burada $v_x dn$ yüzeyin birim alanına dv_x hızına birim saniyede ulaşan elektron sayısını verir. A diyotun etkin alanıdır. Denklem (3.15), Denklem (3.16)'da yerine yazılırsa,

$$I_0 = \int_{(2eV_{d0}/m_e^*)^{1/2}}^{\infty} A e v_x N_D \left[\frac{m_e^*}{2\pi kT} \right]^{1/2} \exp \left[-\frac{\frac{1}{2}m_e^* v_x^2}{kT} \right] dv_x \quad (3.17)$$

elde edilir. Denklemde $m_e^* v_x^2/2kT$ yerine u değişken dönüşümünü uygulandığında;

$$I_0 = A e N_D \left[\frac{m_e^*}{2\pi kT} \right]^{1/2} \int \exp(-u) \frac{kT}{m_e^*} du \quad (3.18)$$

ifadesi elde edilir. Denklem (3.18)'in integrali alınıp sınır değerleri yerlerine yazılırsa,

$$I_0 = \frac{1}{2} A e N_D \left[\frac{2kT}{\pi m_e^*} \right]^{1/2} \exp \left(-\frac{eV_{d0}}{kT} \right) \quad (3.19)$$

bulunur. Denklem (3.19), $\exp(eV_n/kT)$ ifadesi ile çarpılıp bölündüğünde,

$$I_0 = \frac{1}{2} A e N_D \left[\frac{2kT}{\pi m_e^*} \right]^{1/2} \exp \left(-\frac{eV_{d0} + eV_n}{kT} \right) \exp \left(\frac{eV_n}{kT} \right) \quad (3.20)$$

ifadesine ulaşılır. eV_n yarıiletkenin iletkenlik bandının tabanı ile Fermi seviyesinin arasındaki enerji farkıdır. İletkenlik bandındaki durumların etkin yoğunluğunun (N_C) V_n 'ye bağlılığı aşağıdaki denklem ile verilir (Kasap, 2002):

$$N_D = N_C \exp \left(-\frac{eV_n}{kT} \right) \quad , \quad N_C = 2 \left[\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right]^{3/2} \quad (3.21)$$

Şekil (3.3.b)'den yararlanarak;

$$eV_{d0} + eV_n = e(\Phi_m - \chi_s) \quad (3.22)$$

yazılabilir. Denklemler (3.21) ve (3.22), Denklem (3.20)'de yerine yazılırsa,

$$I_0 = A \frac{4\pi e m_e^* k^2}{h^3} T^2 \exp\left(-\frac{e(\Phi_m - \chi_s)}{kT}\right) \quad (3.23)$$

sonucuna varılır. $\Phi_{b0} = \Phi_m - \chi_s$ sıfır beslem engel yüksekliği ve $A^* = 4\pi e m_e^* k^2 / h^3$ etkin Richardson sabiti olmak üzere (Si için 112 A/cm²K²'dir) doyma akımı için (Sharma, 1984),

$$I_0 = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_{b0}}{kT}\right) \quad (3.24)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade Denklem (3.2)'de yerine yazılırsa doğrultucu kontak için aşağıdaki denklemle verilen akım gerilim karakteristiğini elde edilir.

$$I = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_{b0}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1\right] \quad (3.25)$$

İdeal olarak bir diyotun ters beslem akımının uygulanan gerilimle değişmemesi gerekmektedir. Ancak Schottky diyotun Fermi seviyesi arayüz tabakasının enerji durumlarına sabitlenmiştir ve bu nedenle engel yüksekliği arayüzdeki elektrik alanı arttıkça doğrusal olarak azalır. Bu durumda ters beslem akımının (I_r) gerilime bağlılığı şu şekilde yazılabilir (Rakhshani vd., 1998):

$$I_r = I_0 \exp\left(\frac{\beta_s V^{0.5}}{kT}\right) \quad (3.26)$$

Burada, β_s Schottky sabitidir ve arayüz parametreleriyle ilişkilidir.

3.1.5. Engel yüksekliği üzerine etkiler

3.1.5.1. İmaj kuvveti alçalması-Schottky etkisi

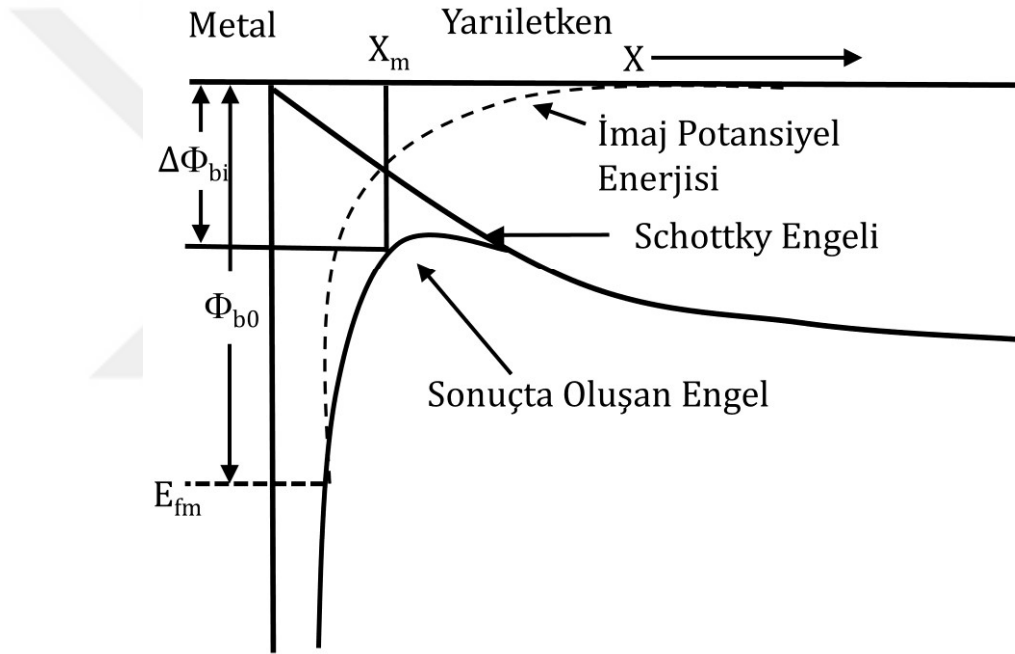
İmaj kuvveti, metalin yüzeyindeki alan şiddetinin hesaplanmasında önemli bir rol oynar. Schottky diyotta bir elektron, metalin yüzeyine yaklaşıncaya yüzeye dik bir

elektrik alan oluşur ve metal yüzeye yaklaşan elektronun simetrisinde pozitif imaj yük meydana gelir. Elektronun metale uzaklığı x kadar ise,

$$F = -\frac{e^2}{4\pi(2x)^2\epsilon_s} = -\frac{e^2}{16\pi x^2\epsilon_s} \quad (3.27)$$

Çekme kuvvetinin etkisinde kalır. Denklemin integrali bize imaj kuvvetinden kaynaklanan potansiyel enerjiyi verir.

$$U = \frac{e}{16\pi\epsilon_s} \int_x^\infty \frac{dx}{x^2} = \frac{e}{16\pi x\epsilon_s} \quad (3.28)$$



Şekil 3.8. Metal-yarıiletken kontakta Schottky engelini imaj yükü alçalması (Rhoderick ve Williams, 1988)

Toplam potansiyel enerjiyi hesaplayabilmek için, Şekil 3.8’de gösterildiği gibi imaj kuvveti potansiyel enerjisine, Schottky engelinden kaynaklanan potansiyel enerji dahil edilmelidir. Buradan,

$$E_p = -e \left[\frac{e}{16\pi x\epsilon_s} + xE_{max} \right] \quad (3.29)$$

olmalıdır. Denklemden E_{max} ifadesi, yarıiletken içerisindeki elektrik alanının maksimum değerini verir. $dE_p/dx=0$ bağıntısı kullanırsa,

$$\frac{dE_p}{dx} = \frac{d}{dx} \left[-\frac{e}{16\pi x \epsilon_s} - exE_{max} \right] = 0 \quad (3.30)$$

ifadesi elde edilir.

$$E_{max} = \frac{e}{16\pi \epsilon_s x_m^2} \quad (3.31)$$

ile ifade edilir. İmaj kuvvetinden dolayı engel yüksekliğinde meydana gelen maksimum alçalma,

$$\Delta \Phi_{bi} = 2E_{max} \left[\frac{e}{16\pi \epsilon_s E_{max}} \right]^{1/2} = \left[\frac{eE_{max}}{4\pi \epsilon_s} \right]^{1/2} \quad (3.32)$$

elde edilir (Rhoderick ve Williams, 1988). $\Delta \Phi_{bi}$, imaj yükünden meydana gelen engel yüksekliği alçalmasıdır. E_{max} değeri Denklem (3.11)'den faydalanarak yerine yazılırsa,

$$\Delta \Phi_{bi} = \left[\frac{e^3 N_D}{8\pi^2 \epsilon_s^3} (V_{d0} - V) \right]^{1/4} \quad (3.33)$$

sonucuna varılır.

3.1.5.2. Seri direnç

Metal-yarıiletken Schottky diyota yüksek gerilim uygulandığında, diyetun akım gerilim karakteristiğinde bir bükülme meydana gelir. Bu bükülmenin sebebi seri dirençtir ve R_s ile gösterilir. Seri direncin dahil edilmesiyle karakteristik akım,

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{e(V - IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (3.34)$$

olarak verilir. Burada $V-IR_s$ diyotun üzerine düşen gerilimi ifade eder. Seri direncin diyota etkisi, üzerinden I akımı geçen diyot ile R_s değerine sahip bir direncin birleşimiyle modellenmektedir (Norde 1979; Cheung ve Cheung, 1986).

3.2. Radyasyonun Malzeme Üzerine Etkileri

3.2.1. Radyoaktivitenin keşfi

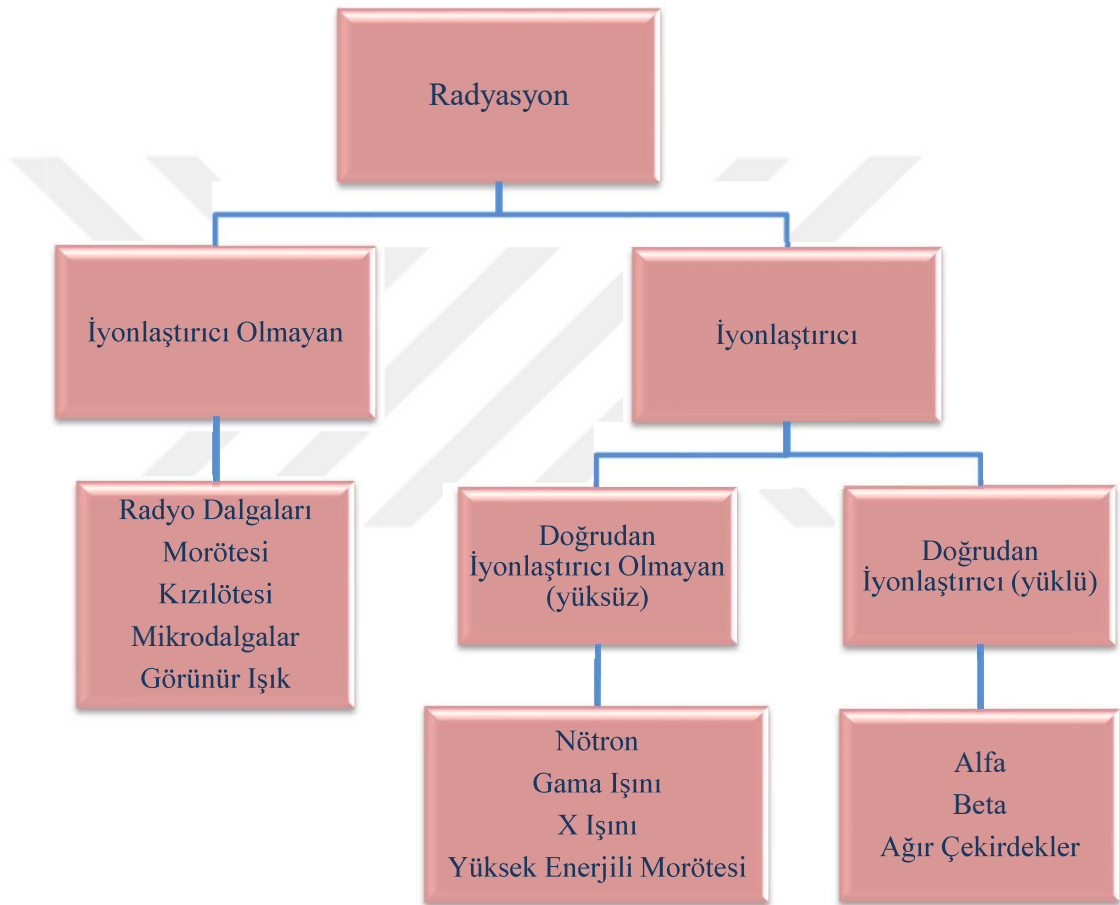
Radyoaktivite; kararlı olmayan radyoaktif bir çekirdeğin kararlı duruma gelebilmek için ışımayla ya da parçacık salarak fazla enerjisini verip kararlı bir çekirdek haline gelmesi olarak ifade edilir.

Radyoaktivite ilk kez 1896 yılında Henri Becquerel tarafından keşfedilmiştir. Wilhelm Röntgen'in X-ışınlarını keşfetmesinden yola çıkarak kendi çalışmaları ile arasında bağ kurmuştur ve fosforesans malzemenin güneş ışığıyla aydınlatıldığında radyasyon yayabileceğini düşünmüştür. Havanın kapalı olduğu günlerde deneyi gerçekleştiremeyeceği için deney düzeneğini kapalı ortamda bırakmıştır. Birkaç gün sonra karanlık ortamda kalan uranyumların parıldadığını görmüştür. Aynı yılda Marie Curie ve Pierre Curie toryumun benzer şekilde kendiliğinden ısıdığını saptamışlardır. Bu buluşlardan üç yıl sonra 1900 yılında Ernest Rutherford Uranyum çekirdeğinden alfa ve beta parçacıklarının yayımlandığını bulmuştur. P. Villard 1900 yılında radyoaktivite sonucunda gama ışınlarının yayımlandığını keşfetmiştir.

Nötronların keşfi bu keşiflerden seneler sonra 1932 yılında James Chadwick tarafından olmuştur. Chadwick, berilyum (Be) elementine alfa parçacıkları göndererek bir deney gerçekleştirmiştir. Alfa parçacıklarıyla etkileşiminden sonra yüksüz ama kütlesi protonun kütlesine yakın bir radyasyon türü gözlemlemiştir. Nötron yaklaşık 1 atomik kütle birimi (akb) kütleyle sahiptir. Yüksüz olduklarından elektrik alandan etkilenmezler ve maruz bırakıldığı maddenin derinlerine kadar nüfuz edebilir. Nötronlar çekirdek dışında kararsızdırlar ve yaklaşık 15 dakikalık ömüre sahiptirler.

3.2.2. Radyasyon türleri

Radyasyonlar iyonlaştırma özelliklerine göre iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak iki ana durumda incelenebilir. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonlar madde ile etkileşmesine rağmen, maddenin atomlarını iyonlaştıracak seviyede enerjiye sahip değildirler. Radyo dalgaları, morötesi, kızılötesi, mikrodalga ve görünür ışık iyonlaştırıcı olmayan radyasyon türündendir.



Şekil 3.9. Radyasyonun iyonlaştırma özelliklerine göre sınıflandırılması

İyonlaştırıcı radyasyonlar, maddeye nüfuz eden ışın sayesinde maddeden elektron kopararak maddenin iyonlaşmasına sebep olacak enerjiye sahiptirler. İyonlaştırıcı radyasyon kendi içinde, doğrudan iyonlaştırıcı (yükli) ve doğrudan iyonlaştırıcı olmayan (yüksüz) olarak ikiye ayrılır (Şekil 3.9). Alfa, beta ve ağır çekirdekler gibi yüklü tanecikler doğrudan iyonlaşmaya sebep olurlar. Doğrudan iyonlaştırıcı olmayan (yüksüz) radyasyonlar ise, gama ışını, X-ışınları ve nötronlardır. Nötronlar

enerjilerine göre soğuk (10^{-3} eV), yavaş (termal (10^{-3} -0.4 eV), epitermal (0.4-100 eV)), orta dereceli (100 eV-200 keV), hızlı (200 keV-10 MeV) ve görelî (≥ 10 MeV) sınıflarına ayrılır (Akyıldırım, 2011).

3.2.3. Termal nötron ışınlamanın Schottky diyotlar üzerindeki etkileri

Termal nötron ışınlamasında diğêr yüksek enerjili ve hızlı parçacıklardan farklı olarak radyasyona maruz kalan diyotların yüzeye yakın arayüzünde kusurlar ve deşikler oluşmasına sebep olarak örgü kusurlarına neden olurlar. Düşük enerjili (termal) nötronların atomlar tarafından kapılmasına parçacık kapılması denir. Bu etki de atomlar transmutasyona uğrayarak başka bir atoma dönüşmektedir, dolayısıyla bu durum yarıiletken aygıtların elektriksel özelliklerinde değişime yol açmaktadır (Coltman vd., 1967; Aldemir, vd., 2019). Termal nötronun kapılması sonucu diyotta yeni arayüz durumu oluşur ve idealite faktörünün artması ya da azalması bu oluşan arayüzdeki değişime bağlıdır.

4. MATERYAL-YÖNTEM

4.1. Materyal

Bu çalışmada, Au/n-Si/Ag Schottky diyotlarının üretiminde (100) doğrultusunda büyütülmüş ve parlatılmış 5-10 $\Omega\cdot\text{cm}$ öz dirence sahip silisyum (Si) dilimi kullanılmıştır. Nötron dönüşümünün etkilerini açıkça gözlemlemek için orta derecede katkılanmış silisyum dilimi seçilmiştir. Diyotların üretiminde kullanılan n-Si'un bazı fiziksel özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Silisyumun bazı fiziksel özellikleri (Neamen, 2003)

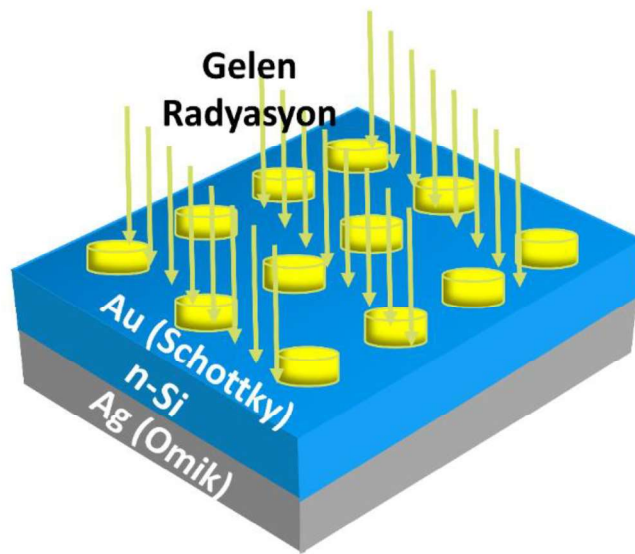
Özellikler	Değer
Sembolü	Si
Elektron Dizilimi	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
Grubu	4A
Atom numarası	14
İş fonksiyonu (eV)	4.2
Band aralığı (300 K), (eV)	1.12
Elektron mobilitesi ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	1350
Deşiklerin mobilitesi ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	480
İletkenlik bandındaki durum yoğunluğu (300 K), (cm^{-3})	2.8×10^{19}
Valans bandındaki durum yoğunluğu (300 K), (cm^{-3})	1.04×10^{19}

Diyotların hazırlanması sırasında kimyasal temizleme işlemine tabi tutularak organik kirliliklerden arındırılmıştır. Buharlaştırma işleminden önce, n-Si dilimi Radio Couperation of America (RCA) prosedürüne uygun olarak temizleme işlemine tabi tutulmuştur. İlk olarak silisyum dilimi aseton ve metanol ile ultrasonik olarak ayrı ayrı 10 dakika temizlenmiştir. Her işlemten sonra 18 M Ω dirence sahip de-iyonize su ile ultrasonik olarak durulanmıştır. Durulama işleminden sonra azot (N_2) ortamında kurutulmuştur.

Organik kirlerden arındırmak için, 5:1:1 $H_2O:H_2O_2:NH_4OH$ oranlarında hazırlanan amonyak çözeltisiyle 10 dakika boyunca yıkanmıştır. Daha sonra oksit tabakayı kaldırmak amacıyla, 10:1 $H_2O:HF$ çözeltisiyle 30 s boyunca yıkanmıştır. Bu işlemden sonra de-iyonize su ile ultrasonik olarak durulanmıştır ve her işlemden sonra azot ortamında kurutulmuştur.

Silisyum dilimi bir sonraki işlemde inorganik kirlerden arındırılmak için ise 6:1:1 $H_2O:H_2O_2:HCl$ oranında hazırlanmış çözelti ile 10 dakika boyunca yıkanmıştır. İşlemin ardından 10:1 $H_2O:HF$ çözeltisiyle 30 s boyunca yüzeyde oluşan oksit tabakayı kaldırmak için yıkanmıştır. Her iki işlemden sonra numune de-iyonize su ile ultrasonik olarak durulanmıştır ve her işlemden sonra azot ortamında kurutulmuştur.

Islak kimyasal temizleme işlemlerinin ardından silisyumun arka yüzeyine gümüş (Ag) buharlaştırılmıştır ve azot altında 723 K'de 3 dakika tavlama ile omik kontak yapılmıştır. Numunenin parlatılmış ön yüzeyine dairesel bir maske yardımıyla 1 mm çapındaki noktalara altın (Au) buharlaştırılarak Schottky kontak oluşturulmuştur. Metallerin vakum buharlaştırma işlemleri 2.7×10^{-4} Pa basınç altında gerçekleştirilmiştir. Organik kirliliklerden arındırmak için, buharlaştırma işleminden önce tüm metaller aseton ve metanol ile temizlenmiştir. Au/n-Si/Ag Schottky diyotun şematik gösterimi Şekil 4.1'de verilmektedir. Buradaki her Au noktası bir diyottur.



Şekil 4.1. Au/n-Si/Ag Schottky diyotlarının yapısı

Au/n-Si/Ag Schottky diyet İstanbul Teknik Üniversitesi'nde Triga Mark II araştırma reaktöründe (ITU-TRR) ışınlanmıştır. Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu (IAEA) kodu reaktör TR0003'tür. Reaktör 250 kW termik güce sahiptir. Tam güç modunda (250 kW), merkezi kanaldaki hızlı nötron ve termal nötron akıları sırasıyla $1.8 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ve $8.1 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 'dir. Diyetlerin ışınlaması, yalnızca $4.1 \times 10^{11} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ akıya sahip termal nötronların olduğu tavşan sisteminde tam güç modunda gerçekleştirilmiştir. Diyetlerin Schottky kontak tarafları, 10 saniye ve 30 saniye olmak üzere iki kez nötron ışınlamasına maruz bırakılmıştır. Her bir element için bozunmaların tamamlandığından emin olmak için her ışınlamadan 30 gün sonra I - V ve C - V ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümler, oda sıcaklığında sırasıyla Keithley 2400 SourceMeter ve HP4192A LF empedans analizörü kullanılarak her dozdan sonra yapılmıştır. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüsü ve diyetlerin yüzeylerinin haritalanması FEI Quanta FEG 250 SEM ve Bruker EDAX EDS sistemi kullanılarak yapılmıştır.

4.2. Yöntem

4.2.1. Schottky diyet parametrelerinin geleneksel I - V yöntemiyle hesaplanması

Schottky kontak diyetlerde I - V ölçümlerinden engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç gibi bazı parametreler hesaplanır. Diyetun I - V ilişkisi termoiyonik emisyon teorisinden yararlanarak Denklem (3.34) ifadesinde seri direncin etkin olmadığı bölgede $V > 3kT/e$ için,

$$I = I_0 \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \quad (4.2)$$

ifadesi elde edilir (Sharma, 1984). Denklem (4.2)'nin her iki tarafının logaritmasının alınmasıyla,

$$\ln I = \ln I_0 + \left(\frac{eV}{nkT}\right) \quad (4.3)$$

ifadesine ulaşılır. Buradan görüldüğü üzere $\ln I'$ 'nin V' 'ye göre grafiği doğrusaldır. Bu doğrunun eğiminden idealite faktörü aşağıdaki denklem vasıtasıyla bulunabilir:

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4.4)$$

Bu eğrinin $V=0$ için y-ksenini kestiği nokta ise I_0 'ı verir. I_0 'ın belirlenmesi ile Denklem (3.24)'den sıfır beslem engel yüksekliği hesaplanır.

4.2.2. Schottky diyot parametrelerinin C-V yöntemiyle hesaplanması

Schottky diyotun metal-yarıiletken arayüzey oluşumu hakkında bilgi sahibi olabilmek için, diyotun uzay yükü bölgesine ait kapasitesi bize yardımcı olur. Kapasite-gerilim ölçümlerinden difüzyon potansiyeli, engel yüksekliği ve verici atom yoğunluğu elde edilir. Denklem (3.13)'ün düzenlenmesiyle aşağıdaki ifade elde edilir:

$$C^{-2} = \frac{2(V_d - V - \frac{kT}{e})}{e\epsilon_s\epsilon_0 N_D A^2} \quad (4.5)$$

Bu ifadeden görüleceği gibi C^{-2} 'nin V 'ye göre grafiği doğrusaldır. Bu eğrinin $C^{-2}=0$ için V eksenini kestiği nokta $V_{d0}-kT/e$ 'ye verir. Buradan difüzyon potansiyeli elde edilir. Burada kT/e terimi, elektronların enerjileri nedeniyle metalden yarıiletken içerisine, özellikle de deplasyon bölgesine doğru sızmalarını temsil eder (Sze ve Kwok 2007). Buradan engel yüksekliği,

$$\Phi_b = V_{d0} + V_n \quad (4.6)$$

ile bulunur. C^{-2} - V eğrisinin eğiminden ise N_D aşağıdaki denklem yardımıyla elde edilir:

$$N_D = -\frac{2}{e\epsilon_s A^2 \frac{d(C^{-2})}{dV}} \quad (4.7)$$

4.2.3. Schottky diyot karakteristiklerinin Cheung fonksiyonlarıyla belirlenmesi

Schottky diyot parametrelerinin hesaplanabilmesi için Cheung (1986) tarafından farklı bir model sunuldu. Cheung fonksiyonları seri direnç, idealite faktörü ve engel yüksekliği gibi diyot parametrelerini belirlemek için en çok kullanılan yöntemlerden biridir. $\ln I$ - V grafiğindeki diyotun doğru beslem kısmındaki yüksek gerilim değerlerinde lineerlikten sapmanın asıl nedeni seri dirençten kaynaklanmaktadır (Ayyıldız vd., 1996). Denklem (3.34)'ten gerekli işlem basamakları kullanılarak Cheung fonksiyonları türetilir. Denklem (3.34)'teki I_0 ifadesinin yerine Denklem (3.24) yazılırsa,

$$I = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_{b0}}{kT}\right) \exp\left(\frac{e(V-IR_s)}{nkT}\right) \quad (4.7)$$

olur. Eşitliğin her iki tarafının doğal logaritması alınır,

$$\ln I = \ln(AA^*T^2) - \frac{e\Phi_{b0}}{kT} + \frac{eV}{nkT} - \frac{eIR_s}{nkT} \quad (4.8)$$

ifadesine dönüşür. Denklem (4.8)'de yeniden düzenlemeler yapılırsa,

$$V = \frac{nkT}{e} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) + n\Phi_{b0} + IR_s \quad (4.9)$$

ifadesi elde edilir. Denklemin iki tarafı $\ln I$ 'ya göre türevi alınır,

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = IR_s + \frac{nkT}{e} \quad (4.10)$$

denklemi elde edilir. Bu eşitlik birinci Cheung fonksiyonudur. $dV/d(\ln I)$ 'nın I 'ya göre grafiği lineerdir ve bu grafiğin eğiminden R_s elde edilir. Bu eğrinin $dV/d(\ln I)$ eksenini kestiği noktadan ise idealite faktörü bulunur. Denklem (4.9)'da $n\Phi_{b0} + IR_s$ ifadeleri eşitlikte yalnız bırakılırsa,

$$V - \frac{nkT}{e} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = n\Phi_{b0} + IR_s \quad (4.11)$$

olur. Denklemin her iki tarafını ayrı ayrı $H(I)$ 'ya eşitlenirse,

$$H(I) = V - \frac{nkT}{e} \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (4.12)$$

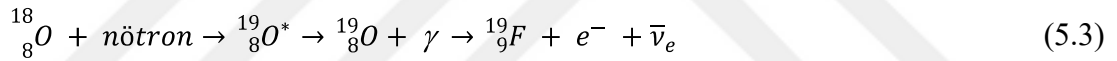
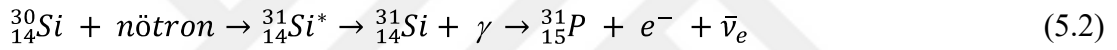
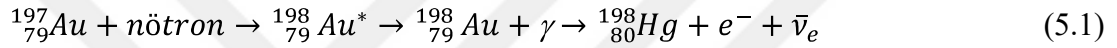
$$H(I) = IR_s + n\Phi_{b0} \quad (4.13)$$

ikinci ve üçüncü Cheung fonksiyonları elde edilir (Cheung ve Cheung, 1986). Denklem (4.10)'dan görüldüğü üzere $H(I)$ - I doğrusunun eğimi seri direnci, $I=0$ için $H(I)$ eksenini kestiği nokta $n\Phi_{b0}$ 'ı verir.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

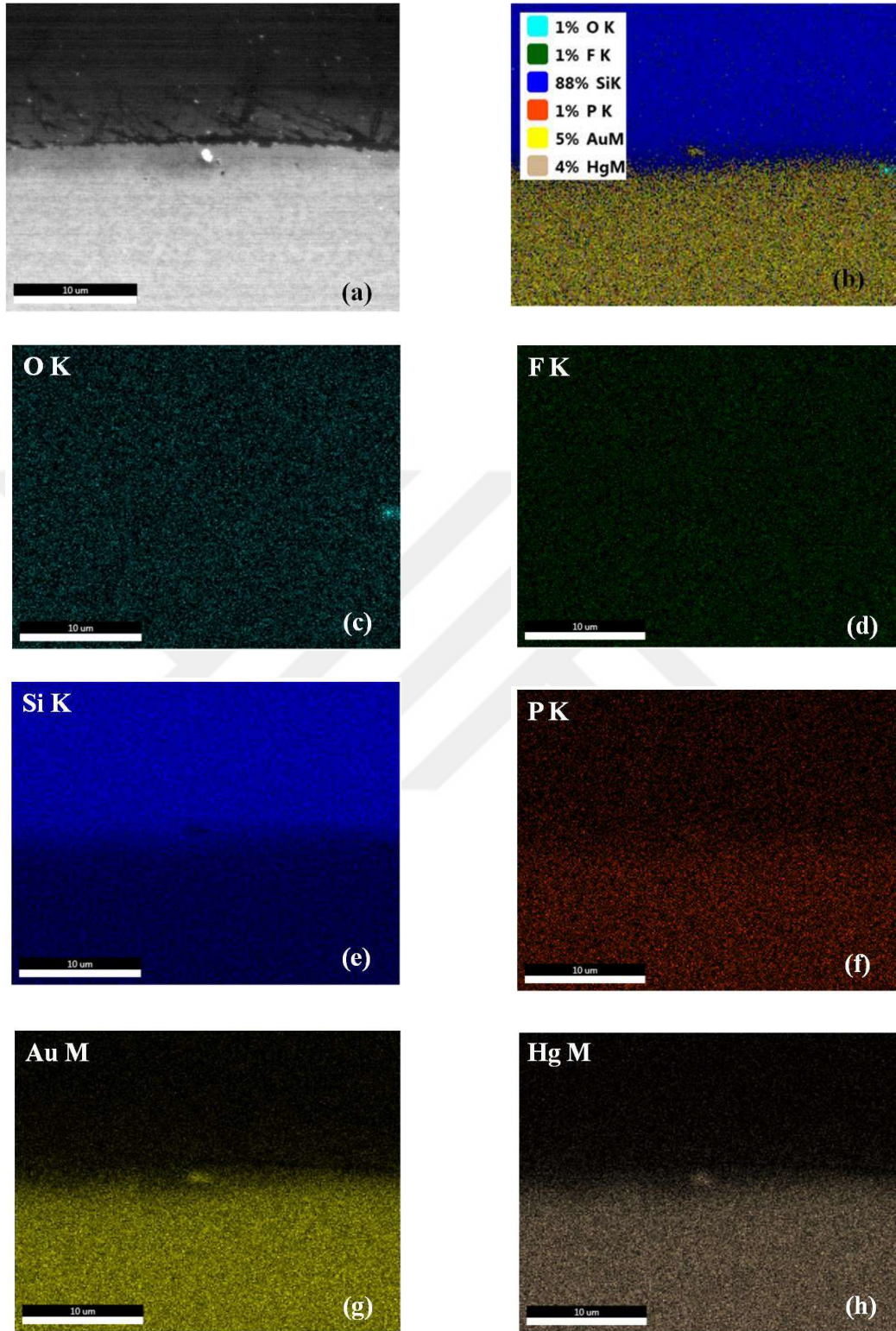
5.1. Termal Nötronlarla Işınlanmış Diyotların SEM Analizi

Au/n-Si/Ag Schottky kontak diyotların elementel dağılımı üzerindeki termal nötron etkilerini anlamak için, diyotun üst yüzeyi üzerine EDS haritalaması yapılarak termal nötronlardan kaynaklanan transmutasyonların izleri araştırıldı (Şekil 5.1). Şekilden görülebileceği üzere altın (Au), silisyum (Si) ve oksijen (O) çekirdeklerinin sırasıyla civa (Hg), fosfor (P) ve flor (F) çekirdeklerine dönüştüğü açıktır. Bu dönüşümlere ait denklemler aşağıda verilmektedir (Ouellet ve Singh, 2013; Tilley vd., 1995; Huang ve Kang, 2016):



Bu denklemlerde *, γ , e^- ve $\bar{\nu}_e$ sırasıyla, yarı kararlı durum, gama radyasyonunu, elektron (β -parçacığı) ve elektron antinötrinoyu belirtir. Denklem (5.1), (5.2) ve (5.3)'teki beta bozunmalarının yarı ömürleri sırasıyla 2.62 gün, 157.36 dakika ve 26.88 saniyedir.

Şekil 5.1'den görüldüğü üzere, SEM görüntüleri diyotun Schottky kontak yapıldığı bölgelerden alınmıştır. Diyotun Au kontak bölgelerindeki P yoğunluğu diğer bölgelerdeki P yoğunluğundan daha fazladır. Bu durum, Au kaplamanın silisyumun termal nötron yakalama olasılığını artırdığına atfedilebilir (Aldemir vd., 2019). Ayrıca Au kaplama sayesinde o bölgeden daha iyi sinyaller alınması bu duruma yol açmış olabilir.



Şekil 5.1. Au Schottky kontak sınırına ve Si bölgesine yakın SEM görüntüsü ve EDS haritalaması. a) SEM görüntüsü, b) elementlerin yüzdesi ve haritalaması, c) Oksijen haritalaması, d) Florür haritalaması, e) Silisyum haritalaması, f) Fosfor haritalaması, g) Altın haritalaması, h) Civa haritalaması

5.2. Işınlamadan Önce Elde Edilen Kontak Parametreleri

Işınlama işlemine maruz bırakılmadan önce Şekil 5.2 a-d'den idealite faktörleri değerleri D1, D2, D3 ve D4 diyotları için sırasıyla, 1.29, 1.24, 1.39 ve 1.25 değerleri elde edilirken, sıfır beslem engel yükseklikleri değerleri D1, D2, D3 diyotları için 0.80 eV D4 diyotu için 0.82 eV olarak elde edilmiştir. Au/n-Si Schottky diyot yapısı imal edilirken metal-yarıiletken kontak bölgesinde laboratuvar şartlarında oksitlenmeden kaynaklı bir yalıtkan tabaka oluşur. Bu yalıtkan tabaka idealite faktörü sonuçlarının birden büyük olmasının sebep olur. Bunun yanı sıra imaj kuvvetinin etkisi, seri direnç ve deplasyon bölgesindeki taşıyıcıların değişimlerinden kaynaklanan akımlar idealite faktörünün birden büyük olmasına sebep olan etkenlerdendir (Sharma, 1984).

Çizelge 5.1. Au/n-Si Schottky diyotlar için bildirilen $I-V$ den hesaplanan idealite faktörü, sıfır beslem engel yüksekliği ve doğrultma oranı değerleri

Diyot	n	$\Phi_{bo}(eV)(I-V)$	RR	Referanslar
Au/n-Si	1.094	0.858		Keffous vd., 2004
Au/n-Si/Au-Sb	1.04	0.742	$\sim 10^5(\pm 0.8)$	Kılıçoğlu ve Asubay, 2005
Au/n-Si	1.71	0.74 ± 0.01		Kumar vd., 2007
Au/n-Si/Al	1.44	0.73		Uğurel vd., 2008
Au/n-Si	2.878	0.652	$342 (\pm 4V)$	Altındal vd., 2009
Au/n-Si	1.25 (310 K)	0.79 (310 K)		Sharma, 2010
Au/n-Si	4.43	0.51	$1.25 \times 10^3 (\pm 5V)$	Tataroğlu, 2013
A/n-Si	1.65	0.62	$2.89 \times 10^3 (\pm 2V)$	Aydemir vd., 2013
Au/n-Si/Ag	1.91	0.662		Bilkan ve Altındal, 2017
Au/n-Si	1.56	0.75	$1.96 \times 10^3 (\pm 5V)$	Yerişkin vd., 2017
Au/n-Si	1.97	0.57	$250 (\pm 4V)$	Bilkan vd., 2019
Au/n-Si/Al	2.11	0.71	$45 (\pm 4V)$	Bodunrin ve Moloi, 2025
Au/n-Si/Ag	1.25	0.82	$5.74 \times 10^3 (\pm 2V)$	Bu tezde

Çizelge 5.1'de, literatürde yer alan çalışmalar ile bu çalışmada elde edilen sonuçlara ait oda sıcaklığında $I-V$ karakteristiklerinden hesaplanan Schottky diyotlara ilişkin idealite faktörü, sıfır beslem engel yüksekliği ve doğrultma oranı değerleri sunulmuştur. Bilkan ve Altındal (2017), 300 μm kalınlığa sahip Au/n-Si/Ag Schottky diyotlarının sıfır beslem engel yüksekliği değerini 0.662 eV, idealite faktörünü 1.91, diyotun sızıntı akımı değerini 2.46×10^{-7} A olarak bulmuşlardır. İdealite faktörünün birden büyük olmasını arayüzeyde doğal SiO_2 tabakanın oluşmasına bağlamışlardır.

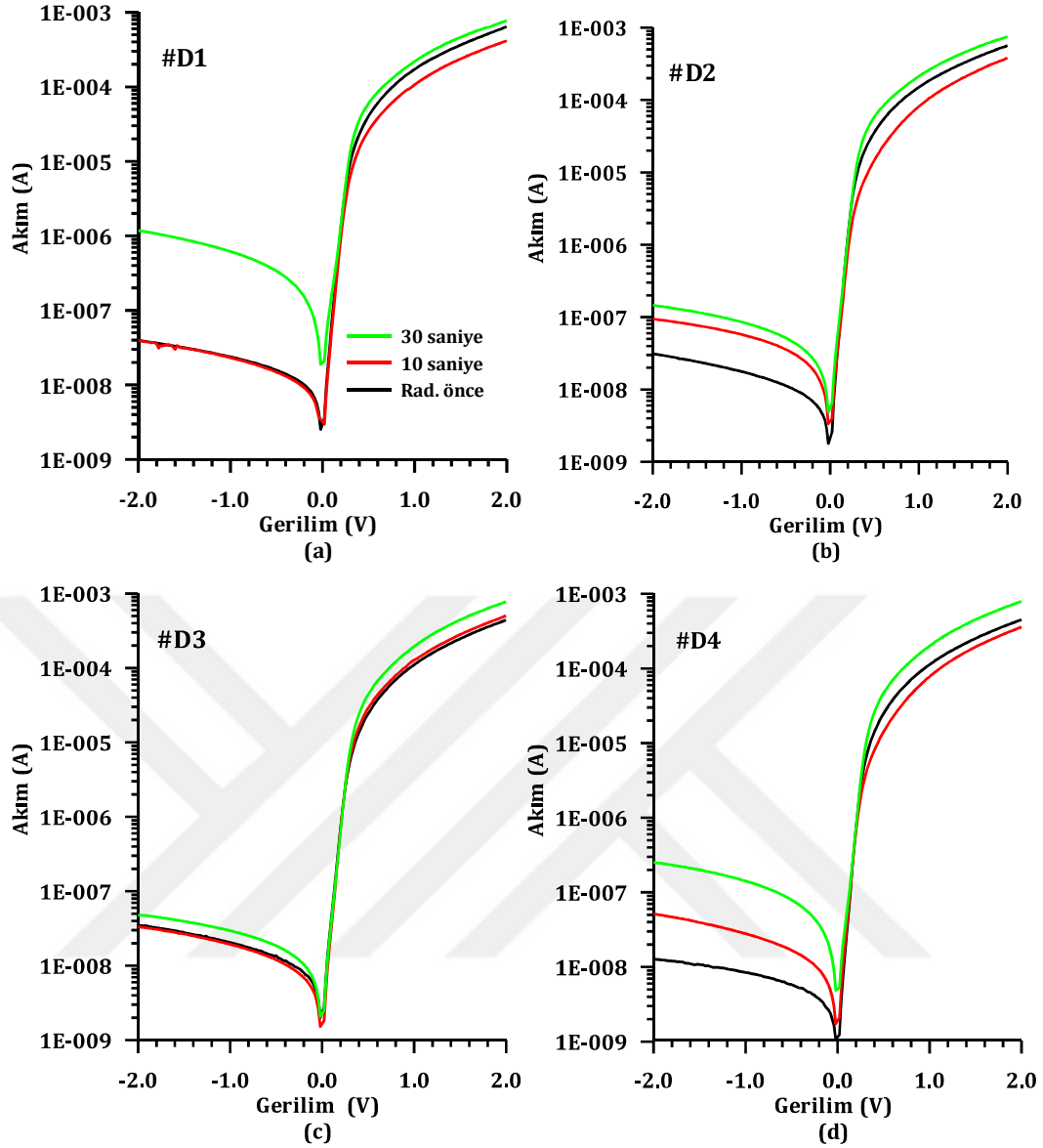
Aydemir vd., (2013), Au/n-Si ve Au/PVA:Zn/n-Si Schottky diyotlarını float-zone yöntemiyle (100) yönelimli, 350 μm kalınlığında ve 1-10 Ω cm öz direncine sahip silisyum dilimi üzerinde üretmişlerdir. Au/n-Si diyotun $I-V$ karakteristiklerinin oda sıcaklığında alınan ölçümlerden diyotun idealite faktörünü 1.65, sıfır beslem engel yüksekliğini 0.62 eV, doğrultma oranı değerini $2.89 \times 10^3 (\pm 2V)$, seri direnci 164.15 Ω ve şönt direncini 0.597 M Ω olarak bulmuşlardır. Çıkan sonuçları Au/PVA:Zn/n-Si Schottky diyot parametrelerinin sonuçları ile kıyaslamışlar ve arayüzeyine doplanmış organik tabaka sebebiyle engel yüksekliğinde artış, idealite faktöründe iyileşme, seri dirençte azalma ve şönt direncinde artış meydana geldiğini bildirmişlerdir.

Kılıçoğlu ve Asubay (2005), ince doğal oksit tabakası bulunan ve bulunmayan Au/n-Si Schottky diyotları üretmişlerdir. Numunelerden birini Schottky kontak öncesinde 10 saat süresince temiz odada havaya maruz bırakarak doğal oksit tabakası oluşturmuşlardır. Bu diyotların seri direnç, engel yüksekliği, idealite faktörü, doğrultma oranı ve arayüzey durum yoğunluğu gibi bazı elektronik parametrelerin doğal oksit tabakanın nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Au/n-Si Schottky diyot için, doğrultma oranı, idealite faktörü, seri direnç ve engel yüksekliği değerleri sırasıyla, $\sim 10^5 (\pm 0.8)$, 1.04, 232 Ω ve 0.742 eV'tur. Au/doğal oksit/n-Si Schottky diyot için, doğrultma oranı, idealite faktörü, seri direnç ve engel yüksekliği değerleri sırasıyla, $\sim 10^4 (\pm 0.8)$, 1.15, 247 Ω ve 0.743 eV olarak hesaplamışlardır. Doğal oksit tabakaya sahip diyotta doğrultma oranı hariç diğer parametre değerlerinin oksitlenmemiş diyotun verilerinden büyük çıktığını, bu durumun diyotta doğal oksit tabakanın olmasından kaynaklandığını vurgulamışlardır.

5.3. Işınlamanın Akım-Gerilim Karakteristikleri Üzerindeki Etkileri

Şekil 5.2 a-d ışınlamalardan önce ve sonra oda sıcaklığında D1, D2, D3 ve D4 olmak üzere dört diyotun ters ve doğru beslem yarı-logaritmik akım-gerilim ($I-V$) karakteristikleri gösterilmektedir. Grafiklerden görüldüğü gibi, eğrinin doğru beslemi gösterdiği kısım, akım değerlerinin yoğunluğu için lineerdir. Bu durum baskın akım mekanizmasının termoiyonik emisyon olduğunu gösterir. Grafiklerin lineerlikten saptıkları bölgelerde gerilim arttıkça bükülme görülmektedir. Bu durum seri direncin varlığından kaynaklanmaktadır (Norde, 1979; Cheung ve Cheung, 1986).

Diyotların ters beslem kısmı incelendiğinde termal nötron ışınlamanın ilk dozundan sonra D4 diyotu dışındaki diyotlarda değişim çok küçüktür. İkinci dozdan sonra ters beslem kısmındaki akımda her diyot için bir artış olduğu açıkça görülmektedir. D1 diyotunda diğer diyotların aksine ters beslem kısmında ikinci dozdan sonra artış miktarı çoktur. Ancak ters beslemdeki akımın değişim miktarı her diyot için farklıdır. Yüksek enerjili parçacıklar arayüzeye nüfuz edip arayüzeyin derin bölgelerinde hasara sebep olurken, termal nötronlar gibi düşük enerjili parçacıklar, cihazların yakın arayüzeyinde boşluklar ve kusur kompleksleri gibi örgü kusurlarına yol açar (Dharmarasu vd., 1998). Bu nedenle, ters beslemde akımların değişimlerindeki farklılıklar, yük yoğunluğu değişimine, oksit ara yüzey tabakasının kalınlık farklılıklarına ve Au kaplamaya bağlanabilir. Buna ek olarak, her diyot tek tip termal nötron dozuna maruz kalmayabilir. Termal nötronlar yakalandığında, çekirdeklerden önemli miktarda kinetik enerjiye (birkaç MeV'ye kadar) sahip yüklü parçacıklar (beta gibi) yayılır. β bozunması sırasında, nükleer geri tepme nedeniyle radyasyon hasarı meydana gelir (Haller, 1995; Knoll, 2000). Metal-yarıiletken arayüzeyinde ışınlamanın neden olduğu kusurlar, ters beslem akımında bir artışa neden olur (Borrego vd., 1976; Arulkumaran vd., 1996).



Şekil 5.2. (a)-(d) Au/n-Si/Ag SBD'lerin termal nötron ışınlamalarından önce ve sonra ters ve doğru beslem akım-gerilim (I - V) karakteristikleri

Şekil 5.2 a-d grafiklerinden elde edilen verilerinin hesaplanmasıyla Çizelge 5.2'de n , I_0 ve Φ_{b0} değerleri özetlenmektedir. Tablodan görüleceği gibi ışınlamadan önceki n değerleri her diyot için farklı ve 1.24 ile 1.39 değerleri arasında değişir. Bu durum, Au/n-Si/Ag Schottky diyotların ince oksit arayüzey tabakasının varlığından dolayı metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) konfigürasyonuna sahip olduğunu ve arayüzey tabakasının kalınlığının diyottan diyota değiştiğini göstermektedir (Altındal vd., 2006; Schmitsdorf vd., 1997; Durmuş vd., 2018). Termal nötron ışınlamasının ilk dozundan sonra D1, D2 ve D4 diyotlarının idealite faktörlerinde artış, D3 diyotun idealite faktöründe ise azalma olmuştur. Schottky diyotların I - V karakteristikleri,

arayüzey halleri durumlarının dağılımına ve konsantrasyonuna karşı çok hassastır (Altındal vd., 2006). Termal nötronlar, metal-yarıiletken arayüzünün yakınındaki atomlar tarafından yakalandığında, atomların dönüşümü gözlenir. Böylece metal ve yarıiletken arasında yeni arayüzey halleri oluşur (Abdul ve Chik, 2009). Dolayısıyla n değerindeki değişiklikler, ışınlamalar nedeniyle arayüzey hallerinin dağılımındaki değişime atfedilebilir.

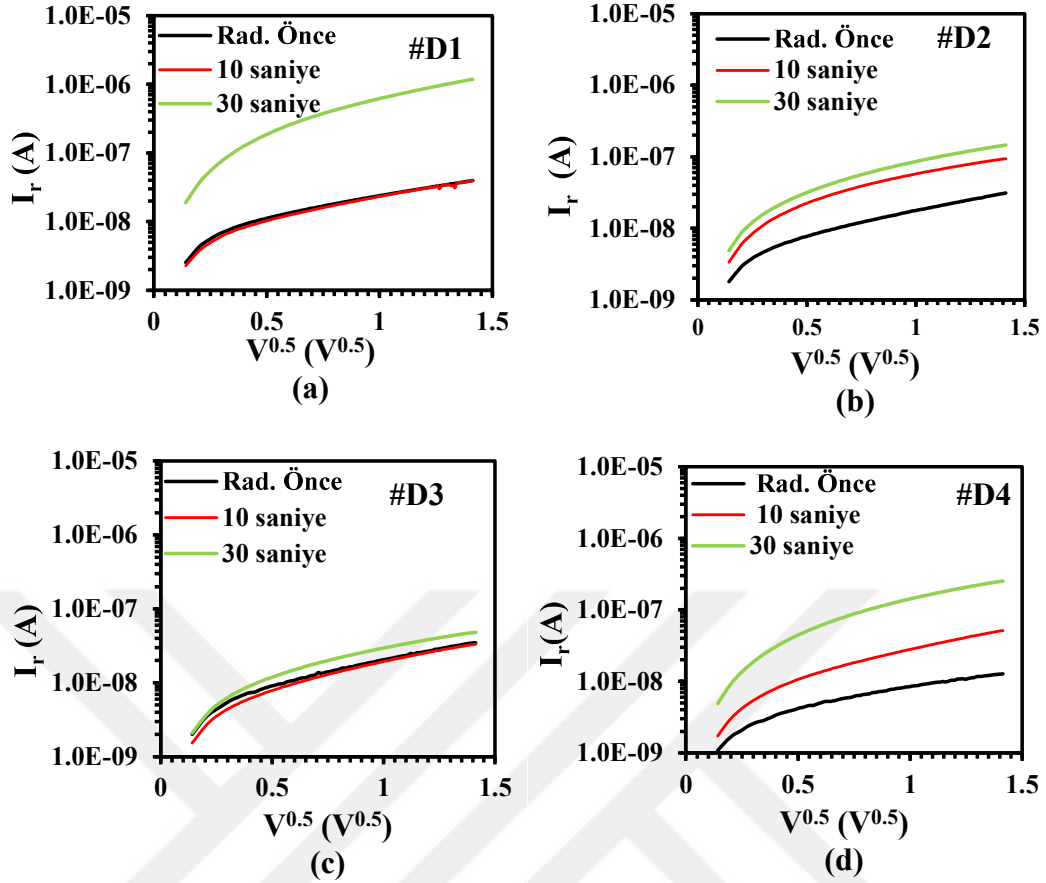
Çizelge 5.2. Diyotların termal nötron ışınlamalarından önce ve sonra I - V karakteristiklerinden elde edilen bazı önemli kontak parametreleri

Diyot No.	n			I_o (nA)			$\Phi_{b0}(I-V)$ (eV)		
	Rad. Önce	10 s	30 s	Rad. Önce	10 s	30 s	Rad. Önce	10 s	30 s
D1	1.29	1.34	1.77	3.31	3.01	17.60	0.80	0.80	0.75
D2	1.24	1.44	1.44	2.58	3.67	5.95	0.80	0.79	0.78
D3	1.39	1.30	1.37	2.58	1.64	2.21	0.80	0.81	0.81
D4	1.25	1.41	1.40	1.38	2.52	3.06	0.82	0.80	0.80

Diyotların sıfır beslem engel yüksekliği değerleri, D4 diyotu hariç olmak üzere birbirine oldukça yakındır. Işınlama işlemleri sonrasında bu değerlerde yalnızca çok küçük değişimler gözlenmiştir. Ancak tablodan da görülebileceği üzere, ışınlamaların ardından sıfır beslem engel yüksekliği dağılımında bir değişim meydana gelmiştir. Termal nötronlarla ışınlama engel yüksekliğindeki homojensizliği artırmıştır.

5.4. Işınlamanın Ters Beslem Akım-Gerilim Karakteristiklerinden Elde Edilen Parametreler Üzerindeki Etkileri

Denklem 3.26'dan yararlanılarak Çizelge 5.3'teki β_s , I_o ve Φ_{b0} parametreleri tüm numuneler için hesaplandı. Şekil 5.3 a-d, diyotların ışınlamadan önce ve sonra I_r ve $V^{0.5}$ grafiklerini göstermektedir.



Şekil 5.3. (a)-(d) Au/n-Si/Ag Schottky diyotların termal ışınlama öncesi ve sonrası $I_r \sim V^{0.5}$ eğrileri

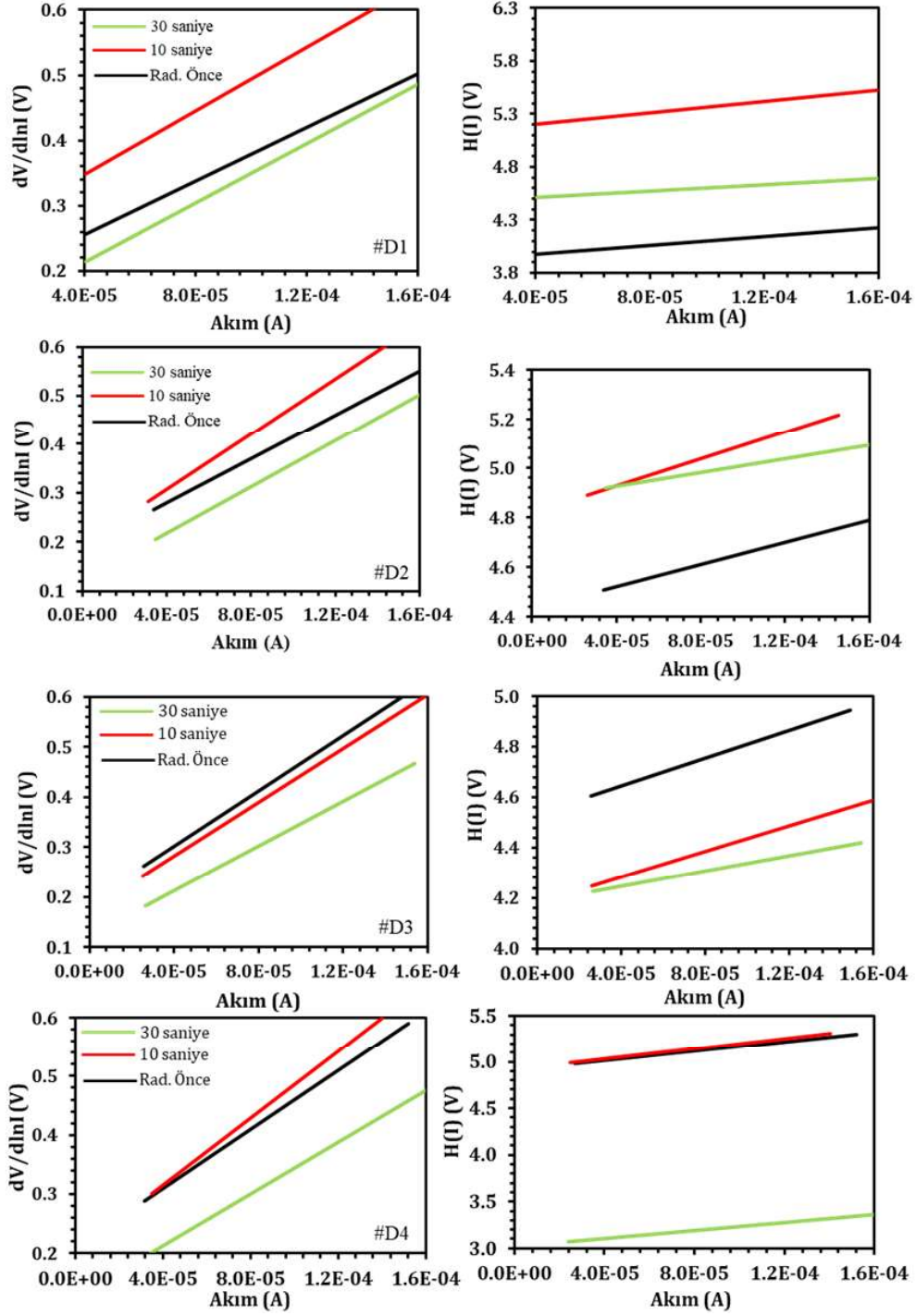
Çizelge 5.3. Termal nötron ışınlamalarından önce ve sonra ters beslem $I-V$ karakteristiklerinden elde edilen bazı önemli kontak parametreleri

Diyot No.	β_s			I_o (nA)	$\Phi_{bo}(I-V)$ (eV)				
	Rad. önce.	10 s	30 s	Rad. önce	10 s	30 s	Rad. önce	10 s	30 s
D1	0.043	0.046	0.063	4.76	4.12	58.3	0.79	0.79	0.72
D2	0.045	0.053	0.053	3.31	8.23	11.7	0.80	0.77	0.76
D3	0.043	0.048	0.049	3.97	3.17	4.77	0.79	0.80	0.79
D4	0.038	0.049	0.050	2.03	4.78	12.8	0.81	0.79	0.76

Çizelge 5.3'te I_o ve Φ_{bo} parametreleri incelendiğinde termal nötron ışınlamasından büyük ölçüde etkilenir. Işınlamalardan sonra diyotların I_o değerlerinde artış,

diyotların Φ_{b0} değerlerinde ise azalma gözlemlenir. Termal nötron ışınlamaları, her bir diyot için Schottky sabiti β_s değerlerinde bir artışa neden olur.

5.5. Işınlamanın Seri Direnç Üzerindeki Etkileri



Şekil 5.4. Au/n-Si/Ag Schottky diyotlarının ışınlamadan önce ve sonra $dV/d\ln I \sim I$ ve $H(I) \sim I$ eğrileri

Şekil 5.4 D1, D2, D3 ve D4 diyotları için Cheung fonksiyonlarına ait $dV/d\ln I$ ve $H(I)-I$ grafiklerini göstermektedir. $dV/d\ln I$ ve $H(I)-I$ grafikleri, sırasıyla Denklem 4.10 ve Denklem 4.13'e göre yarı logaritmik $I-V$ grafiğinin aşağı doğru eğrilik bölgesinde düz çizgiler vermelidir. R_s , bu grafiğin eğiminden belirlenir. İdealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri, sırasıyla $dV/d\ln I$ ve $H(I)-I$ 'ya karşılıklı çizimlerinin y eksenini kesişiminden elde edilir. Cheung fonksiyonları kullanılarak elde edilen Schottky diyot parametreleri Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5.4. Termal ışınlamadan önce ve sonra $dV/d\ln I-I$ ile hesaplanan parametreler

Diyot no.	$dV/d\ln I-I$					
	R_s (k Ω)			n		
	Rad. önce	10 s	30 s	Rad. önce	10 s	30 s
D1	2.10	2.74	1.64	6.37	8.39	7.52
D2	2.26	2.80	1.59	7.33	7.63	8.28
D3	2.76	2.68	1.65	7.36	6.76	6.88
D4	2.51	2.83	2.20	8.06	7.80	4.81

Çizelge 5.4'te diyotların idealite faktörü değerleri incelendiğinde, termal nötron ışınlamalarından etkilenmiştir. Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.4'teki idealite faktörleri karşılaştırıldığında, $dV/d\ln I-I$ grafiklerinden hesaplanan değerlerde geleneksel $I-V$ metodundan elde edilen değerlerden büyük olmaktadır. Geleneksel $I-V$ metodunun ve Cheung fonksiyonlarının, akım-gerilim karakteristiğinin farklı bölgelerinin ele alması Cheung fonksiyonlarından hesaplanan idealite faktörünün büyük olmasının nedenlerinden biridir. Geleneksel $I-V$ metodunda lineer bölgeden hesaplanırken, Cheung fonksiyonlarında lineer olmayan bölgedeki veriler kullanılarak hesaplanır. Lineer olmayan bölgede seri direnç, arayüz tabakası ve arayüz halleri etkindir, lineer bölgede ise sadece arayüzey tabakası ve arayüzey halleri etkindir (Tataroğlu ve Altındal, 2006). Diyotların seri dirençlerinin termal nötron ışınlamalarından etkilendiği açıkça görülmektedir. İlk dozdan sonra D1, D2 ve D4 diyotlarının seri direnç değerleri artar. Literatürde gama ışını ve proton ışınlanmış diyotlar için seri dirençte artış gözlemlenmiştir (Karmarkar vd., 2004; Pillai vd., 2012). Bu durum, çoğunluk taşıyıcı konsantrasyonunun ve hareketliliğin azalmasına bağlamışlardır

(Pillai vd., 2012). İkinci dozdan sonra tüm diyotların seri direnç değerleri beklenmedik şekilde düşmüştür. Gama ışını ile ışınlanmış Schottky diyotları ve güneş pilleri için de benzer sonuçlar bildirilmiştir (Zeyrek vd., 2013; Kumar vd., 2018).

Çizelge 5.5. Termal ışınlamadan önce ve sonra $H(I)-I$ ile hesaplanan parametreler

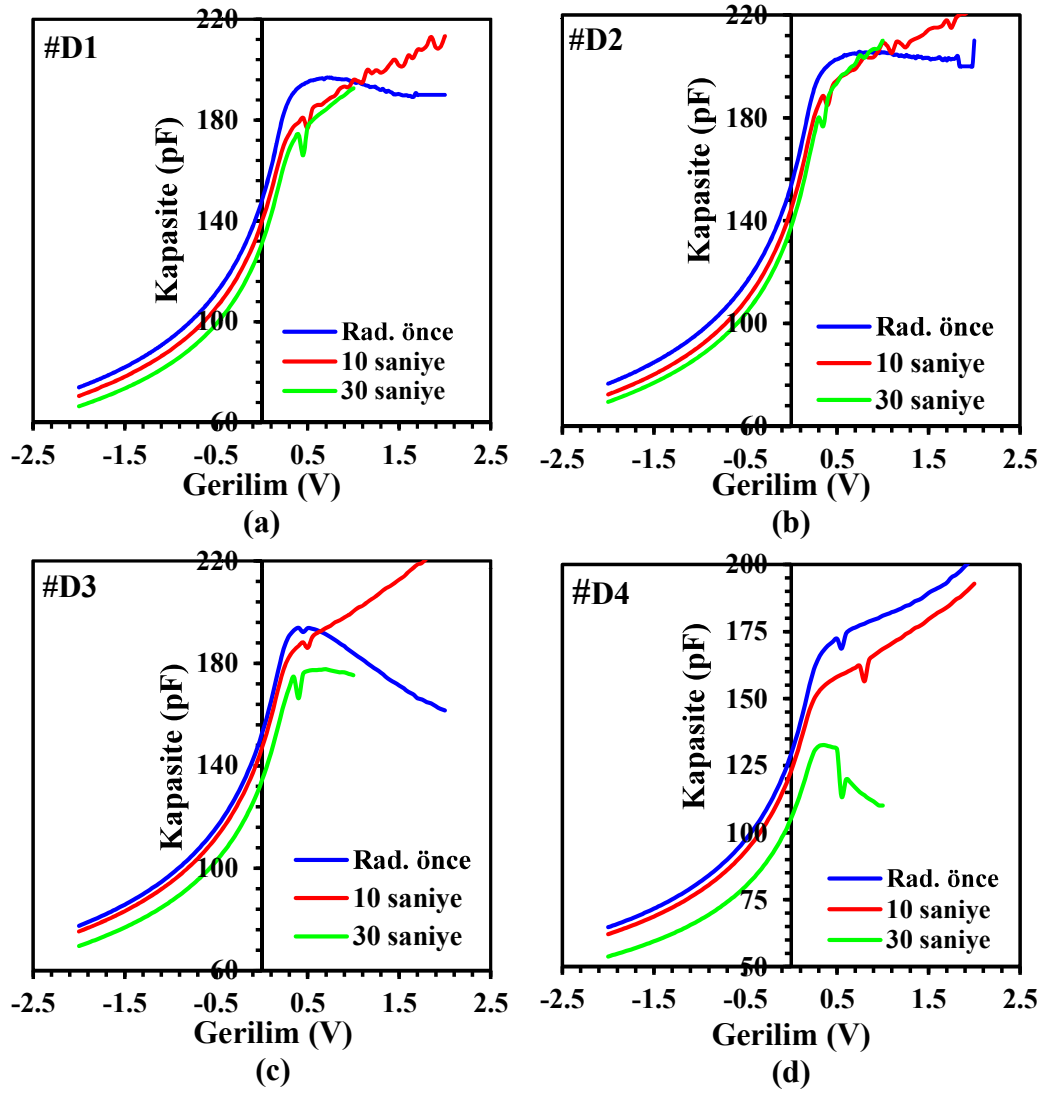
Diyot no.	$H(I)-I$					
	R_s (k Ω)			Φ_b (eV)		
	Rad. önce	10 s	30 s	Rad. önce	10 s	30 s
D1	2.09	2.73	1.65	0.61	0.61	0.59
D2	2.21	2.75	1.60	0.60	0.63	0.59
D3	2.74	2.54	1.66	0.62	0.62	0.61
D4	2.50	2.80	2.20	0.61	0.63	0.63

Çizelge 5.5'te $H(I)-I$ eğrilerinden her bir diyot için hesaplanan, engel yüksekliği değerlerinde nötron ışınlamalarından sonra önemli ölçüde bir değişiklik olmamaktadır. Çizelge 5.2'den geleneksel $I-V$ metoduyla elde edilen engel yüksekliği değerleri, Cheung fonksiyonlarından elde edilen engel yüksekliği değerleri ile kıyaslandığı zaman daha büyük çıkmıştır. Literatürde de genel olarak geleneksel $I-V$ metodundan elde edilen engel yüksekliğini değerlerinin Cheung fonksiyonlarından bulunan engel yüksekliği değerlerinden büyük olduğu bildirilmiştir (Sağlam vd., 1996; Özdemir vd., 2009). Bu farklılığın nedeni iki metotta $\ln I-V$ grafiğinin farklı bölgelerinin kullanılması olabilir.

5.6. Işınlamanın Kapasite-Gerilim Karakteristikleri Üzerindeki Etkileri

Şekil 5.5 (a)-(d), Au/n-Si Schottky diyotlarının ışınlamalardan önce ve sonra 1 MHz frekansta alınan kapasite-gerilim ($C-V$) karakteristiklerini göstermektedir. Diyotların $C-V$ ölçümleri $-2V$ ve $+2V$ gerilimleri arasında alınmıştır. 1 MHz gibi yüksek frekanslarda arayüzey tabakası ince olan Schottky diyot kontaklarda kontağın kapasitesi yalnızca yarıiletkenin deplasyon tabakasındaki yüklerin hareketinden olur, arayüzey halleri kapasiteye etki etmezler. Şekilden görüldüğü gibi ters beslem

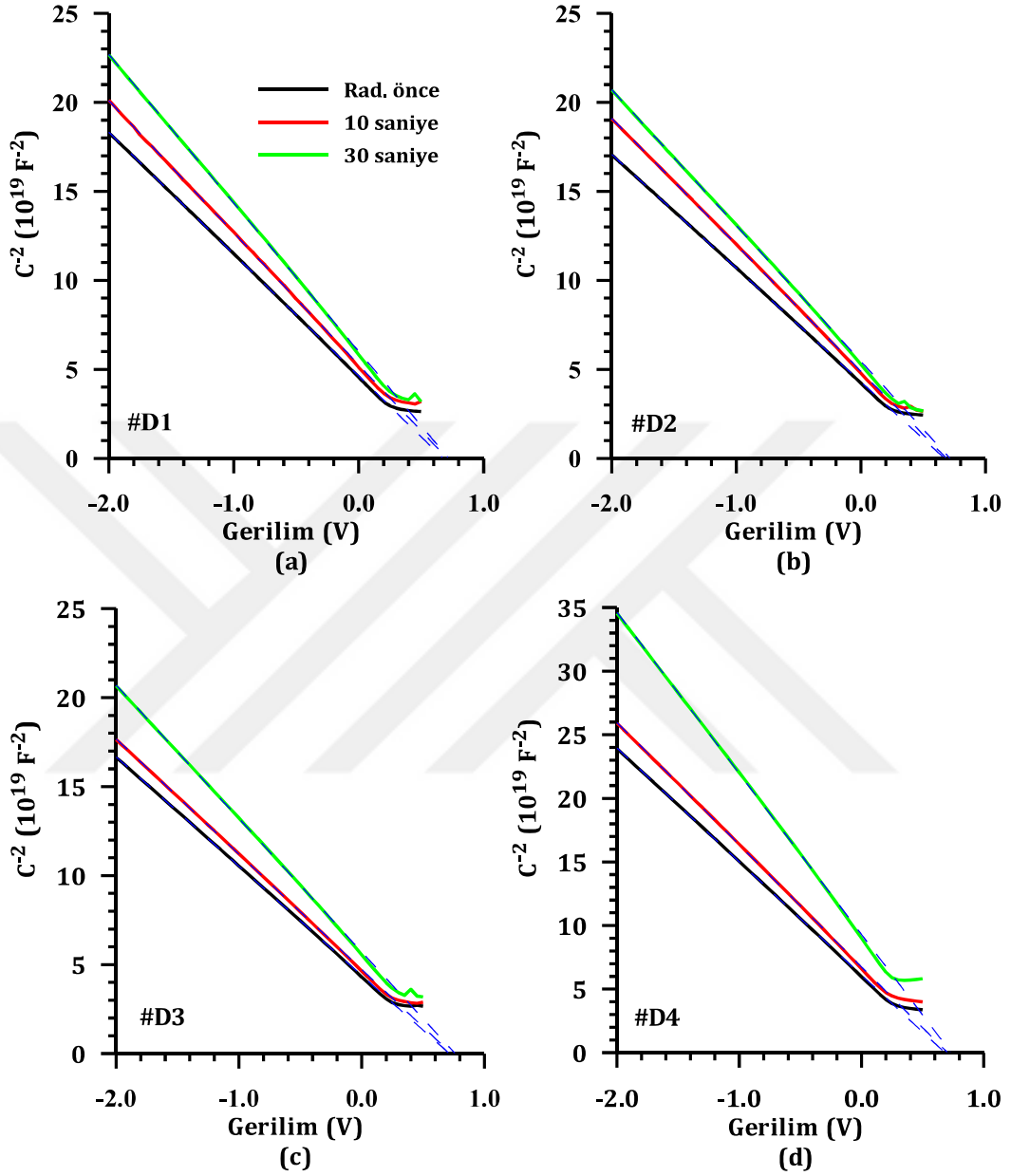
bölgesinde kapasite, ışınlamanın dozunun artmasıyla azalmaktadır. Bu durum donör konsantrasyonunun azalmasına bağlanabilir. β -bozunması sırasında nükleer geri tepmeye bağlı olarak yeni arayüzey durumları ve Frenkel kusurları meydana gelir ve kusurlar donör konsantrasyonundaki azalmaya neden olur (Haller, 1995; Boiko vd., 2006).



Şekil 5.5.(a)-(d) Au/n-Si Schottky diyotlarının ışınlamadan önce ve sonra kapasite-gerilim karakteristikleri

Bölüm 4.2.2’de verilen denklemler yardımıyla D1, D2, D3 ve D4 diyotları için N_d , V_d ve Φ_{b0} parametreleri hesaplanarak Çizelge 5.6’da verilmiştir. Parametrelerin hesaplamaları radyasyon öncesi, ilk doz ve ikinci doz sonundaki sonuçlar göz önüne

alınarak yapılmıştır. Dört diyotun ışınlamadan önceki ve sonraki ters beslem C^{-2} - V karakteristikleri Şekil 5.6 (a)-(d)'de verilmektedir.



Şekil 5.6. (a)-(d). Termal nötron ışınlamalarından önce ve sonra Au/n-Si/Ag Schottky diyotlarının C^{-2} - V grafikleri

Şekilden görülebileceği gibi, Au/n-Si/Ag Schottky diyotlarının C^{-2} - V özellikleri termal nötron ışınlamasından etkilenmektedir. Tüm diyotların kapasite-gerilim özellikleri doza bağlı olarak benzer davranış göstermektedir. C^{-2} - V karakteristiklerinden elde edilen önemli N_d , V_d ve Φ_b parametreleri Çizelge 5.6'da listelenmektedir.

Çizelge 5.6. Termal ışınlamadan önce ve sonra C^2-V karakteristiklerinden elde edilen parametreler

Diyot No.	$N_d (\times 10^{15} \text{ cm}^{-3})$			$V_d (\text{V})$			$\Phi_b (C-V) (\text{eV})$		
	<i>Rad. önce</i>	10 s	30 s	<i>Rad. önce</i>	10 s	30 s	<i>Rad. önce</i>	10 s	30 s
D1	2.83	2.61	2.33	0.70	0.73	0.75	0.94	0.97	0.99
D2	3.04	2.73	2.54	0.70	0.71	0.74	0.93	0.95	0.98
D3	3.16	3.00	2.59	0.74	0.76	0.79	0.98	0.99	1.03
D4	2.17	2.02	1.53	0.71	0.73	0.76	0.95	0.98	1.01

Uyarılmış bir ^{31}Si çekirdeği, doğal Si'de %3.05 oranında bol bulunan ^{30}Si tarafından nötronun yakalanmasıyla oluşur. ^{31}Si çekirdeği, temel durumuna ulaşmak için bir γ fotonu yayar. ^{31}Si izotopunun temel durumu kararsız olduğundan, çekirdek bir elektron artı bir elektron antinötrino (β -bozunması) yayar ve kararlı ^{31}P (fosfor) çekirdeğine dönüşür. Bu β -bozunmasının 2,62 saatlik kısa bir yarı ömrü vardır (Hoffmann, 1981; Haas ve Schnoller, 1976; IAEA, 2012). Fosforun Si için n-tipi bir katkı maddesi olduğu dikkate alındığında, diyotların N_d değerlerinin her dozdan sonra artması gerekir (Mousty vd., 1974). Fakat Çizelge 5.6'ten görüldüğü gibi, N_d değerleri her dozdan sonra azalmıştır. Önceki bölümde belirtildiği gibi, β -bozunması sırasında nükleer geri tepme nedeniyle arayüzey durumları ve Frenkel kusurları oluşur bu kusurlar N_d değerlerinde azalmaya neden olur (Haller, 1995; Boiko vd., 2006). Gözlemlenen taşıyıcı uzaklaştırma etkisi, hızlı nötron ışınlamasının Schottky diyotlar üzerindeki etkileriyle ilgili çeşitli çalışmalar tarafından da bildirilmiştir (Borrego vd., 1976; Novoselnik vd., 2010; Omar vd., 2012; Zhang vd., 2010).

Çizelge 5.6'ya göre, D1, D2, D3 ve D4 diyotları her iki termal nötron dozundan sonra V_d ve $\Phi_b(C-V)$ değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Termal nötron ışınlaması n-Si'de taşıyıcı kompanzasyonuna yol açmaktadır. Hudait ve Krupanidhi (2001), deneysel sonuçlarına göre, Schottky engel yüksekliği ile katkılama yoğunluğu ters orantılıdır. Dolayısıyla çoğunluk taşıyıcısının ışınlama ile telafi edilmesi V_d ve $\Phi_b(C-V)$ değerlerinde artışa neden olur. Eğer yüzeydeki Fermi seviyesi nötr seviye ile çakışmıyorsa, metal ile yarıiletken arasında temas varsa arayüzey durumları adı

verilen yüzey durumlarının varlığı, yüzeyde net bir yük oluşmasına neden olur. Negatif bir yüzey yükü olduğunda yarıiletken bantlar yukarı ve yüzeye doğru bükülür (Rhoderick ve Williams, 1988; Mårtensson vd., 1986). Sonuç olarak, yarıiletken doğal bir engel yüksekliğine sahiptir ve daha yüksek bir engel yüksekliği, bu durumların daha yüksek yoğunluğundan kaynaklanır. Bu nedenle, termal nötron ışınlaması sonrasında radyasyon kaynaklı yüzey veya arayüzey hallerinin ortaya çıkmasıyla V_d ve $\Phi_b(C-V)$ değerlerindeki artışı da açıklanabilir.

Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.6'dan görülebileceği gibi, $\Phi_b(C-V)$ değerleri her dozdan sonra belirgin şekilde artarken, Φ_{b0} değerlerindeki değişiklik azdır. Bu durum, $C-V$ ve $I-V$ yaklaşımlarının farklı doğalarına bağlanabilir. $C-V$ ölçümlerinde, küçük bir ac gerilimi bir dc gerilim üzerine bindirilirken, $I-V$ ölçümleri ise yalnızca bir dc gerilim ile yapılır (Chin ve Newbury, 1992; Karataş ve Türüt, 2006). Sonuç olarak, $\Phi_b(C-V)$ ve Φ_{b0} 'ın termal nötron ışınlamasının neden olduğu kusurlara tepkisi farklı olabilir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Au/n-Si/Ag Schottky diyotlarda ve diyot parametrelerinde termal nötron ışınlaması sonucu oluşan nötron dönüşümü ve yer değiştirme hasarı etkilerinin ortaya çıkarılması amaçlandı. Bu nedenle Au/n-Si/Ag Schottky diyotu imal edildi ve 10 s ve 30 s olmak üzere iki farklı sürede termal radyasyona maruz bırakıldı. Radyasyon uygulanmadan önce ve her iki doz süresi sonunda $I-V$ ve $C-V$ karakteristikleri alındı. $I-V$ karakteristiklerinden, geleneksel $I-V$ metodu ve Cheung fonksiyonları yöntemleriyle n , I_0 , Φ_{b0} , R_s , β_s ve $C-V$ karakteristiklerinden N_d , V_d ve Φ_b diyot parametreleri belirlendi. Ayrıca, diyotlardaki elementlerin termal nötron ışınlamasından sonra dönüşümleri gözlemleyebilmek için EDS haritalaması ve SEM görüntülenmesi yapıldı.

Şekil 5.1’de EDS analizi ve SEM görüntülerinden elde edilen bilgilere göre, silisyum çekirdeklerinin termal nötron ışınlarını kapmalarından dolayı fosfora, aynı şekilde altın çekirdekleri de civaya dönüşmüştür. Oksitlenmelerden dolayı yüzeyde oluşan oksijen çekirdeklerinin flora dönüşme ihtimalinin az olmasına karşın diyot birden fazla ışınlama işlemine maruz kaldığından dönüşüm gerçekleşmiştir. İlk defa bu tez kapsamında termal nötronlarla ışınlamalar sonucu ortaya çıkan altın, silisyum ve oksijen elementlerinin dönüşümleri EDS analizleriyle gösterilmiştir. EDS analizinden ve SEM görüntülerinden görüldüğü gibi, Au çekirdeklerinin termal nötronu yakalamasıyla Au’nun Hg’ye dönüşmesi sonucu Schottky kontak diyot artık yalnızca Au/n-Si değil, Hg/Au/n-Si Schottky diyota dönüşmüştür.

Şekil 5.2 ve Çizelge 5.2’de $I-V$ karakteristiklerinden elde edilen verilere göre, ışınlamalardan önce D1, D2, D3 ve D4 diyotları için n değerleri sırasıyla 1.29, 1.24, 1.39 ve 1.25 olarak bulundu. Işınlamalardan sonra D1, D2, D4 diyotlarında n değerlerinde artış mevcutken, D3 diyotunda azalma gözlemlendi. D1, D2, D4 diyotları için sırasıyla 1.77, 1.44 ve 1.40’tır. D3 diyotu için idealite faktörü değeri 1.30 olarak hesaplandı. Uğurel vd. (2008), $3 \times 10^{12} \text{ e}^-/\text{cm}^2$ akıya sahip 6 MeV elektron ile Au/n-Si/Al Schottky diyotunu ışınlamışlardır. $I-V$ ’den hesaplanan idealite faktörü değerlerini ışınlama öncesi 1.44, ışınlama sonrası 1.96 olarak bulmuşlardır. Işınlama sonrası idealite faktörünü artırmasını, elektron ışınlamasından meydana gelen kristal

örgü kusurlarına atfetmişlerdir. Bodunrin ve Moloi (2025), Au/n-Si/Al Schottky diyotunu 1 MeV'luk 10^{15} ve 10^{16} n/cm²'lik iki doz nötron ışınlarıyla ışınlamışlar ve diyotun idealite faktörü değerlerini ışınlama öncesi ve ışınlama sonrası 2.11, 2.26 ve 3.89 olarak elde etmişlerdir. Artan doz ile idealite faktörü değerinin artışı ışınlamadan dolayı oluşan kusurlara bağlamışlardır.

Termal nötron ışınlamalarının etkisiyle boşluklar ve yüzey kusurlarında artış meydana gelir ve bu durum da metal/yarıiletken arayüzeyindeki tuzak yoğunluğunun artmasına neden olur. Tuzak yoğunluğunun yüksek olması akım iletimini zorlaştırır. Bu nedenle ışınlamalardan sonra sızıntı akımında artış olur (Eftekharı, 1993). Termal nötron ışınlamalarından sonra diyotların seri dirençlerinde değişimler gözlemlenmektedir. İkinci dozdan sonra bütün diyotların seri direnç değerleri azalmaktadır. Sıfır beslem engel yüksekliği (Φ_{b0}) değerleri termal nötron ışınlamalarından sonra çok az değişime uğramaktadır. Diyotlar daha yüksek bir doza maruz bırakıldığında sıfır beslem engel yüksekliğinde daha yüksek bir değişikliğe yol açacağı öngörülmektedir. Tüm diyotların ters beslem karakteristiğinden elde edilen sıfır beslem engel yüksekliği değerleri toplam ışınlamadan sonra azalmaktadır. Singh vd. (2001), Au/n-Si Schottky diyotunu 100 MeV hızlı ağır iyonlarla ışınlamış ve ışınlama öncesi ve sonrası engel yüksekliği değeri ışınlamadan önce 0.83 eV, ışınlamalardan sonra sabit bir şekilde 0.66 eV kaldığını bildirmişlerdir. Işınlamaların sonucunda engel yüksekliğinin Bardeen limitine kaydığını, bu durumun kusur konsantrasyonunun artışından ileri geldiğini söylemişlerdir. Kumar vd. (2007), 180 MeV $^{107}\text{Ag}^{14+}$ hızlı ağır iyonlarda farklı dozlarda Au/n-Si Schottky diyotunu ışınlamışlardır. Işınlama öncesi engel yüksekliği değeri 0.74 ± 0.01 eV'e çıkarken, 1×10^{11} iyon/cm² ve 5×10^{12} iyon/cm² doz aralığındaki ışınlama sonrası engel yüksekliği ilk doz için 0.69 ± 0.01 eV'a düşmüş, daha sonra doz artırılmasına rağmen bile engel yüksekliği hemen hemen değişmemiştir. Engel yüksekliğindeki düşüşün ışınlamadan dolayı oluşan kusurlardan kaynaklandığını, fakat doz artırılmasına rağmen belirli bir eşikten sonra engel yüksekliğinde değişikliğe yol açmadığını bildirmişlerdir.

Işınlamanın ters beslem I - V karakteristiğinden elde edilen parametreleri Şekil 5.3'ten ve Çizelge 5.3'te ele alındı. Denklem 3.26'dan yararlanılarak Schottky sabiti (β_s) ve

sızıntı akımı (I_0) parametreleri hesaplanmıştır ve Çizelge 5.3'te verilmiştir. I_0 değerlerinde, termal nötron ışınlamasına maruz bırakıldıktan sonra artış görüldü. Sızıntı akımındaki artış sıfır beslem engel yüksekliği ile ters orantılıdır. Termal nötron ışınlaması sıfır beslem engel yüksekliği değerlerinde azalmaya neden olmuştur. β_s değerleri incelendiğinde her bir diyot için termal nötron ışınlaması Schottky sabiti değerlerinde artışa neden oldu.

Şekil 5.4'ten termal nötron ışınlamalarından önce ve sonra diyotun n , R_s ve Φ_b parametreleri Cheung fonksiyonları kullanılarak hesaplandı. İdealite faktörü her bir diyot için hesaplandığında ilk dozdan sonra tüm diyotların için artış gözlemlendi. D1 ve D4 diyotlarının idealite faktörü ikinci dozdan sonra azaldı. D2 ve D3 diyotlarında ise ilk dozdan sonra artış görüldüğü gibi ikinci dozdan sonra da artış görüldü. Diyotların Φ_b engel yüksekliği değerlerinde ışınlamalardan sonra önemli bir değişim olmadı. Diyotların seri dirençlerinin termal nötron ışınlamalarından etkilendiği açıkça görülebilir. İlk dozdan sonra, D1, D3 ve D4 diyotlarının seri dirençleri artmıştır. Bu durum, çoğunluk taşıyıcı konsantrasyonunun ve mobilitenin azalmasına bağlanabilir. İkinci dozdan sonra, tüm diyotların seri direnç değerlerinde beklenmedik şekilde azalma görülmektedir. Akgül vd. (2021), 10 kGy ^{60}Co γ -ışını ile ışınladıkları Au/SnO₂/n-Si Schottky diyotunun Cheung fonksiyonlarından elde ettikleri seri direnç, idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerinin ışınlamadan sonra arttığını ifade etmişlerdir.

Diyotun C - V ölçümleri -2V ve +2V gerilimleri arasında oda sıcaklığı altında alınmıştır. Ters beslem bölgesindeki kapasitede, her dozdan sonra azalma görüldü. Kapasitedeki azalma donör konsantrasyonunun azalmasına neden olur. Şekil 5.6 ve Çizelge 5.6'dan, C^{-2} - V karakteristiğinden elde edilen veriler ışığında tüm diyotların ışınlama öncesi ve her iki doz sonrası değerlerine bakıldığında C^{-2} - V grafiğinin eğiminden hesaplanan, donör konsantrasyon (N_d) değerlerinde azalma görüldü. Tüm diyotların difüzyon potansiyeli (V_d), katılanan verici atomların yoğunluğu ile ters orantılı olarak artmıştır. $\Phi_b(C-V)$ değerleri taşıyıcı kompanzasyonundan kaynaklanan sebeplerden dolayı her ışınlama dozundan sonra arttığı gözlemlendi. Termal nötron ışınlaması $\Phi_b(C-V)$ ve $\Phi_{b0}(I-V)$ üzerinde farklı etkilere neden olmuştur, bunun sebebi $I-V$ ve $C-V$ ölçümlerinin yapılarının farklı olmasına atfedilebilir. Verma vd. (2014),

^{60}Co γ -radyasyonu ile Au/n-Si Schottky diyetunu farklı dozlarda ışınlamışlar ve $C-V$ den elde ettikleri engel yüksekliği değerleri doz arttıkça azalmış, diyetun donör konsantrasyonu ışınlamadan sonra küçük dozlarda azalma eğilimi göstermiş daha sonraları doz artsa bile bazı dozlarda arttığını ifade etmişlerdir. Uğurel vd. (2008), 1000 kHz frekansta alınan ölçümlerden donör konsantrasyonu değerinin ışınlamadan sonra azalma, engel yüksekliğinde ise ışınlama sonrası artış gözlemlemişlerdir. Salari vd. (2016), Au/n-Si/Au-Sb Schottky diyetunu γ -ışını ile radyasyona maruz bırakarak diyetun $I-V$ ve $C-V$ karakteristiklerinden diyet parametrelerini elde etmişlerdir. $C^{-2}-V$ grafiğinden elde edilen difüzyon potansiyeli ışınlama öncesi iki farklı frekansta ölçülmüş ve yüksek frekansta daha yüksek sonuçlar elde edildiğini ifade etmişlerdir. Radyasyon sonrası ise aynı şekilde iki farklı frekansta ölçüm yapılmış ve yüksek frekansta difüzyon potansiyelinde artış olduğunu bildirmişleridir. Donör konsantrasyonu değerlerinde ışınlama sonrası azalma, engel yüksekliğinde de ışınlama sonrası artış gözlemlemişlerdir. Diyetun gama radyasyonuna karşı çok hassas olduğunu, radyasyonun arayüzey hallerinde kusurlar oluşturabileceğini ve yer değiştirme kaynaklı hasarlar meydana getirebileceğini ifade etmişlerdir.

Bu çalışmada, termal nötronlarla ışınlanan Au/n-Si/Ag Schottky diyetlerin radyasyon sonucunda diyetlardaki değişiklikler incelendi. Si atomu termal nötronlarla ışınlamasından sonra transmutasyon katkılama dolay ^{31}P elementine dönüştü ve n-tipi iletkenliğin kontrollü şekilde sağlanabileceği gösterildi. Silisyum bu tür reaksiyonlar için uygundur, çünkü transmutasyon katkılama sonucu dönüştüğü fosfor endüstride genellikle kullanılan bir katkı maddesidir. Silisyum dışında Ge, GaAs, SiC, GaN, CZTS ve CIGS gibi yarıiletken malzemelerde de transmutasyon katkılama uygulanabilirliği gelecek çalışmalar için bir araştırma konusu olabilir. Termal nötron ışınlamasından sonra diyetler dikkatlice tavlaniırsa ortaya ilginç özellikler çıkabilir. Çünkü doğru yapılan tavlama diyetteki kusurları ortadan kaldırır. Bir ön değerlendirme yapılrısa; GaAs izotopların çoğu nötronlarla etkileşime girer. Fakat istenmeden oluşan safsızlıklardan ötürü katkılama çok uygun değildir. CZTS ve CIGS gibi güneş hücrelerinde çok kullanılan yarıiletkenler birçok element içerdiğinden termal nötronların etkileri öngörebilmek ve kontrolünü sağlayabilmek zor gözükmeıktedir. Germanyum teorik olarak mümkün olsa da katkılamaıyla arseniğe dönüşecektir ve izotopların radyoaktif olması deneıyselde sınırlılık getirebilir. Termal nötronlardan kaynaklanacak transmutasyonlar göz önüne alındığında SiC, termal

nötronlar ile katkılama etkilerini belirlemek için en uygun kullanılabilir adaylardan biri olarak gözükmektedir.



KAYNAKLAR

- Abdul, Amir, H.F., Chik, A., 2009. Neutron Radiation Effects on Metal Oxide Semiconductor (MOS) Device. Nuclear Instruments Methods Physics Res Sect B Beam Interact with Mater Atoms, 267(18), 3932-3036.
- Akgül, F.D., Eymur, S., Akin, Ü., Yüksel, Ö.F., Karadeniz, H., Tuğluoğlu, N., 2021. Investigation of Schottky Emission and Space Charge Limited Current (SCLC) in Au/SnO₂/n-Si Schottky Diode with Gamma-ray Irradiation. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 32(12), 15857-15863.
- Akkurt, I., Akyıldırım, H., Özdemir, A.F., Aldemir, D.A., 2010. Neutron Irradiation Effects on I-V Characteristics of Au/n-GaAs Schottky Diodes. Radiation Measurements, 45(10), 1381-1383.
- Akyıldırım, H., 2011. Ağır Betonların Nükleer Radyasyon Zırhlama Özelliklerinin Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 95s, Isparta.
- Aldemir, D.A., Aldemir, R., Kökce, A., Duman, S., Özdemir, A.F., 2019. The Effects of Thermal Neutron Irradiation on Current-Voltage and Capacitance-Voltage Characteristics of Au/n-Si/Ag Schottky Barrier Diodes. Silicon, 11, 2647-2657.
- Altındal, Ş., Dökme, İ., Bülbül, M.M., Yalçın, N., Serin, T., 2006. The Role of the Interface Insulator Layer and Interface States on the Current-Transport Mechanism of Schottky Diodes in Wide Temperature Range. Microelectronic Engineering, 83(3), 499-505.
- Altındal, Ş., Yücedağ, İ., Tataroğlu, A., 2009. Analysis of Surface States and Series Resistance in Au/n-Si Schottky Diodes with Insulator Layer Using Current-Voltage and Admittance-Voltage Characteristics. Vacuum, 83(3), 363-368.
- Anderson, W.A., Kim, J.K., Delahoy, A.E., 1977. Barrier Height Modification in Silicon Schottky (MIS) Solar Cells. IEEE Transactions on Electron Devices, 24(4), 453-547.
- Arulkumaran, S., Arokiaraj, J., Dharmarasu, N., Kumar, J., 1996. On the Enhancement of Effective Barrier Height in Ti/n-GaAs Schottky Barrier Diodes. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 199(4), 529-522.
- Ashok, S., Borrego, J.M., Gutmann, R.J., 1978. Radiation Effects in GaAs MIS Schottky Diodes. IEEE Transactions on Nuclear Science, 25(6), 1473-1478.
- Aydemir, U., Taşçıoğlu, İ., Altındal, Ş., Uslu, İ., 2013. A Detailed Comparative Study on the Main Electrical Parameters of Au/n-Si and Au/PVA:Zn/n-Si Schottky Barrier Diodes. Materials Science in Semiconductor Processing, 16(6), 1865-1872.

- Ayyıldız, E., Türüt, A., Efeoğlu, H., Tüzemen, S., Sağlam, M., Yoğurtçu, Y.K., 1996. Effect of Series Resistance on the Forward Current-Voltage Characteristics of Schottky Diodes in the Presence of Interfacial Layer. *Solid-State Electronics*, 39(1), 83-87.
- Bernat, R., Bakrač, L., Radulović, V., Snoj, L., Makino, T., Oshima, T., Pastuović, Ž., Čapan, I., 2021. 4H-SiC Schottky Barrier Diodes for Efficient Thermal Neutron Detection. *Materials*, 14(17), 5105.
- Biggeri, U., Borchì, E., Bruzzi, M., Li, Z., Verbitskaya, E., 1998. Radiation Damage on Silicon After Very High Neutron Fluence Irradiation. *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements*, 61(3), 475-480.
- Bilkan, Ç., Altındal, S., 2017. Investigation of the C-V Characteristics that Provides Linearity in a Large Reverse Bias Region and the Effects of Series Resistance, Surface States and Interlayer in Au/n-Si/Ag Diodes. *Journal of Alloys and Compounds*, 208, 464-469.
- Bilkan, Ç., Azizian-Klandaragh, Y., Sevgili, Ö., Altındal, Ş., 2019. Investigation of the Efficiencies of the (SnO₂-PVA) Interlayer in Au/n-Si (MS) SDs on Electrical Characteristics at Room Temperature by Comparison. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 20479-20488.
- Bodunrin, J.O., Moloi, S.J., 2025. Effect of 1 MeV Neutron-Irradiation on the electrical Properties of Si-based Diodes. *Journal of Instrumentation*, 20(04), P04007.
- Boiko, V.M., Bublik, V.T., Voronova, M.I., Kolin, N.G., Merkurisov, D.I., Shcherbachev, K.D., 2006. Structure of InP Single Crystals Irradiated with Reactor Neutrons. *Physica B: Condensed Matter*, 373(1), 82-89.
- Borrego, J.M., Gutmann, R.J., 1976. Changes in Au-GaAs Schottky Barrier Diodes with Low Neutron Fluence. *Applied Physics Letters*, 28(5), 280-282.
- Borrego, J.M., Gutman, R.J., Ashok, S., 1976. Neutron Radiation Effects in Gold and Aluminum GaAs Schottky Diodes. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 23(6), 1671-1678.
- Cheung, S.K., Cheung, N.W., 1986. Extraction of Schottky Diode Parameters from Forward Current-Voltage Characteristics. *Applied Physics Letters*, 49(2), 85-87.
- Chin, W.L., Newbury, V.M., 1992. Determination of Barrier Height and Doping Density of a Schottky Diode from Infrared Photoresponse Measurements. *Australian Journal of Physics*, 45(6), 781-788.
- Cindro, V., Kolar, J., Kramberger, G., Mikuž, M., Zavrtanik, M., 2002. Bistable Damage in Neutron-Irradiated Silicon Diodes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 476(3), 565-568.

- Coltman, R.R., Klabunde, C.E., Redman, J.K., 1967. Survey of Thermal-Neutron Damage in Pure Metals. *Physical Review*, 156(3), 715-734.
- Dennis, J.A., 1966. Neutron Flux and Energy Measurements. *Physics in Medicine & Biology*, 11(1), 1-14.
- Deshpande, N.P., 2007. *Electronic Devices and Circuits: Principles and Applications*. Tata McGraw-Hill, 773 p., New Delhi.
- Dharmarasu, N., Arulkumaran, S., Sumathi, R.R., Jayavel, P., Kumar, J., Magudapathy, P., Nair, K.G.M., 1998. Low Energy Proton Irradiation Induced Interface Defects on Pd/n-GaAs Schottky Diodes and its Characteristics. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 140(1-2), 119-123.
- Durmuş, H., Kılıç, H.Ş., Gezgin S.Y., Karataş, Ş., 2018. Analysis of Current-Voltage-Temperature and Capacitance-Voltage-Temperature Characteristics of Re/nSi Schottky Contacts. *Silicon*, 10, 361-369.
- Duzellier, S., 2005. Radiation Effects on Electronic Devices in Space. *Aerospace Science and Technology*, 9(1), 93-99.
- Eftekhari, G., 1993. Electrical Characteristics of Selenium-Treated GaAs MIS Schottky Diodes. *Semiconductor Science and Technology*, 8(3), 409-411.
- Ejderha, K., Karabulut, A., Türkan, N., Türüt, A., 2017. The Characteristics Parameters of Ni/n-6H-SiC Devices Over a Wide Measurement Temperature Range. *Silicon*, 9(3), 395-401.
- Frontasyeva, M., Steinnes, E., 2004. Marine Gradients of Halogens in Moss Studies by Epithermal Neutron Activation Analysis. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 261(1), 101-106
- Giudice, A.L., Fasolo, F., Durisi, E., Manfredotti, C., Vittone, E., Fizzotti, F., Rosi, G., 2007. Performances of 4H-SiC Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 583(1), 177-180.
- Haas, E.W., Schnoller, M.S., 1976. Phosphorus Doping of Silicon by Means of Neutron Irradiation. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 23(8), 803-805.
- Haller, E.E., 1995. Isotopically Engineered Semiconductors. *Journal Applied Physics*, 77(7), 2857-2878.
- Hazdra, P., Zahlava, V., Vobecký, J., 2014. Point Defects in 4H-SiC Epilayers Introduced by Neutron Irradiation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 327, 124-127

- Hoffmann, H.J., 1981. Neutron Transmutation Doping of Silicon and Other Semiconducting Materials. *Journal Applied Physics*, 52(6), 4070-4074.
- Huang, X., Kang, M., 2016. Nuclear Data Sheets for A= 198. *Nuclear Data Sheets* 133:221-416.
- Hudait, M.K., Krupanidhi, S.B., 2001. Doping Dependence of the Barrier Hight and Ideality Factor of Au/n-GaAs Schottky Diodes at Low Temperatures. *Physica B: Condensed Matter*, 307(1-4), 125-137.
- Huseynov, E., Garibli, A., 2016. Effect of Neutron Flux on the Frequency Dependencies of Electrical Conductivity of Silicon Nanoparticles. *Revista Mexicana de Fisica*, 62(4), 299-303.
- IAEA, 2012. Neutron Transmutation Doping of Silicon at Research Reactors, IAEA-TECDO-1681, Vienna.
- 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 and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 566(2), 584-589.
- Karmarkar, A.P., Jun, B., Fleetwood, D.M., Schrimpf, R.D., Weller, R.A., White, B.D., Mishra, U.K., 2004. Proton Irradiation Effects on GaN-based High Electron-Mobility Transistors with Si-doped Al/sub x/Ga/sub 1-x/N and Thick GaN Cap Layers. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 51(6), 3801-3806.
- Kasap, S.O., 2002. *Principles of Electronic Materials and Devices*, 2nd Edn., McGraw Hill, 745 p., International Edition.
- Kaschieva, S., Rebohle, L., Skorupa, W., 2003. Defect Formation in Oxygen-and Boron-Implanted MOS Structures After Gamma Irradiation. *Applied Physics A*, 76, 823-826.
- Keffous, A., Said, M., Cheriet, A., Benrekaa, N., Belkacem, Y., Menari, H., Dahmani, A., 2004. Comparison of Electrical and Optical Parameters of Au/n-Si and Ag/n-Si Schottky Barrier Photodiodes. *Applied Surface Science*, 236(1-4), 42-49.
- Kılıçoğlu, T., Asubay, S., 2005. The effect of Native Oxide Layer on Some Electronic Parameters of Au/n-Si/Au-Sb Schottky Barrier Diodes. *Physica B: Condensed Matter*, 368(1-4), 58-63.
- Knoll, G.F., 2000. *Radiation Detection and Measurement*. John Willey and Sons. USA
- Kumar, S., Katharria, Y.S., Batra, Y., Kanjilal, D., 2007. Influence of Swift Heavy Ion Irradiation on Electrical Characteristics of Au/n-Si (100) Schottky Barrier Structure. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(22), 6892.

- Kumar, S., Kumar, M.V., Pattabi, M., Asokan, K., Chandrashekar, B.N., Chun, C., Krishnaveni, S., 2018. Effect of Gamma Irradiation on Electrical Properties of CdTe/CdS Solar Cells. *Materials Today: Proceedings*, 5(10), 22570-22575.
- Lapa, H.E., Güçlü, Ç.Ş., Aldemir, D.A., Özdemir, A.F., 2020. The Evaluation of the Current-Voltage and Capacitance-Voltage-Frequency Measurements of Yb/p-Si Schottky Diodes with a High Zero-Bias Barrier Height. *Applied Physics A*, 126, 1-9.
- Lischka, H., Henschel, H., Kohn, O., Lennartz, W., Schmidt, H., 1993. Radiation Effects in Light Emitting Diodes, Laser Diodes, Photodiodes and Optocouplers. Conference of Second European Conference on Radiation and its Effects on Components and System (RADECS, 93), Saint-Malo, France, pp. 226-231.
- Mårtensson, P., Cricenti, A., Hansson, G.V., 1986. Photoemission Study of the Surface States That Pin the Fermi Level at Si (100) 2×1 Surfaces. *Physical Review B*, 33(12), 8855.
- Morvic, M., Boh, P., Huran, J., Sek, M., 2002. Electrical Properties of Semi-Insulating GaAs Irradiated with Neutrons. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 197(3-4), 240-246.
- Mousty, F., Ostojica, P., Passari, L., 1974. Relationship Between Resistivity and Phosphorus Concentration in Silicon. *Journal of Applied Physics*, 45(10), 4576-4580.
- Neamen, D.A., 2003. *Semiconductor Physics and Devices*. 3rd Edition, McGraw Hill, p.713, New York.
- Newman, R.C., 1982. Defects in Silicon. *Reports on Progress in Physics*, 45(10), 1163.
- Norde, H., 1979. A Modified Forward I-V Plot for Schottky Diodes with High Series Resistance. *Journal of Applied Physics*, 50(7), 5052-5053.
- Novoselnik, B., Pilipovic, M., Jacimovic, R., Pivac, B., Slunjski, R., Capan, I., 2010. Capacitance Changes in Neutron Irradiated n-type Silicon: The Flux Effect. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 268(15), 2400-2402.
- Omar, N.I.C., Hasbullah, N.F., Rashid, N.K.A.M., Abdullah, J., 2012. Electrical Properties of Neutron-Irradiated Silicon and GaAs commercial diodes. In *2012 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications* (pp. 90-94). IEEE.
- Ouellet, C., Singh B., 2013. Nuclear Data Sheets for A=31. *Nuclear Data Sheets* 114, 209-396.

- Özdemir, A.F., Aldemir, D.A., Kökçe, A., Altındal, S., 2009. Electrical Properties of Al/conducting polymer (P2ClAn)/p-Si/Al Contacts. *Synthetic Metals*, 159(14), 1427-1432.
- Pillai, V.R., Khamari, S.K., Dixit, V.K., Ganguli, T., Kher, S., Oak, S.M., 2012. Effect of γ -ray Irradiation on Breakdown Voltage, Ideality Factor, Dark Current and Series Resistance of GaAs p-i-n Diode. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 685, 41-45.
- Rakhshani, A.E., Makdisi, Y., Mathew, X., Mathews, N.R., 1998. Charge Transport Mechanisms in-CdTe Space-Charge-Limited Schottky Diodes. *Physica Status Solidi(a)*, 168(1), 177-187.
- Rhoderick, E.H., Williams, R.H. 1988. *Metal-semiconductor Contacts*. Oxford: Clarendon Press, 257 p.
- Sağlam, M., Ayyıldız, E., Gümüş, A., Türüt, A., Efeoğlu, H., Tüzemen, S., 1996. Series Resistance Calculation for the Metal-Insulator-Semiconductor Schottky Barrier Diodes. *Applied Physics A*, 62, 269-273.
- Salari, M.A., Şenarşlan, E., Güzeldir, B., Sağlam, M., 2016. Effects of the γ -Radiation on the Electrical Characteristics of the Au/n-Si/AuSb Schottky Diode. In *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. 707, 1, 012018.
- Schmitsdorf, R.F., Kampen, T.U., Mönch, W., 1997. Explanation of the Linear Correlation Between Barrier Heights and Ideality Factors of Real Metal-Semiconductor Contacts by Laterally Nonuniform Schottky Barriers. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 15(4), 1221-1226.
- Sciortino, S., Hartjes, F., Lagomarsino, S., Nava, F., Brianzi, M., Cindro, V., Vanni, P., 2005. Effect of Heavy Proton and Neutron Irradiations on Epitaxial 4H-SiC Schottky Diodes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 552(1-2), 138-145.
- Sharma, B.L., 1984. *Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications*, Plenum Press, 370 p., New York.
- Sharma, R., 2010. Temperature Dependence of IV Characteristics of Au/n-Si Schottky Barrier Diode. *Journal of Electron Devices*, 8, 286-292.
- 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(5), 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: Condensed Matter*, 308, 1209-1212.
- Sze, S.M., Kwok, K.N., 2007. *Physics of Semiconductor Devices*, 3rd Edition, Wiley, 815 p. New Jersey.
- Tataroğlu, A., Altındal, Ş., 2006. Characterization of Current-Voltage (I-V) and Capacitance-Voltage-Frequency (C-V-f) Features of Al/SiO₂/p-Si (MIS) Schottky Diodes. *Microelectronic Engineering*, 83(3), 582-588.
- Tataroğlu, A., 2013. Comparative Study of the Electrical Properties of Au/n-Si (MS) and Au/Si₃N₄/n-Si (MIS) Schottky Diodes. *Chinese Physics B*, 22(6), 068402.
- Tilley, D.R., Weller, H.R., Cheves, C.M., Chasteler, R.M., 1995. Energy Levels of Light Nuclei A= 18–19. *Nuclear Physics A*, 595(1), 1-170.
- Uğurel, E., Aydoğan, Ş., Şerifoğlu, K., Türüt, A., 2008. Effect of 6MeV Electron Irradiation on Electrical Characteristics of the Au/n-Si/Al Schottky Diode. *Microelectronic Engineering*, 85(11), 2299-2303.
- Vali, I.P., Shetty, P.K., Mahesha, M.G., Rao, M.N., Kesari, S., 2020. Thermal Neutron Irradiation Effects on Structural and Electrical Properties of n-type 4H-SiC. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31, 8496-8501.
- Verma, S., Praveen, K.C., Bobby, A., Kanjilal, D., 2014. Recovery of Electrical Characteristics of Au/n-Si Schottky Junction Under ⁶⁰Co Gamma Irradiation. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 14(2), 721-725.
- Yerişkin, S.A., Balbaşı, M., Orak, İ., 2017. The Effects of (Graphene Doped-PVA) Interlayer on the Determinative Electrical Parameters of the Au/n-Si (MS) Structures at Room Temperature. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28, 14040-14048.
- Yu, A.Y.C., Snow, E.H., 1969. Radiation Effects on Silicon Schottky Barriers. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 16(6), 220-226.
- Zeyrek, S., Turan, A., Bülbül, M.M., 2013. The C-V and G/ω-V Electrical Characteristics of ⁶⁰Co γ-ray Irradiated Al/Si₃N₄/p-Si (MIS) Structures. *Chinese Physics Letters*, 30(7), 077306.
- Zhang, L., Zhang, Y., Han, C., 2010. Neutron Radiation Effect on 4H-SiC MESFETs and SBDs. *Journal of Semiconductors*, 31(11), 114006.
- Ziel, A.v., 1968. *Solid State Physical Electronics*, 2nd Edn., Prentice Hall, 245 p. New Jersey.