

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

**FARKLI SICAKLIKLARDA TERMAL TAVLAMANIN Mo/n-Si
SCHOTTKY DİYOTLARIN BAZI ELEKTRİKSEL
KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİ**

Hülya ÖLÇER

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

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2022**



© 2022 [Hülya ÖLÇER]

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
3. KURAMSAL TEMELLER	11
3.1. Giriş	11
3.2. Metal-Yarıiletken Kontaklar	11
3.2.1. Metal/n-tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar	15
3.2.2. Metal- n-tipi Yarıiletken Omik Kontaklar	17
3.2.3. Metal(Omik) / n-tipi Yarıiletken / Metal (Doğrultucu) Kontaklar	20
3.3. Metal-Yarıiletken Doğrultucu Kontakta Potansiyel Dağılımı ve Schottky Kapasitesi	20
3.4. Schottk Diyotlarda Termoionik Emisyonla Akım İletimi	24
4. MATERYAL VE YÖNTEM, DENEYSEL ÇALIŞMA, TEORİ	31
4.1. Materyal.....	31
4.1.1. Si Temel Özellikleri	31
4.1.2. Difüzyon Kuralları ve Difüzyon Mekanizmaları.....	33
4.1.3. Silisyum Temizleme İşlemi ve Diyot İmalatı	33
4.2. Yöntem	36
4.2.1. Akım-gerilim Karakteristikleri	36
4.2.2. Seri direnç belirleme yöntemleri	38
4.2.2.1. Cheung yöntemi	38
4.2.2.2. Norde Yöntemi	39
4.2.3. Kapasitans-Gerilim Karakteristikleri	42
4.2.4. Arayüzey Hallerinin Yoğunluğunu Belirleme	43
5. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	45
5.1. Akım-Gerilim (I-V) Parametreleri	45
5.2. Cheung Fonksiyonlarından Elde Edilen Diyot Parametreleri.....	47
5.3. Norde Fonksiyonlarından Elde Edilen Parametreler.....	51
5.4. Arayüz Hal Yoğunluğu Dağılımının Belirlenmesi	52
5.5. Kapasite-Gerilim Ölçümlerinden Elde Edilen Diyot Parametreleri.....	54
6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	56
KAYNAKLAR	60
ÖZ GEÇMİŞ.....	67

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI SICAKLIKLARDA TERMAL TAVLAMAMANIN Mo/n-Si SCHOTTKY DİYOTLARIN BAZI ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİ

Hülya ÖLÇER

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Faruk ÖZDEMİR

Bu tez çalışmasında magnetik saçtırma yöntemi kullanılarak imal edilen Mo/nSi Schottky diyotu 300°C, 400°C, 500°C de tavlama işlemine tabi tutuldu. Yapının tavlamanmamış ve ısıtıl işlem uygulanmış durumu için I-V ve C-V karakteristiklerin her biri için ayrı ayrı alındı. Diyot parametreleri idealite faktörü (n), engel yüksekliği (Φ_b) ve seri direnç (R_s) değerleri hem I-V hem de C-V karakteristikleri kullanılarak farklı yöntemlerle hesaplandı. I-V karakteristiğinden, tavlamanmamış numune için n ve Φ_b 2,36 ve 0,69 eV iken 300°C,400°C ve 500°C’de tavlamanmış numuneler için sırasıyla 2,20 ve 0,70 eV, 1,63 ve 0,73 eV ve 1,49 ve 0,74 eV olarak hesaplandı. Ayrıca farklı tavlama sıcaklıkları için ara yüzey hallerinin enerji yoğunluk dağılım profilleri araştırıldı. Böylece ısıtıl işlemin diyot parametrelerinde yaptığı değişiklikler belirlendi.

Anahtar Kelimeler: Schottky kontakları, Schottky Engelleri, Diyod, n tipi.

2021, 67 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

THE EFFECTS OF THERMAL ANNEALING AT DIFFERENT TEMPERATURES ON SOME ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF Mo/n-Si SCHOTTKY DIODES

Hülya ÖLÇER

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

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet Faruk ÖZDEMİR

In this thesis work the Mo/nSi Schottky diode manufactured using the magnetic scattering method was subjected to annealing at 300°C, 400°C, 500°C. Diode parameters were calculated separately from the I-V and C-V characteristics for the non-annealed and heat-treated state of the structure. As a result of the measurements, the ideality factor (n), barrier height (Φ_b) and series resistance (R_s) values were calculated. n and Φ_b were calculated as 2.36 and 0.69 eV for the non-annealed sample. After annealed at 300°C, 400°C, and 500°C, n and Φ_b were found as 2.20 and 0.70 eV, 1.63 and 0.73 eV and 1.49 and 0.74 eV, respectively. In addition, the energy density distribution profiles of the interface states for different annealing temperatures were investigated. Thus, the changes made by the heat treatment in the diode parameters were determined.

Keywords: Schottky contacts, Schottky Barriers, Diode, n model.

2021, 67 pages

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamı yaparken her aşamasında büyük bir titizlik, itina, sabır ve özveriyle desteklerini ve katkılarını esirgemeyen ve deney sistemleri, laboratuvar ortam ve imkânlarını tez çalışmamız için kullanıma açan ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım çok değerli hocam sayın Prof. Dr. Ahmet Faruk ÖZDEMİR'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım sırasında değerli görüş, katkı ve bilgilerini esirgemeyen değerli hocalarım sayın Prof. Dr. Seyfettin ÇAKMAK'a, kıymetli hocalarım Prof. Dr. Nazım UÇAR, Prof. Dr. İskender AKKURT ve Prof. Dr. Fatih UCUN'a da sonsuz teşekkürlerimi ve minnetlerimi sunarım. Tez yazım aşamasında hesaplamalar ve grafikler konusunda desteklerinden dolayı Doç. Dr. Durmuş Ali ALDEMİR'e teşekkür ederim.

Son olarak; yoğun çalışma tempom içerisinde ve hayatım boyunca sabırla maddi manevi desteğini hiçbir zaman benden esirgemeyen sevgili ailem, eşim Cihan ve biricik kızım Kutsan Asel'e sonsuz teşekkür ederim.

Hülya ÖLÇER
ISPARTA, 2021

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Günümüzde diyotların kullanım alanları.....	3
Şekil 3.1. n-tipi ve p-tipi yarıiletkenin enerji-bant diyagramı.....	13
Şekil 3.2. Bir metal-yarıiletken kontak (<i>MS</i>) yapısı.....	13
Şekil 3.3. Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji-bant diyagramı (a) kontakdan önce, (b) kontakdan sonra, (c) yarıiletkene $-V$ gerilimi uygulandığında, (d) yarıiletkene $+V$ uygulandığı durumda....	15
Şekil 3.4. Metal ve n-tipi yarıiletkenin kontak durumundan önceki enerji- bant diyagramı.....	18
Şekil 3.5. Metal ve n-tipi yarıiletkenin kontak durumdan sonraki enerji-bant diyagramı ($\Phi_m < \Phi_s$ durumunda).....	19
Şekil 3.6. (a) Kontak tarafına negatif voltaj ($-V$) uygulandığı zaman enerji- bant diyagramı (b) Kontak tarafına pozitif voltaj ($+V$) uygulandığı zaman enerji-bant diyagramı.....	19
Şekil 3.7. Yarıiletken diyodun enerji-bant diyagram gösterimi.....	20
Şekil 3.8. Metal/n-tipi doğrultucu kontağın a) Potansiyel dağılımının konuma göre, b) Yük dağılımının konuma göre grafikleridir.	21
Şekil 3.9. Doğru besleme maruz bırakılan metal yarıiletken Doğrultucu ya da Schottky kontakta imaj azalma etkisine gösteren enerji-bant diyagramı.....	25
Şekil 4.1. Silisyum kristali kovalent bağ yapısı	31
Şekil 4.2. Silisyum kristalinin kübik yapısı.	31
Şekil 4.3. Mo/n-Si Schottky diyotun şematik modeli.....	34
Şekil 4.4. Şematik olarak tavlama fırını ve sıcaklık kontrol ünitesi	35
Şekil 4.5. Vaksis PVD Handy Saçtırma Magnetron Kaynağı	35
Şekil 4.6. HP-4192A Impedance metre.....	36
Şekil 4.7. Keithley 2400 Ampermetre.....	36
Şekil 5.1. Mo/ n-Si Schottky kontağının yarı logaritmik ve ters beslem akım- gerilim ($I-V$) karakteristiği.....	46
Şekil 5.2. Mo/n-Si için tavlama sıcaklığına karşı idealite faktörü ve tavlama sıcaklığına karşı engel yüksekliliği grafiği.....	46
Şekil 5.3. Tavlınmamış Mo/n-Si Schottky diyota ait $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)-I$ grafiği çizilmiştir.....	47
Şekil 5.4. 573 K Mo/n-Si Schottky diyota ait $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)-I$ grafiği çizilmiştir.....	48
Şekil 5.5. 673 K Mo/n-Si Schottky diyota ait $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)-I$ grafiği çizilmiştir.....	48
Şekil 5.6. 773 K Mo/n-Si Schottky diyota ait $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)-I$ grafiği çizilmiştir.....	49
Şekil 5.7. Mo/n-Si Schottky diyota ait $dV/d\ln(I)-I$ grafiği.....	49
Şekil 5.8. Mo/n-Si Schottky diyota ait $H(I)-I$ grafiği.....	50
Şekil 5.9. Mo/n-Si Schottky diyotunun tavlınmamış ve farklı sıcaklıklarda tavlanmış durumları için $F(V)-V$ eğim grafiği	51
Şekil 5.10. Mo/n-Si Schottky diyotunun tavlınmamış ve farklı sıcaklıklarda tavlanmış durumları için arayüzey hallerinin arayüzey hallerinin enerjisine göre değişim grafiği	53

Şekil 5.11. 1MHz frakansta Mo/n-Si Schottky diyotu için farklı tavlama sıcaklıklarında kapasite-gerilim (C-V) grafiği.....	54
Şekil 5.12. 1MHz Mo/n-Si Schottky diyotu için farklı tavlama sıcaklıklarında ters beslem C ⁻² -V grafiği	55



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Metalin iş fonksiyonu ile yarıiletkenin iş fonksiyonu arasındaki ilişki.....	14
Çizelge 4.1. Silisyum yarıiletkeninin bazı özellikleri	32
Çizelge 5.1. Mo/n-Si Schottky'nin I-V ölçümünden belirlenen n , I_0 ve Φ_b 'nin tavlama sıcaklığına bağlı değerleri.....	47
Çizelge 5.2. Mo/n-Si için tavlama sıcaklığına karşı idealite faktörü, tavlama sıcaklığına, engel yüksekliği ve direnç değeri çizelgesi	50
Çizelge 5.3. Mo/n-Si Schottky diyotunun Norde yöntemi ile seri direnç değeri ve engel yüksekliği verileri	52
Çizelge 5.4. 1 MHz C^{-2} -V karakteristiklerinden elde edilen diyot parametreleri	55

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$f(E)$	Fermi dağılım fonksiyonu
E_f	Fermi enerjisi
Φ	İş fonksiyonu
χ_s	Elektron yakınlığı
E_c	İletkenlik bandı enerji seviyesi
E_v	Valans bandı enerji seviyesi
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
T	Sıcaklık
e	Elektronun yükü
V_d	Difüzyon potansiyeli
I	Akım
I_o	Doyma Akımı
V	Uygulama voltajı
k	Boltzman sabiti
Ψ	Potansiyel fonksiyonu
ρ	Uzay yükü yoğunluğu
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ϵ_o	Boşluğun dielektrik sabiti
N_d	Taşıyıcı yoğunluğu
n	İletkenlik bandındaki elektron yoğunluğu
x	Konum
d	Schottky tabaka kalınlığı
C	Kapasite
Q	Yük miktarı
A	Diyot alanı
$J_{m \rightarrow s}$	Metalden yarıiletkene akım yoğunluğu
$J_{s \rightarrow m}$	Yarıiletkenden metale akım yoğunluğu
v	Taşıyıcı termal hızı
m^*	Etkin kütle
h	Planck sabiti
g_c	İletkenlik bandındaki hal yoğunluğu
A^*	Richardson sabiti
Φ_{bn}	İmaj kuvvet nedeniyle azalan Schottky engel yüksekliği
E	Elektriksel alan
F	Elektriksel kuvvet
P	Potansiyel enerji
Q_{ss}	Arayüzey yük yoğunluğu
N_{ss}	Arayüzey hal yoğunluğu
$\Phi_{b,o}$	Schottky engel yüksekliği (termal denge durumunda)
n	İdealite faktörü

E_{ss}	Arayüzey halleri enerjisi
V_s	Deplasyon bölgesindeki gerilim düşmesi
V_i	Arayüzeydeki gerilim düşmesi
Q_{sc}	Deplasyon tabakasındaki uzay yükü yoğunluğu
R_s	Seri direnç
E_g	Yasak bölge enerjisi
Φ_o	Görünür engel yüksekliği
V_n	İletkenlik bandının tabanı ile fermi seviye arasındaki fark



1. GİRİŞ

Yarı iletken, bir yalıtkan ile bir iletken arasındaki elektriksel iletkenlikte ara kristal katıların herhangi bir sınıfı olarak tanımlanmaktadır. Bir asırlık geçmişi bulunan, hali hazırda günümüzde de önemli yere sahip olan yarıiletkenler için yapılan bir takım araştırmaların başlamış olduğu tarihten itibaren, günümüze kadar büyük ilerleme kaydederek ve günümüz teknolojisinin artık vazgeçilmesi olmuştur.

Yarıiletken-metal yapının doğrultma özelliğine ilişkin olarak ilk çalışmalar 1874'de Braun tarafından başlatılmıştır. Bununla beraber Pickard, 1906 yıllarında silisyum tabanlı nokta kontak detektör patentini aldı. Daha sonraları Pierce çeşitli yarıiletkenler ile yaptığı metal buharlaştırmaları ile diyotlarda doğrultma olayını izah etmiştir. (Rhoderick, 1988)

Schottky vd. 1931'li yıllarda bir metal yarıiletken kontakta geçen akımı ifade ederken, kontakta bir potansiyel engel ile karşılaşıldığı fikrini kabul edildiğini ifade etmiştir. 1938'li yıllarda ise Mott ve Schottky ayrı ayrı çalışmalarında elektronların potansiyel engel üzerinden sürüklenmesi ve difüzyon etkisi olduğunu belirtmişlerdir. (Rhoderick, 1988).

1938 yıllarında ise Mott potansiyel engelin, metalin iş fonksiyonu ile yarıiletkenin iş fonksiyonu arasındaki ilişkiden kaynaklı olduğunu ifade etmiştir. Buna ek olarak, elektrik alanın sabit kaldığı, elektrostatik potansiyelinin lineer olarak değişebildiği öngörüsü için ise bir engel bölgesinin yüklü iyonlardan temizlenmiş olması gerektiğini belirtmiştir. Bu düşüncenin aksine 1939 yılında Schottky Poisson denklemlerine bakarak; elektrik alanın lineer olması, elektrostatik potansiyelin ise ikinci mertebeden artması amacı ile engel bölgesinde değişmeyen serbest yüklerin bulunması gerekmekte olduğu düşüncesini paylaşmışlardır (Rhoderick, 1988).

İkinci dünya savaşı olan 1939-1945 yılları sırasında yarıiletken-metal kontakların anlaşılmasında bilim açısından çok önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu kapsamda bilimsel çalışmalarda ilerlemeler yarıiletken fiziğinin gelişmesine mühim katkılar

sağlamıştır. 1921 yılında ise geliştirilen Richardson'ın termiyonik emisyon teorisinin 1942 tarihinde Bethe tarafından yarıiletken-metal doğrultucu kontaklar için de uygulanabileceğini gösterilmiştir. Metal-yarı iletken üzerine yapılan bir takım çalışmalar 1960'lı yıllara gelindiğinde hız kazanmıştır (Rhoderick, 1988).

Kristal yapılar üzerinde yapılan yeni teknikler ile birlikte birçok kazanımlar elde edilmiştir. Yarıiletken tabanlı elektronik cihazların çalışmasını sağlayan devre elemanı olarak kullanılmakta olması, elektronik ve optoelektronik sanayisinin alış veriş alanında en mühim, pratik ve kullanışlı olduğu görülmektedir. Bununla beraber temel elektronik uygulamalarına ilaveten yenilenebilir enerji kaynaklarında olmak üzere geniş kullanım alanına sahip olmuştur.

Yarı iletkenler, diyotlar, transistörler ve entegre devre gibi çeşitli elektronik cihazların yapımında kullanılmaktadır. Elektronik düzeneklerde alternatif akımı doğru akıma dönüştüren yöntem, diyotlarla gerçekleştirilmektedir. Bir p-tipi yarıiletkenle bir n-tipi yarıiletken atomik boyutlarda birbirinin üstünde birleştirilmesi ile p-n eklem diyotu, kontak durumunu alması ile Schottky diyotu elde edilmektedir. p-n eklemde akım azınlık taşıyıcıları ile gerçekleştirilirken Schottky diyotlarda ise çoğunluk taşıyıcıları ile gerçekleştirilmektedir. Schottky yapılar, yüksek akım düşük gerilim doğrultucuları durumunda iken, p-n eklemi ise düşük akım yüksek gerilim doğrultucuları durumundadır. Bakıldığı zaman Schottky yapılarda azınlık taşıyıcılarının çok az olma durumu ve frekans tepkisinin yüksek olması halinde gecikme zamanının düşük olması ile kazanmış olduğu avantajların yanında IC (entegre devre) teknolojisinde büyük ehemmiyet arz etmektedir. Bahse konu olan tür cihazlar, kompakt olmaları, güvenilirlikleri, güç verimliliği ve düşük maliyetleri nedeniyle çok fazla uygulama alanı bulmaktadır. Yarıiletkenler ayrıık bileşenler olarak, katı hal lazerleri dâhil olmak üzere optik sensörlerde, güç cihazlarında ve ışık yayıcılarında kullanım alanları bulunmaktadır. Yarıiletkenler, modern elektroniğin beynidir. Günümüz çevrelerde gördüğümüz elektronik aygıtların büyük bir bölümü doğru akım ile çalışmaktadır.

Yarı iletkenler, modern elektroniğin beyni olarak görev yapmaktadır. Yarı iletkenler kominikasyon, bilgi işlem, sağlık hizmet ve sektörü, askeri haberleşme sistemleri, transfer ve taşıma hizmetleri, yenilenebilir enerji sistemleri ve buna benzer alanlarda

ilerlemeler sağlamıştır. Bahse konu olan bu yarıiletkenlerden esinlenerek bilgi işlem, sanal gerçeklik, nesnelerin interneti, enerji verimliliği algılama, otomatik cihazlar, robotik ve yapay zekâ dâhil olmak üzere toplumu daha iyi hale getirme vaadinde bulunan yeni teknolojilerin doğmasına neden oluyorlar. Yarı iletkenlerin en büyük potansiyeli ileride yatıyor.



Şekil 1.1. Günümüzde diyotların kullanım alanları

Günümüzde baktığımız zaman Schottky engel diyotları, transistörler, mikrodalga dedektörleri ve güneş pilleri gibi yarıiletken devrelerinde yer almaları nedeniyle, yarıiletken devre teknolojisinin geliştirilmesi ve çeşitli araştırmalarda test malzemesi olarak kullanılması sebebiyle pek çok araştırmalara da konu olmuştur.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Metal-yarıiletken kontak imalatında çoğunlukla altlık yarıiletken malzeme olarak Si, GaAs ve InP kullanılır Au, Cu, Al ve Ni benzeri metallerle oluşturulan Schottky diyotların üretimi ve karakteristik parametrelerinin belirlenmesi bugünümüz elektronik çağında önemli bir yere sahip olmasından nedeniyle birçok araştırmacı tarafından çalışılmasına sebep olmuştur. Bununla beraber, 2000 yılında “yüksek hız ve opto-elektronikte kullanılan yarıiletken hetero yapıların gelişimi” künyeli çalışma ile Zhores I. Aferov ve Herbert Kromer; 2009 yılında ise “Bir yarıiletken görüntüleme devresi (CCD sensörü)” başlıklı icatlarından dolayı Willard S. Boyle ve George E. Smith, Nobel Fizik ödülüne layık görülmüşlerdir. Böylelikle, yarıiletken teknolojisinde önemli yere sahip olan MY yapıların önemi bir kez daha ortaya konulmuş oldu. MY yapılarda istemeden meydana gelen ya da bilerek oluşturulan ara yüzey özellikleri zamanla değişir ve kararlı kalmaz. Bu kararsızlığı ortadan kaldırmak için yapılan işlemlerin başında ısı tavlama işlemi gelmektedir. Tavlama işlemi, sistemin termal dengeye ulaşmasına yardımcı olur ve aygıtın daha kararlı olmasını sağlar.

Baird (1964), yapmış olduğu çalışmada Si transistörle Schottky engelini birleştirmesi ile yarıiletken metal alan etkili transistörünü bulmuştur.

Chandra ve Prasad (1983), yarıiletken metal Schottky diyotlarında gerilim ile sıcaklığa bağlı karakteristikler incelemişler ve yarıiletken metal yapıları sıcaklığın belirlenmesinde kullanmışlardır.

Schottky (1914), uygulanmakta olan elektrik alanın etkisi ile metal vakum sistemi kullanılarak ve imaj kuvveti ile birlikte engelin alçaldığı tespit edilmiştir.

Bethe (1942), metal yarıiletkenlerde termoiyonik emisyonun uygulanabileceği tespit edilmiştir

Crowell ve Sze (1966), Schottky'nin difüzyon teorisi ve Bethe'nin termoiyonik emisyon teorisi birleştirilerek tek bir teori ortaya çıkarmışlardır. Daha sonra bu tipte bir

diyotun özelliklerinin ayrıntılı olarak belirlemek gerektiği için çeşitli çalışmalar yapmaya devam etmişlerdir.

Card vd. (1971), arayüzeyi oksitlemiş tabakaya sahip olan Si-Au kontakta arayüzey hal yoğunluğu belirlenir ve daha sonrasında arayüzey hal yoğunluğu ve arayüzey tabakasının I-V karakteristiklerinden idealite faktörüne nasıl bir etki gösterdiği açıklamışlardır.

Türüt vd. (1992), Au-Sb/n-Si/Al Schottky diyotları üzerinde yapmış oldukları çalışmalarda I-V, C-V ve C^{-2} -V grafikleri incelenerek lineer olmaktan sapmaya uğramasının nedeni olarak arayüzey hallerinin sığasının sebep olduğunu belirtmişlerdir.

Türüt vd. (1995), Al/n-Si diyotunu inceleyerek ideal olmayan ters beslem C-V ve doğru beslem I-V karakteristikleri üzerine arayüzey hallerinin yük davranışının etkisi incelenerek ters beslem C-V karakteristikleri üzerinde arayüzey tabakası, tersinim tabakası ve yüklerin etkisinin var olduğu göstermiştir..

Pandey vd. (1998), I-V ve C-V eğrilerini kullanarak arayüzey hallerini belirlemek için diyot parametrelerini belirlemişlerdir. Arayüzey hallerinin yoğunluğunun dağılımını, gerilimle ilişkisini incelemişlerdir. Çalışmada, arayüzey tabakasının elektriksel parametreleri etkilediğini tespit etmişlerdir.

Nuhoğlu vd. (1998), Ni/n-LEC GaAs Schottky diyotları ile üretilen MIS Schottky diyot parametrelerinin termal kararlılığını, 5 dk boyunca 100-600°C sıcaklık aralığında tavlandıktan sonra akım-voltaj (I-V) karakteristikleri üzerine araştırmalar yapmıştır. Ni/n-LEC GaAs schottky diyotu, termal olarak MIS numunesinden daha fazla kararlılık gösterdiği gözlenmiştir. MIS numunesinin I-V karakteristikleri incelediğinde 400°C'i geçtikten sonra bozulurken, Ni/n-LEC GaAs numunesinin karakteristikleri 600°C'i geçtikten sonra bozulduğu gözlenmiştir. Gözlemlenen bu durum 100°C'den 400°C'kadar ısıtılan MIS Ni/n-LEC GaAs Schottky diyotların GaAs yüzeyinde meydana gelen açık havadan kaynaklı meydana gelen doğal oksit tabakasında oluşan problemlerden kaynaklandığı belirtilmiştir. Böylelikle etkileşen bir

kontakın, belirlenen tavlama sıcaklığına kadar MIS diyotlarından ya da tavlamanmamış olan herhangi birinden, doğal oksit tabakası meydana gelmediği zaman kararlı olduğu sonucu belirtilmiştir.

Ayyıldız vd. (1999), Ni/n-GaAs, Ti/n-GaAs ve NiTi/n-GaAs yarıiletken-metal kontakları meydana getirmiş ve bu yarıiletken-metal kontakların termal kararlılığını araştırmak için 5 dakika boyunca 100-650°C sıcaklık aralığında tavlama işlemi yapılmıştır. NiTi/n-GaAs diyodu 400°C sıcaklığına değin uygulanan tavlama yöntemlerinde termal kararlılığı sabit kalırken, 500°C’i takiben idealite faktörünün 1’e daha yakın bir değer alırken, engel yüksekliğinde artış olduğu gözlenmiştir. Bu minvalde, NiTi/n-GaAs kontakın Ni/n-GaAs ve Ti/n-GaAs tipi kontaklarına nispeten daha kararlı bir yapı sergiledikleri tespit edilmiştir.

Ayyıldız vd. (1999), Ti/n-GaAs Schottky diyodlarını 100°C’lik artan aralıklarla 5 dk boyunca 200°C-400°C değişen sıcaklıklarda ısıtılma işlemine tabi tutmuşlardır. Tavlama neticesinde engel yüksekliğinin tavlama sıcaklığının artması ile birlikte artış gösterdiği gözlenmiştir. Gözlemlenen bu artma, tavlamanın açık havadan kaynaklı meydana gelen doğal oksit tabakasının pasif hale getirme etkisini ortadan kaldırdığını ve Fermi enerjisi seviyesinin sabit olmasına sebep olan yüzey kusurlarının yeniden etkin hale gelmesi hususunda yöneltmiştir.

Nuhoğlu vd. (2000), Co/n-GaAs (Te) Schottky diyodları 5 dakikalık süre zarfında sıcaklığı 100°C’den 800°C’ye kadar tavlamışlardır. Tavlama sıcaklığının 550°C’ye kadar artması ile engel yükseklik değeri artmış ve Q_s azalmıştır. Engel yüksekliğindeki bu artış Fermi seviyesinin sabitlenmesinde sorumlu pozitif $Q_{ss}(0)$ değeri hususunda yöneltmiştir.

Li vd. (2003), düşük Bor katkılı SiGeC üzerinde titanyum Schottky kontakının elektriksel özellikleri, tavlama sıcaklığının bir fonksiyonu olarak araştırmışlar. Tavlama işlemini 10 dk süresince 400°C-600°C sıcaklık aralığında yapılmıştır. Schottky engel yüksekliği, akım-voltaj karakteristik verilerinden elde edilmiştir. Termal tavlamanın ve ön gerilim voltajının, Ti/n-SiGeC kontak için Schottky engel yüksekliğinin azalmasına sebep olmuştur. Tavlama sıcaklığının 400°C-600°C sıcaklık

aralığında engel yüksekliğinde ki azalma her 100°C başına yaklaşık olarak 3,5-5,6 m eV olduğunu, ön gerilim voltajının yükselmesinin ise 1 m eV den daha az olduğunu ifade etmişlerdir.

Sefaoğlu vd. (2008), Akım-voltajın (I-V) sıcaklığa bağlı olarak üretilmiş ve tavllanmış Ni/n tipi 6H-SiC Schottky diyotun özellikleri 100-500 K sıcaklık aralığında incelenmiştir. Standart termiyonik emisyon teorisi temelinde I-V karakteristiklerini analiz etmişlerdir. Yapılan araştırmada n ve Φ_b değerleri tavlama öncesi 0,65-1,25 eV ve 1,70-1,16 aralığında olduğu ve idealite faktörünün sıcaklığın artması ile azaldığını engel yüksekliğinin sıcaklığın artması ile arttığını bulmuşlardır. Tavlama sonrası için n ve Φ_b değerlerini 0,74-1,70 eV ve 1,84-1,19 aralığında elde etmişlerdir.

Varena vd. (2009), p-InP üzerine imal edilen PS yapıların EY değerlerinde Au kapılı diyotlarda 0.12-0.14 eV; Pd kapılı diyotlarda ise 0.06 eV'luk artış olduğu tespit edilmiştir. Bir diğer husus, aynı araştırmacılar PS diyotların davranışını tavlama süreci içerisinde bir fonksiyon olarak analiz etmişlerdir. Bu yapılarda en iyi verimi düşük ısı işlem süresi ve yüksek tavlama sıcaklığında birikmiş (kümülatif) tavlama aşamaları uygulanarak ulaşıldığı rapor edilmiştir.

Yıldırım (2009), saçırtma yöntemi ile Ni / n-GaAs Schottky diyotları ve 2 dakika boyunca 200°C ve 400°C'de tavlama işlemi yapıldı. Diyotların sıcaklığa bağlı akım-gerilim (I-V) karakteristikleri üzerindeki termal tavlamanın etkisini deneysel olarak araştırdılar. Akım-gerilim (I-V) karakteristikleri, 20 K'lık adımlarla 60-320 K sıcaklık aralığında ölçülmüştür. Bariyer yüksekliği, 400°C'de tavlama işlemi yapıldığında 300 K'da 0.84eV'den 0.88 eV'ye hafifçe yükseldiğini tespit etmişlerdir. Artan tavlama sıcaklığı ile idealite faktörü azalmıştır. akım-gerilim (I-V) ölçümlerinde ise, idealite faktörü engel yüksekliğinin klasik termiyonik emisyon teorisi ile açıklanamayan ölçüm sıcaklığına bağımlılığını tespit etmişlerdir. Diyotların sıcaklığa bağlı akım-gerilim (I-V) karakteristikleri çoklu Gauss dağılım modeli açısından tartışılmıştır. Termal tavlama işleminin metal-yarı iletken kontakları termal olarak kararlı Schottky kontaklarına dönüştürdüğü sonucuna varılmıştır.

Çaldıran vd. (2013), yılında yaptıkları çalışmalarında, Au/Anthracene/n-Si/Al yapılarının iyi bir doğrultucu özelliğe sahip olduğunu belirtmiştir. İdealite faktörü, ara yüzey durum yoğunluğu ve seri direnç gibi karakteristik parametreleri I-V ölçümleri ile tespit etmiştir. Bu araştırmacılar (Çaldıran vd. 2013) Anthracene organik tabakasının Au ve n-Si arasında fiziksel engel meydana getirerek Au/n-Si/Al diyotunun etkin EY'ni artırdığı hususunda tespitlerini paylaşmışlardır. İlavenen, düşük voltaj bölgesinde I-V karakteristiklerinin omik davranış gösterdiği; ancak daha yüksek voltaj bölgelerinde uzay yükü ile sınırlı akım (SCLC) mekanizmasının baskın olduğu rapor edilmiştir.

Jong-Hoon Shin (2013), Gr/Si Schottky yapılarının karakteristik özelliklerini araştırmak üzere termal tavlamanın etkisi üzerine araştırma yapmıştır. İdealite faktörü ve Schottky engel yüksekliğinin termal tavlamadan sonra azaldığını ve kullanılan materyali bir kaç gün açık havaya maruz bırakıldıktan sonra idealite faktörü ve Schottky engel yüksekliğinin tekrar artmış olduğunu tespit etmişlerdir.

Wang vd. (2015), Gr/Si Schottky yapıların termal tavlamanın etkisinden kaynaklı karakteristik özelliklerini araştırmışlardır. Yapılan bu çalışmada idealite faktörü ve engel yüksekliğinin termal tavlamanın etkisinden sonra azaldığını ve bir kaç gün açık havada bırakıldıktan sonra tekrar incelendiğinde ise artmış olduğunu tespit etmişlerdir.

Orak vd. (2014), Co / n- GaP nano-Schottky diyotlar, tavlama sıcaklığının cihazın özellikleri üzerinde yapmış olduğu etkisini araştırmak amacı ile üretilmiştir. Co metalik temas için DC Magnetron püskürtme tekniği kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler üç dakika boyunca 400 ° C' de ve 600 ° C'de tavlansmıştır. Termal tavlama işlemine tabi tutulan cihazların XRD (X-Işınları Difraktometresi) analizleri incelenmişler ve metal tabakanın yüzey morfolojisini incelemek amacıyla numunenin tavlansmasından önce ve sonra atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile yüzey görüntüleri alınmışlardır. Oda sıcaklığında yapılan akım-gerilim (I-V) ölçümleri, artan tavlama sıcaklığı ile idealite faktörünün ve seri direncin azaldığını, 400 C'de tavlansmış numuneler için idealite faktörünün 1.02 olduğu tespit etmişlerdir. Diyot, hem deneysel hem de teorik olarak, diğer tavlama sıcaklıklarında ise ideallikten uzaklaştığını tespit etmişlerdir.

Türüt vd. (2016), Ni / p-InP Schottky diyotları (SDs), DC magnetron püskürtme biriktirme ile hazırlanmıştır. Diyot imalatı yapıldıktan sonra, N₂ atmosferinde 1 dakika boyunca 700 ° C'de termal olarak tavllanmış, daha sonra, tavllanmış ve tavlansamış (çökelmiş olarak) SDs 'nin akım–gerilim karakteristikleri, karanlık koşullar altında 20 K'lik adımlarla 60-400 K ölçüm sıcaklığı aralığında ölçülmüştür. 700 C tavlama dan sonra idealite faktörü değ erinde 60 ila 200 K arasında bir iyileş me göz lenmiş ve 200-400 K ölçüm sıcaklığı aralığında bariyer yüksekliğ i (BH) değ eri yaklaşık olarak değ işmeden kaldığ ı tespit etmişlerdir. Bu nedenle, N₂ atmosferinde 1 dakika boyunca 700 C'de termal tavlama nedeniyle diyot parametrelerinde bir iyileşmenin göz lendiğ i söylenebilir diye ifade etmişlerdir.

Ejderha vd. (2018), 400°C tavllanmış Ni /n-GaP/Al diyotun kapasite-frekans (C–f) ve iletkenlik–frekans (G-f) özellikleri, 20 K'lik adımlarla 100-320 K sıcaklık aralığında ölçümler yapılmış, arayüz durum yoğunluğu N_{ss} değ erleri ve zaman sabiti sıcaklığa bağ ı olarak elde edildi 5 kHz ila 5 MHz ölçüm frekans aralığında C-f ve G–f özellikleri. Tavlama ve ölçüm sıcaklığ ının N_{ss} üzerindeki etkisi ve bir Ni /n-GaP Schottky diyotun 0.30 V'luk adımlarla ileri beslem voltajından 0.60 V'luk ters beslem voltajına analiz edildi. Arayüz durumu yoğunluk değ eri, biriken ve tavllanmış diyot için yüksek ölçüm sıcaklığı ile artış göz lemlendiğ ini tespit etmişlerdir.

Asıl Uğurlu (2021), Ti/p-Si Schottky bariyer diyotları metal buharlaştırma yöntemi ile hazırlanmıştır. Düşük tavlama sıcaklığ ının Ti/p-Si Schottky diyotlarının seri direnç (R_s), idealite faktörü (n) ve bariyer yüksekliğ i (Φ_b) gibi elektriksel parametreler üzerindeki etkisi akım–gerilim (I–V) ve kapasitans–gerilim (C–V) özellikleri yardımıyla araştırılmıştır. Schottky diyotları, N₂ atmosferinde 1 dakika boyunca 50 ila 200 °C arasındaki sıcaklıklarda tavlansmıştır. Akım–gerilim karakteristiklerinde Cheung ve Norde fonksiyonları kullanılarak Φ_b, R_s ve n belirlendi. Artan tavlama sıcaklığı ile bariyer yüksekliğ i, idealite faktörü ve seri direncin değ iştiğ i görülmüştür.

Elektronik sanayiinde yeralan elektronik devre elemanlarının temelini metal-yarıiletken kontaktardan olan Schottky diyotlar oluşturmaktadır. Bu elektronik yapılar yarıiletken dedektörler, güneş pilleri, MESFET ve MOSFET'ler, sensörler, mikrodalga karıştırmacılar ve hızlı anahtarlama uygulamaları gibi alanlarda yaygın

olarak kullanılmaktadırlar. Metal yarıiletken kontakların termal kararlılığı elektronik sanayiinde önemlidir. Çünkü üretim ve kullanım sırasında yüksek sıcaklıklara maruz kalırlar. Bu cihazların güvenilirliği kullanılan malzemeler arasındaki etkileşmeye büyük ölçüde bağlıdır. Metal-yarıiletken kontaklar içinde Schottky diyotlarında performansını geliştirmek için tercih edilen metotlardan biri yapının ısıtılma işlemiyle tavlama işlemidir. Dolayısıyla metal Molibden ile yarıiletken Si arasındaki reaksiyonların araştırılması, ısıtılma işlemi ile diyodun kararlılığının belirlenmesi bu çalışmada hedeflenmiştir.

Bu çalışmamızda yukarıda saydığımız gerekçelerle imal ettiğimiz Mo/n-Si Schottky diyotunun tavlama sıcaklığına bağlı olarak bazı elektrik parametrelerinin nasıl değiştiğini incelemek temel amacımızdır. Mo/n-Si diyotunun tavlama sıcaklığı 573K, 673K ve 773K sıcaklıklarında tavlama işlemi yapılmış durumlarının I-V ve C-V ölçümleri alınacaktır. Bu ölçümlerden yararlanarak temel diyot parametreleri hesaplanacaktır. Böylece farklı tavlama sıcaklıklarında diyotun performansının nasıl etkilendiği belirlenecektir.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Giriş

Devre elemanları bir metal ile bir yarıiletken atomik düzeyde süreklilik göstererek birleştirilmesi kontağın kaynağını oluşturmaktadır. Bu devre elemanlarının karakteristiklerinin iletkenlik özelliklerinin araştırılabilmesi ve anlaşılabilmesi için metal yarıiletken kontakların bilinmesi önceliklidir. Genel olarak kontak iki maddenin en az dirençle temas etmesi olarak düşünülür. İdeal olması için kontağın yüzeylerin temiz, pürüzsüz ve parlak olmasına bağlıdır (Crowell and Sze, 1996).

3.2. Metal-Yarıiletken Kontaklar

Kontak problemleri analiz ederken ve çözümlenirken önemli temel tanımlardan yararlanılmaktadır. Bu tanımlardan kısaca bahsedecek olursak;

Vakum seviyesi: Bir metalin dışında elektronun enerji seviyesi yani kinetik enerjisinin sıfır olmasıdır. Daha sade bir dille anlatacak olursak elektronun serbest bir hal alması için ihtiyacı olan minimum enerji miktarı olarak tanımlanır.

Fermi enerjisi (E_f): İletken maddelerde mutlak sıfır sıcaklığında ($T=0^\circ\text{K}$), etkileşimde olmayan fermiyonlardan oluşmuş bir kuantum sistemi içerisinde, en üst ve en alt seviyede dolu vaziyette bulunan tek parçacık durumları arasındaki enerji farkı olarak adlandırılmaktadır. Yalıtkanlarda ise fermi enerji seviyesi tanımlanırken, iletkenlik, valans bandında bulunan taşıyıcı sayısına ve sıcaklığa bağlı olarak yasak enerji bölgesinde yer alan izafi seviyedir. Fermi enerji seviyesi (E_f) n-tipi yarıiletkenlerde iletim bandından itibaren ölçümleri yapılırken, p-tipi yarıiletkenlerde valans bandından itibaren ölçümleri yapılmaktadır. $T=0^\circ\text{K}$ 'de seviyenin üzerinde enerji seviyesi boş olduğu belirtilmektedir. Dolayısıyla herhangi bir T sıcaklığındaki elektronun E enerjisi sahip olur, bu enerji Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu ile ifade edilir;

$$f(E) = \{1 + \exp\left(\frac{E-E_f}{kT}\right)\}^{-1/2} \quad (3.1)$$

Yarıiletkenlerde Fermi enerjisi (E_f), saf bir germanyum ya da silisyum maddesine daha öncesinden belirlenmiş sayıda katkı atomlarının sıcaklığa ve yoğunluğa bağlı olarak değişmektedir. Fermi enerjisi (E_f), n tipi yarıiletkenlerde enerjisi iletkenlik bandı (E_c) kaynak nokta alınarak tanımlanmaktadır.

$$E_f = kT/q \ln(N_C/N_D) \quad (3.2)$$

Diğer taraftan p-tipinde ise valans (değerlik) bandı (E_v) referans alınarak tanımlanır.

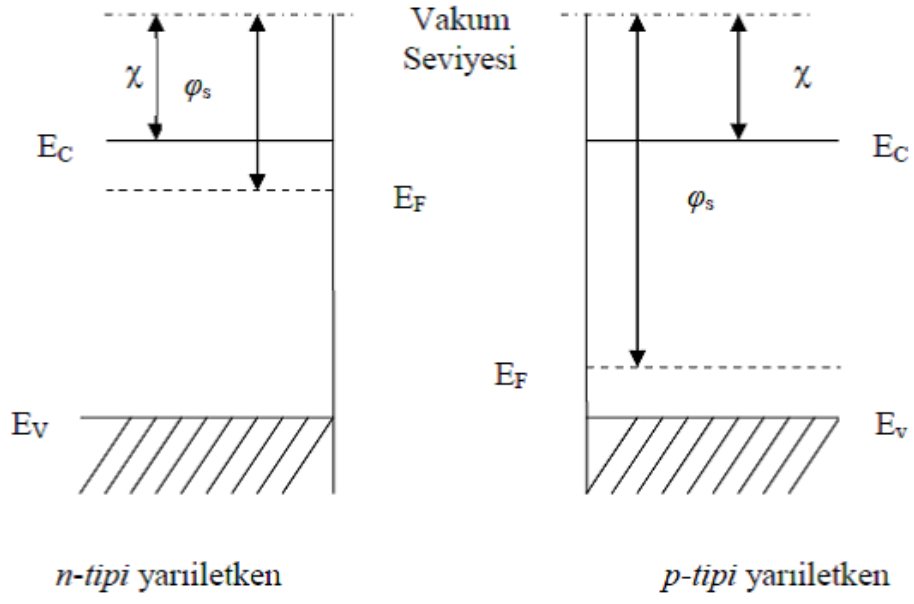
$$E_f = kT/q \ln(N_D/N_A) \quad (3.3)$$

Bu nedenle enerjisi aynı zamanda valans ve iletkenlik bandındaki izinli durumların yoğunluğuna da (N_C, N_D) bağlı olmaktadır.

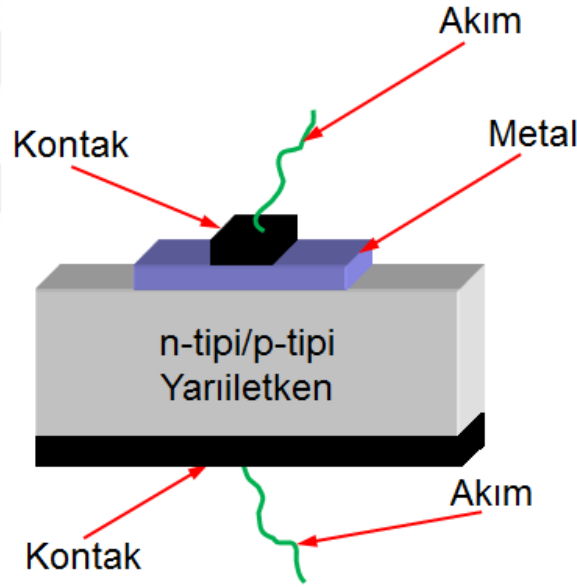
İş fonksiyonu (Φ): Elektronun fermi enerji seviyesinden (E_f), vakum seviyesine çıkabilmesi adına gerekli olan minimum enerji miktarıdır. Fermi enerjisi (E_f), saf bir germanyum ya da silisyum maddesine önceden belirlenmiş sayıda katkılanan maddenin atomlarının yoğunluğu ile birlikte değiştiğinden iş fonksiyonu da değişmekte olan bir niceliktir. İş fonksiyonunu (Φ) özetlemek için örnek vermek gerekirse, metalin iş fonksiyonu (Φ_m), kristal örgünün periyodik potansiyeli sebebiyle hacim katkısı ve yüzeydeki dipol katmanı sebebiyle de yüzey katkısına sahip olmaktadır. Yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) ise, metale benzer şekilde tanımlanmakta olup, yarıiletkenin fermi seviyesinin katkılama göre değişiklik göstermesi nedeniyle değişken bir nicelik olarak yer almaktadır.

Elektron ilgisi/yakınlığı (afinitesi) (χ): Katkılamağa bağlı olmayan bir diğer önemli yüzey parametresidir. Vakum seviyesi ile iletkenlik bandı arasındaki fark olarak tanımlanır.

E_f, Φ_m, Φ_s ve χ ifadelerinin birimleri (eV) cinsinden tanımlanmaktadır.



Şekil 3.1. n-tipi ve p-tipi yarıiletkenin enerji-bant diyagramı



Şekil 3.2. Bir metal-yarıiletken kontak (MS) yapısı

Yarıiletkenler n ve p tipi olmak üzere iki şekilde elde edilmektedir. Bu sebeple Metal-Yarıiletken (MY) kontaklar, iki kısımda incelenmektedir.

1. Metal- n-tipi yarıiletken kontaklar
2. Metal- p-tipi yarıiletken kontaklar

Bu çalışmada n-tipi yarıiletken kullanıldığı için metal-n-tipi yarıiletken kontaklar ele alınacaktır. Metal ile n-tipi yarıiletken arasında iki tip kontak oluşturulabilir. Kontaklardan biri akımın bir yönden diğer yöne göre çok daha kolay aktığı doğrultucu (Schottky) kontak, bir diğeri ise, akım her iki yönde de kolayca aktığı omik kontaklardır. Dolayısıyla bir metal ile bir yarıiletken ile sıkı bir bağlantı sağlandığı zaman doğrultucu ve ohmik kontaklar oluşmaktadır. Daha öncesinde de bahsedildiği gibi öncü çalışmalarından dolayı yapıya genel olarak Schottky engel diyotları (SBDs) denilmektedir (Rhoderick ve Williams, 1988).

Bir metal ile bir yarıiletken ile sıkı bir bağlantı sağlandığı zaman, sırası ile doğrultucu ve ohmik kontaklar oluşmaktadır. Daha öncesinde de bahsedildiği gibi öncü çalışmalarından dolayı yapıya genel olarak Schottky engel diyotları (SBDs) denilmektedir (Rhoderick ve Williams, 1988). Schottky diyotların karakteristik özelliklerinin daha iyi anlayabilmek ve yorumlayabilmek adına yalıtkan ve yarıiletken kristallerinin iletkenlik özellikleri hakkında yeterli bilgiye sahip olunması gerekmektedir. Dolayısıyla kristale uygun kontakların uygulanması sağlanır ve araştırma ve/veya incelemeler daha anlaşılır olmaktadır.

Bir metal ile bir yarıiletken birbiri ile bağlantı sağlandığı zaman, seçilen metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları sayesinde oluşan kontağın doğrultucu (Schottky) ya da ohmik kontak mı olduğu belirlenmektedir. Schottky engelli diyotlar oluşturulurken uygun iş fonksiyonlu metal ve yarıiletken seçimine dikkat edilmelidir. Bahse konu olan metalin iş fonksiyonu ile yarıiletkenin iş fonksiyonu arasındaki ilişki Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Metalin iş fonksiyonu ile yarıiletkenin iş fonksiyonu arasındaki ilişki

İşFonksiyonları Arasındaki İlişki	Yarıiletken Türü	Kontak Türü
$\Phi_m > \Phi_s$	n-tipi	Schottky
$\Phi_m > \Phi_s$	p-tipi	Omik
$\Phi_m < \Phi_s$	n-tipi	Omik
$\Phi_m < \Phi_s$	p-tipi	Schottky

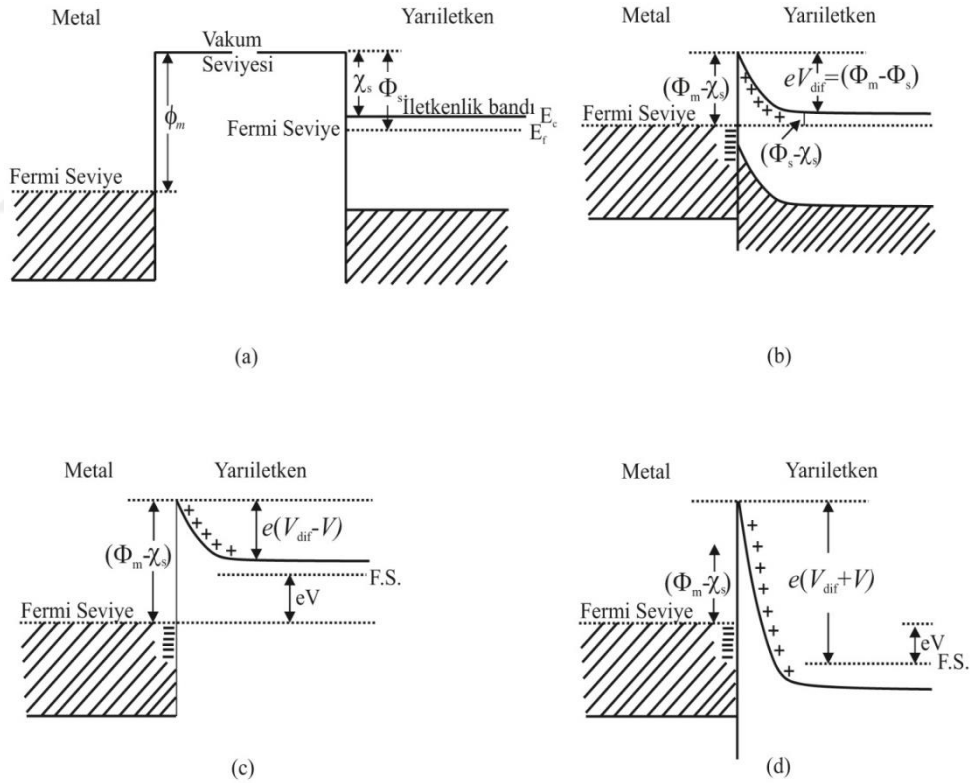
MS diyotlar arka ohmik, ön doğrultucu kontakten oluşurken, her iki tip için yarıiletkenin arka kısmında yer alan mat yüzüne büyütülen saf metalin elverişli bir

sıcaklıkta yarıiletkenin içerisine geçmesinin sağlanması sonucunda düşük dirençli ohmik kontak oluşturulmak için son derece önem arz etmektedir.

3.2.1. Metal/n-tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar

İki iletken, kontak durumuna getirildiği zaman elektrokimyasal potansiyelleri aynı seviyeye ulaşıncaya değin aralarında bir yük alışverişi olur. Böylece yeni denge durumu oluşması sonucunda her iki maddenin Fermi enerji seviyeleri eşitlenmektedir.

Bu durumu açıklayabilmek için bir metal ve bir n-tipi yarıiletkeni ele alacak olursak. Oda sıcaklığında bulunan yarıiletken içerisinde tüm donörler iyonize olsun. Metalin iş fonksiyonu Φ_m , yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s , yarıiletkenin elektron ilgisi Φ_s ve $\Phi_m > \Phi_s$ olsun. Kontak oluşmadan önceki durumunda,



Şekil 3.3. Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontakın enerji-band diyagramı (a) kontak öncesi, (b) kontak sonrası, (c) yarıiletkene $-V$ gerilimi uygulandığında, (d) yarıiletkene $+V$ uygulandığı durumda (Ziel, 1968)

Şekil 3.3 incelendiği zaman yarıiletkenin Fermi enerji (E_f) seviyesi metalin Fermi enerji (E_f) seviyesinden farkı (Φ_m, Φ_s) kadar yukarıda olmaktadır. Kontak kurulmasının akabinde yarıiletken yüzeyden metale doğru elektronlar geçerken, geride iyonize olmuş donörler bırakılırlar. Metal ve yarıiletken arasında yük alışverişi tamamlanmasının ardından her iki tarafın Fermi enerji (E_f) seviyeleri eşitlenir. Yani yarıiletkenin enerji seviyeleri şekil’de görüldüğü gibi Fermi enerji (E_f) seviyesi farkı ($\Phi_m - \Phi_s$) kadar alçalmıştır. Dolayısıyla, kontakta oluşan dipol tabakası sebebiyle eklem üzerinde bir potansiyel engeli meydana gelmektedir. Bu engelin yarıiletken tarafındaki yüksekliği ($\Phi_m - \Phi_s$) ve metal tarafındaki yüksekliği ise ($\Phi_m - \chi_s$) kadardır.

Engel yüksekliğinin difüzyon potansiyeli türünden yazacak olursak;

$$qV_{dif} = \Phi_m - \Phi_s \quad (3.4)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Elektronlar yarıiletkenin iletkenlik bandından metal tarafa geçerken bir engelle karşılaşılırlar. Kontakın yarıiletken tarafındaki pozitif yük sayısı, metal tarafındaki iyonize olmuş yük sayısından fazla olması, az iyonize olmuş donörlerin sebep olduğu ve bunların yarıiletken içerisinde hareketsiz olmalarından dolayı bunlara yüzey yükü olarak değil, bir uzay yükü olarak bakılması gerekmektedir. Kontaktaki meydana gelen potansiyel engelinden dolayı, yüzey tabakası engel tabakası olarak bilinmektedir. Bahse konu olan tabakanın kalınlığı (d) iyonize olmuş donörlerin konsantrasyonuna ve difüzyon potansiyelinin (V_d) değeri ile orantılıdır. Metal ve yarıiletken içindeki bazı elektronların termal tavlama yöntemi ile kazandıkları enerji, elektronun potansiyel engelini aşmalarına yetebilecek büyüklüğe geldiği zaman, kontakta eşit ve zıt yönde bir I_0 sızıntı akımı geçmektedir. Eğer yarıiletkene bir $-V$ gerilimi uygulanırsa metal taraftan yarıiletkene geçecek olan elektronlar için engel yüksekliği değişmeyecek ve bu sebeple de bu elektronların meydana getirecekleri akım da değişmeyecektir. Yalnız yarıiletken tarafında, iletkenlik bandı qV kadar yükselecek ve yarıiletkenden metale geçecek elektronlar için engel yüksekliği qV

kadar azalacaktır. Bu nedenle metal kısımdan yarıiletken kısma doğru akım akmaktadır. Bu akan akım ise, $\exp(qV/kT)$ faktörü kadar değişim gözlenecektir.

Bu değişim neticesinde oluşan net akım ise;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.5)$$

ile bulunabilmektedir. Burada k Boltzman sabiti, T Kelvin cinsinden sıcaklık ifadesidir. I_0 diyodun doyma akımı olup aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$I_0 = AA^* \exp\left(-\frac{q\Phi_{bo}}{kT}\right) \quad (3.6)$$

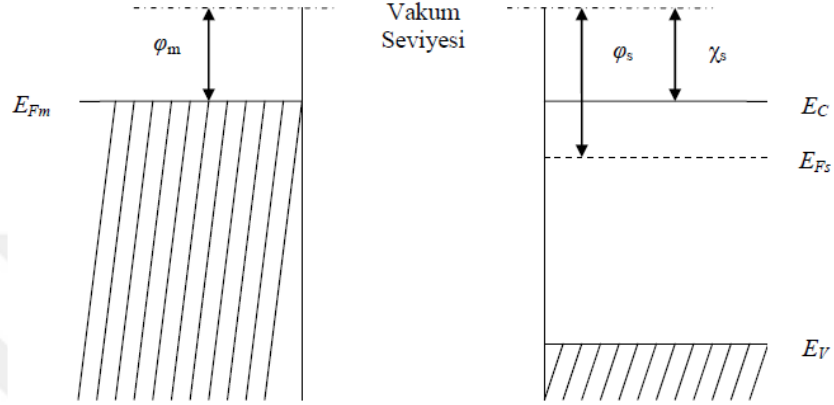
I net akım değeri pozitif bir değere sahiptir (Rhoderick 1988; Ziel 1968). Oluşan beslem durumuna ($V \gg kT/q$) düz beslem hali olarak ifade edilmektedir. Diyotun yarıiletken kısmına $+V$ gerilim uygulandığımız zaman iletkenlik bandında meydana gelen enerji seviyeleri qV kadar alçalır bununla birlikte yarıiletken kısmındaki engel yüksekliği de qV kadar artmaktadır. Bununla birlikte oluşan net akım da $-I_0$ değerine yaklaşır. Bu beslem durumuna da ($V \ll kT/q$) hali olarak ifade edilmektedir.

3.2.2. Metal- n-tipi Yarıiletken Omik Kontaklar

Metal yüzeyden yarıiletken yüzeyine, yarıiletken yüzeyden metal yüzeye doğru elektron akışının serbest olduğu kontaklara omik kontaklar denir. Omik kontak eklemin bir tarafından diğer tarafına doğru akımın herhangi bir zorlukla karşılaşmadan ve ohm kanununa uyan kontaklır. Omik kontaklarda $\Phi_s - \chi_s$ değeri küçük olduğundan dolayı elektronlar zorlukla karşılaşmadan engel boyunca rahatlıkla hareket edebilirler.

Yarıiletkenleri incelediğimiz zaman iş fonksiyonu, metalin iş fonksiyonundan daha büyük olduğunu ve bu kontak şekli için ise kontakdan önceki enerji-bant diyagramını Şekil 3.4'teki gibi göstermek mümkün olmaktadır. Şekli incelediğimiz zaman görüldüğü üzere yarıiletkenin Fermi Enerji seviyesi metalin Fermi Enerji seviyesinden ($\Phi_s - \Phi_m$) kadar aşağıda bulunmaktadır. Kullanılan bu iki malzeme kontak hal aldığı

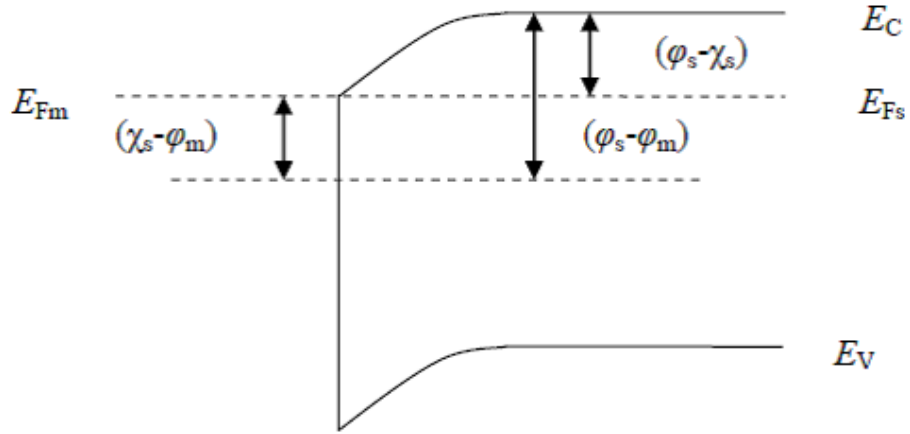
zaman iş fonksiyonu küçük olan taraftan, iş fonksiyonu büyük olan tarafa doğru bir yük akışı meydana gelmektedir. Şöyle ki, elektronlar metalden koparak yarıiletken, kontağın metal tarafında iyonize olduktan sonra pozitif yüzey yükü bırakıp, geçerken yarıiletken tarafında ise negatif yüzey yükü oluşur. Oluşan yük akışı tamamlanıp bittikten sonra yarıiletkenin Fermi Enerji seviyesi ($\Phi_s - \Phi_m$) kadar yükselmiş olur.



Şekil 3.4. Metal ve n-tipi yarıiletkenin kontak durumundan önceki enerji-bant diyagramı

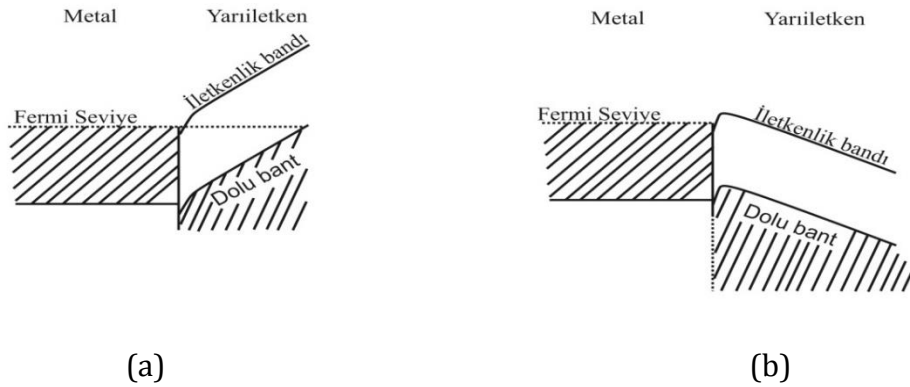
Kontaktan oluşumundan sonraki enerji-bant diyagramı ise Şekil 3.5'te gösterilmektedir. Böyle bir durumda, MY kontağın yarıiletken kısmına uygulanan gerilim (V), metal kısmına nazaran negatif gerilim (-V) uygulanan yarıiletkenin enerji seviyesinin yukarıya doğru bükülmeye sebep olmaktadır. Böylelikle, yarıiletken taraftan metal tarafa daha da doğru elektron akışı çok daha kolay olacaktır. Bu durumun tam tersi bir işlem uygulayacak olursak, şöyle ki kontağın yarıiletken tarafından metal tarafına göre pozitif bir gerilim (+V) uygulandığı zaman, yarıiletken tarafında ki enerji seviyesinin daha da aşağıya doğru bükülme gerçekleştirmektedir. Bu sebepten dolayı metal taraftan yarıiletken tarafa doğru elektron akışı çok daha rahat olacaktır.

Yarıiletken taraftan metal tarafa doğru, metal taraftan da yarıiletken tarafa doğru daha rahat bir elektron akışının olduğu kontak türüne ohmik kontak adı verilmektedir. Şöyle ki ohmik kontaklarda her iki tarafta da meydana gelen akım akışı kolay bir şekilde gerçekleşmektedir.



Şekil 3.5. Metal ve n-tipi yarıiletkenin kontak durumdan sonraki enerji-bant diyagramı ($\Phi_m < \Phi_s$ durumunda)

Kontak olduğu zaman metalden yüzeyden yarıiletken yüzeye doğru geçen elektronlar, metal tarafta pozitif yükleri oluştururken yarıiletkenin ise kontağa yakın tarafta iletkenlik bandı bölgesinde negatif yük tabakası meydana getirirler. Meydana gelen bu durumda yarıiletken yüzeyin n-tipliliği artar (aşırı n-tipi). Bu yük geçişi termal denge oluşuncaya kadar devam eder ve iki malzemenin Fermi Enerji seviyeleri eşit olduğu zaman yarıiletkenin Fermi Enerji seviyesi $q(\Phi_s - \Phi_m)$ kadar yükselmiş olur. Daha sonrasında ise, yarıiletkenin iletkenlik ve valans bandının metale yakın kısmı $q(\Phi_s - \Phi_m)$ kadar aşağı doğru bükülür.



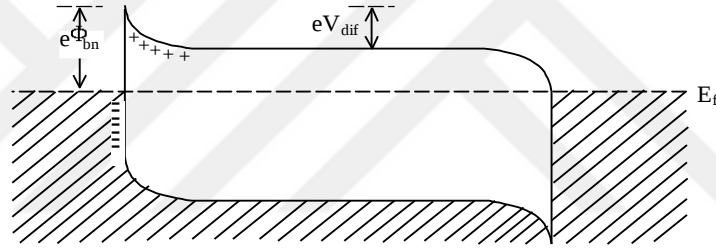
Şekil 3.6. (a) Kontak tarafına negatif voltaj ($-V$) uygulandığı zaman enerji-bant diyagramı (b) Kontak tarafına pozitif voltaj ($+V$) uygulandığı zaman enerji-bant diyagramı

Meydana gelen eklemden metali yarıiletkenine göre pozitif yapacak gerilim uygulanırsa yarıiletken yüzeyden metal yüzeye geçen elektronlar için engel yoktur ve elektronlar

bu yönde daha kolay bir şekilde hareket edebilirler (Şekil 3.6.a). Bu durumda yarıiletken yüzeyin n-tipliliği artar (aşırı n-tipi) Kontakta ters gerilim uygulanırsa yarıiletkenin aşırı güçlü olduğu durumundan dolayı elektronların karşılaşacağı engel yüksekliği çok küçük olacaktır ve elektronlar kolayca metalden yarıiletkene akacaktır (Şekil 3.6.b).

3.2.3. Metal(Omik) / n-tipi Yarıiletken / Metal (Doğrultucu) Kontaklar

n-tipi yarıiletkenin elektron bakımından çok zengin omik kontak bir yüzeyine uygulanırken, diğer yüzeyine doğrultucu kontak uygulanarak elde edilmektedir. Dolayısıyla omik kontak tarafı $V < 0$ olacak şekilde beslendiği zaman yapı doğru beslemde olurken, $V > 0$ olacak şekilde beslendiği zaman ise yapı ters beslemde olacaktır.



Şekil 3.7. Yarıiletken diyodun enerji-bant diyagram gösterimi

3.3. Metal-Yarıiletken Doğrultucu Kontakta Potansiyel Dağılımı ve Schottky Kapasitesi

Schottky bölgesinin kapasitesi, yük dağılımı nedeni ile değişecektir. Bu değişim özelliklerinden ötürü Schottky diyotları, gerilim kontrollü değişken kapasitörler olarak kullanılmaktadır. Metal/n-tipi yarıiletken Schottky bölgesinin kapasitesini bulmak için ise, diyodun engel bölgesindeki potansiyel dağılımının Poisson eşitliği;

$$\nabla^2 \Psi(x) = -\nabla E(x) = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (3.7)$$

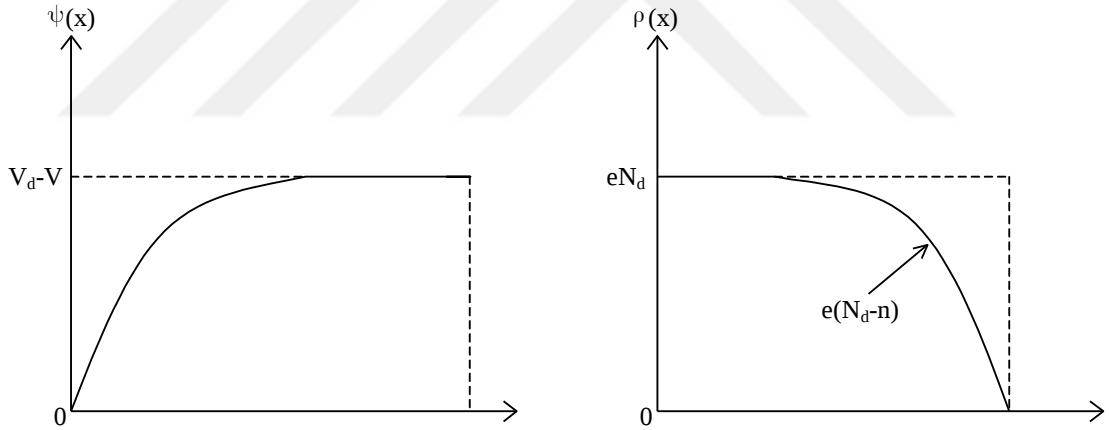
şeklinde ifade edilebilir (Ziel 1968).

ϵ_s ; yarıiletkenin dielektrik sabiti, ϵ_0 boş uzayın elektriksel geçirgenliği, ϵ_x konuma bağlı uzay yük yoğunluğu olarak ifade edilmektedir.

n-tipi yarıiletkende, donör yoğunluğu N_d ve iletkenlik bandındaki elektron yoğunluğu n olarak ifade edersek uzay yük yoğunluğu ise;

$$\rho(x) = e(N_d - n) \quad (3.8)$$

Olarak ifade edilmektedir (Rhoderick 1988). Eşitlikte yer alan N_A , yarıiletkendeki iyonize olmuş alıcı yoğunluğu ve N_d , yarıiletkendeki iyonize olmuş donör yoğunluğudur Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın, $\psi(x)$ potansiyel fonksiyonu ve $\rho(x)$ uzay yükü yoğunluğu olarak ifade edilirken, 3.8 denkleminin konuma göre değişimleri;



Şekil 3.8. Metal/n-tipi doğrultucu kontağın a) Potansiyel dağılımının konuma göre, b) Yük dağılımının konuma göre grafikleridir.

$e(V_d - V) \gg kT$ olduğu zaman, $0 \leq x \leq d$ aralığında $N_d \gg n$ olmaktadır. Bu durumda

$\rho(x)$;

$$\rho(x) = eN_d \quad (3.9)$$

şeklinde ifade edilmektedir. 3.9 denklemini 3.7 denleminde yerine yazdığımız zaman tek boyutlu, Poisson denklemi için;

$$\frac{d^2 \Psi(x)}{dx^2} = -\frac{eN_d}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (3.10)$$

ifade edilmektedir.

$\psi(x)$, potansiyel engeli bölgesi için, $x = 0$, $x \geq d$ ve $x \leq d$ sınır şartlarında;

$$x = 0 \quad \psi(x) = 0$$

$$x \geq d \quad \psi(x) = V_d \pm V$$

$$x \leq d \quad \frac{d\psi(x)}{dx} = 0$$

3.10 denklemine göre $x \leq d$ sınır şartına göre integralini alırsak, kontak bölgesinde yer alan elektrik alanı buluruz.

$$E(x) = -\frac{d\psi(x)}{dx} = \frac{eN_d}{\epsilon_s \epsilon_0} (x - d) \quad (3.11)$$

3.11 denkleminde $x = 0$ sınır şartında integrali alırsak;

$$\psi(x) = -\frac{eN_d}{\epsilon_s \epsilon_0} \left(\frac{1}{2} x^2 - xd \right) \quad (3.12)$$

Schottky diyotunun tabakasının d kalınlığı (3.12) ifadesine $x \geq d$ sınır şartının uygulanarak bulunmaktadır.

$$V_d \mu V = \frac{e N_d}{2 \epsilon_s \epsilon_0} d^2 \quad (3.13)$$

$$d = \left[\frac{2 \epsilon_s \epsilon_0}{e N_d} (V_d \mu V) \right]^{1/2} \quad (3.14)$$

3.13 ve 3.14 ifadelerinde yer alan V_d difüzyon potansiyelidir. Yarıiletkenin yüzey birimi başına yük yoğunluğu ise;

$$Q = e N_d d = [2 \epsilon_s \epsilon_0 e N_d (V_d \pm V)]^{1/2} \quad (3.15)$$

olarak ifade edilmektedir. Birim alanı başına hesaplanan kapasite miktarı, uygulama voltajına göre yük değişimi olarak tanımlanır. Diğer bir ifade ile dQ/dV olur. Toplam kapasite ise;

$$\begin{aligned} C = A \frac{dQ}{dV} &= \left[\frac{e \epsilon_s \epsilon_0 N_d}{2 (V_d \mu V)} \right]^{1/2} A \\ &= \frac{\epsilon_s \epsilon_0}{d} A \end{aligned} \quad (3.16)$$

3.16 denkleminde yer alan A kontak alanı olarak ifade edilmektedir. Kapasitenin uygulama voltajıyla ters orantılı, donör yoğunluğuyla doğru orantılı olduğu görülmektedir. Bu ifade;

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_d \mu V)}{e \epsilon_s \epsilon_0 N_d A^2} \quad (3.17)$$

şeklinde yazabiliriz. $1/C^2$ 'nin V ye göre grafiği bir doğru verir. Doğrunun V eksenini kestiği nokta V_d difüzyon potansiyelidir ve doğrunun eğiminden de N_d hesaplanır.

$$N_d = \frac{2}{e \epsilon_s \epsilon_0} \frac{dV}{d(1/C^2)} \quad (3.18)$$

3.4. Schottk Diyotlarda Termioyonik Emisyonla Akım İletimi

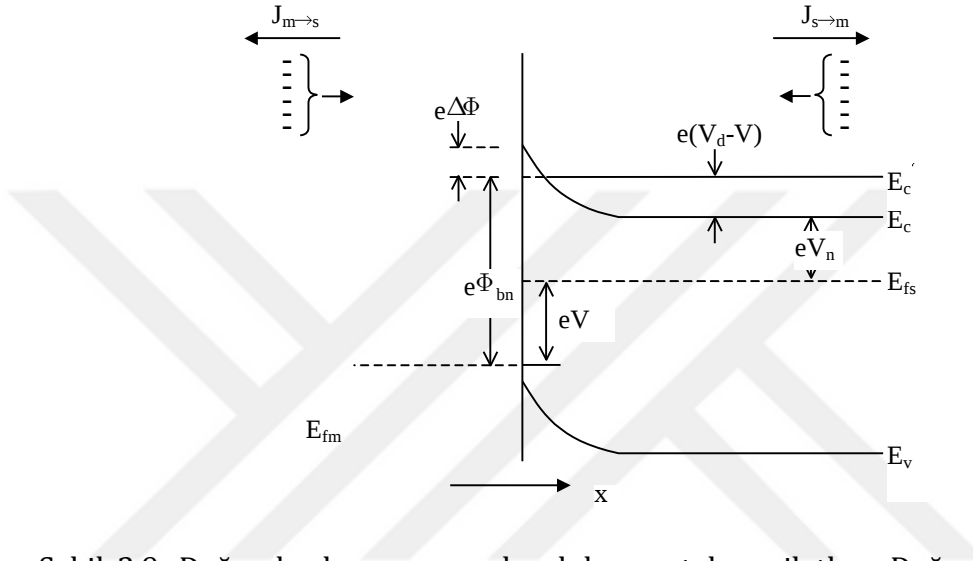
Schottky kontaklarında potansiyel engeli üzerinden elektron taşınması işlemi termioyonik alan emisyon teorisi ile açıklanır. Sıcak olan yüzeyden taşıyıcıların bırakılması ya da salınması olarak ifade edilmektedir. Schottky kontaklarda yeterli seviyede termal enerjiye sahip olan taşıyıcıların potansiyel engel üzerinden yarıiletken yüzeyden metal yüzeye veya metal yüzeyden yarıiletken yüzeye geçmeleri olayına Termiyonik emisyon (TE) olarak bilinmektedir.

Termiyonik emisyon yarıiletken yapılarda deşikler neden olmaktadır, şöyle ki metal/n-tipi yarıiletken yapılarda elektron, metal/p-tipi tarafından sağlanması ile meydana getirmektedir. (Sze, 2007), (Wiley & Sons, 1998) Metal yüzeye maruz bırakılan gerilimden bağımsız ve termal enerjileri nedeni ile metal yüzeydeki engeli aşabilen elektronların meydana getirdiği akım I_0 yani termiyonik akımıdır. Bethe'nin MS kontaklarda oluşan akımı çoğunluk taşıyıcılar tarafından iletildiğini varsayarak kurduğu TE teorisinin temel varsayımları ise şunlardır (Rhoderick, 1988).

- Potansiyel engelinin yüksekliği Φ_B , kT/q enerjisinden çok daha büyüktür.
- Schottky bölgesinde taşıyıcı çarpışmaları yaşanmamaktadır. Şöyle ki taşıyıcıların Schottky bölgesinin genişliği serbest olarak ortalama yolları küçüktür.
- Görüntü kuvvetlerin tesiri göz ardı edilir, engelin biçimi önemli olmayıp akım engel yüksekliğine bağı zayıftır.

Metal-yarıiletken doğrultucu kontak diyotlarda termioyonik emisyon teorisi, taşıyıcıların termal enerjileri sebebiyle potansiyel engelini aşarak yarıiletkendeki metale ya da metalden yarıiletkene geçmesidir. Doğrultucu kontak diyotlarında akım, çoğunluk taşıyıcıları tarafından iletiminin yapılması sağlanmaktadır. Metal/n-tipi

yarıiletken doğrultucu kontak diyotlarında elektronlar, Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontak diyotlarında ise boşluklar akımı sağlamaktadır. Termoionik emisyon teorisinde, Maxwell-Boltzmann yaklaşımının uygulanması ve termal denge halinin etkilenmemesi için, doğrultucu kantağa ait potansiyel engelinin kT enerjisinden daha büyük olabileceği ve arınma bölgesindeki taşıyıcı çarpışmalarının çok daha küçük olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 3.9. Doğru besleme maruz bırakılan metal yarıiletken Doğrultucu ya da Schottky kontakta imaj azalma etkisine gösteren enerji-bant diyagramı

Şekilde görüldüğü üzere doğrultucu kantağa V büyüklüğünde doğru beslem gerilimi uygulanmaktadır. Bu kapsamda, $J_{s \rightarrow m}$ yarıiletkenden metale doğru akan akım yoğunluğu ve $J_{m \rightarrow s}$ metalden yarıiletkene akan akım yoğunluğudur. $J_{s \rightarrow m}$ akım yoğunluğu, $+x$ yönüne doğru ve engeli aşabilecek büyüklükteki hızlara sahip elektronların konsantrasyonunun bir fonksiyonu,

$$J_{s \rightarrow m} = e \int_{E_c}^{\infty} v_x dn \quad (3.19)$$

3.19 ifadesinde yer alan E_c' ; metal içindeki termoiyonik emisyon için gereken minimum enerji, v_x sürüklenme yönündeki hızı olarak ifade edilmektedir. Bu nedenle, artan elektron konsantrasyonu,

$$dn = g_c(E) f(E) d(E) \quad (3.20)$$

3.19 ifadesi ile verilmektedir. Bu ifadeye göre $g_c(E)$, iletkenlik bandında bulunan hal yoğunluğu, $f(E)$, Fermi-Dirac ihtimaliyet fonksiyonudur. Maxwell-Boltzman yaklaşımını kullanarak elektron konsantrasyonu için;

$$dn = \frac{4\pi(2m_n^*)^{3/2}}{h^3} \sqrt{E - E_c} \exp\left[-\frac{(E - E_f)}{kT}\right] dE \quad (3.21)$$

3.20 ifadesinde yer alan $(E - E_c)$ enerjisi serbest elektronun kinetik enerjisi olarak düşünülürse;

$$\frac{1}{2} m_n^* v^2 = E - E_c \quad (3.22)$$

$$dE = m_n^* v dv \quad (3.23)$$

$$\sqrt{E - E_c} = v \sqrt{\frac{m_n^*}{2}} \quad (3.24)$$

3.20 ifadesinde gerekli düzenlemeleri yaparsak;

$$dn = 2 \left(\frac{m_n^*}{h} \right)^3 \exp\left(-\frac{eV_n}{kT}\right) \exp\left(-\frac{m_n^* v^2}{2kT}\right) 4\pi v^2 dv \quad (3.25)$$

3.25 ifadesini elde etmiş oluruz. 3.24 ifade eşitliğine göre, hızları v ile $v+dv$ aralığında değişen elektronların sayısını verir.

Kontak yüzeyi x eksenine yönüne dik olacak şekilde alırsak, kontak yüzeyine dik doğrultuda hareket eden elektronların x eksenindeki hız bileşeni v_x olur. Bu nedenle yarıiletken yapıda hızlar v_x ile $v_x + \Delta v_x$ arasında değişim gösteren elektronların yoğunluğu;

$$dn_x = N_d \left(\frac{m^*}{2\pi kT} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{m_n^* v_x^2}{2kT} \right)^{1/2} dv_x \quad (3.26)$$

eşitliği ile sağlanmaktadır. Bu ifadede N_d verici atomların yoğunluğu, m^* elektronun etkin kütlesi olarak ifade edilmektedir. Şayet yarıiletken yüzeyine bir gerilim uygulandığı takdirde elektronların yarıiletken yüzeyden metal yüzeye doğru olan akım yoğunluğu, $\frac{1}{2} m^* v_x^2 > eV_D$ şartını sağladığı zaman, elektronların birim zamanda birim yüzeyden geçen sayısının e ile çarpımıdır. Böylece yarıiletkenden metale doğru olan akım yoğunluğu, hız bileşenleri; $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$ dir. Buradan $J_{s \rightarrow m}$ ifadesi;

$$J_{s \rightarrow m} = 2e \left(\frac{m_n^*}{h} \right)^3 \exp \left(\frac{-eV_n}{kT} \right) \int_{v_{0x}}^{\infty} v_x \exp \left(-\frac{m_n^* v_x^2}{2kT} \right) dv_x \\ \times \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(-\frac{m_n^* v_y^2}{2kT} \right) dv_y \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(-\frac{m_n^* v_z^2}{2kT} \right) dv_z \quad (3.27)$$

3.27 eşitliğini elde etmekteyiz.

3.27denklemine göre v_{0x} hızı, x doğrultusunda elektronun potansiyel engelini aşabilmesi için gerekli minimum hız olarak ifade edilmektedir.

3.26 ifadesi için şu değişken değiştirmeler yapılabilir:

$$\frac{m_n^* v_x^2}{2kT} \equiv \alpha^2 + \frac{e(V_d - V)}{kT} \quad (3.28a)$$

$$\frac{m_n^* v_y^2}{2kT} \equiv \beta^2 \quad (3.28b)$$

$$\frac{m_n^* v_z^2}{2kT} \equiv \gamma^2 \quad (3.28c)$$

minimum v_{ox} hızı için;

$$\frac{1}{2} m_n^* v_{ox}^2 = e(V_d - V) \quad (3.29)$$

Bu minvalde $v_x \rightarrow v_{ox}$ şartı için $\alpha = 0$ olur.

$$\begin{aligned} J_{sm} &= \int_{v_{ox}}^{\infty} e v_x dn_x = \int_{v_{ox}}^{\infty} e N_d \left(\frac{m^*}{2\pi kT} \right)^{1/2} v_x \exp \left(-\frac{m_n^* v_x^2}{2kT} \right)^{1/2} dV_x \text{ ise,} \\ J_{sm} &= e N_d \left(\frac{kT}{2\pi m_x} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{m_n^* v_x^2}{2kT} \right) \\ J_{sm} &= e N_d \left(\frac{kT}{2\pi m_n^*} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{eV_D}{kT} \right) \end{aligned} \quad (3.30)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Şayet iletkenlik bandının alt kısmında meydana gelen enerji seviyesini yok sayarsak ya da sıfır olarak kabul edersek ($E_C - E_F = E_F$), iletim bandında oluşan yoğunluk;

$$\begin{aligned} N_C &= \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{E_F}{kT} \right) \\ \text{ve} \\ N_V &= \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{E_F}{kT} \right) \end{aligned} \quad (3.31)$$

$e\Phi_{Bn} = E_s - \Phi_m$ ifadesi içerisinde yazılır ise,

$$J_{sm} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2 T^2}{h^3} \exp \left(-\frac{eV_D + E_F}{kT} \right) \right) \quad (3.32)$$

elde edilmektedir. Metal yüzey tarafında yarıiletkenin iletkenlik bandının kenar kısmına göre engel yüksekliği ise;

$$q\Phi_{Bn} = \left(qV_0 + \frac{kT}{q} \right) + E_F = V_D + E_F \quad (3.33)$$

dir. Bununla birlikte yarıiletken yüzeyden metal yüzeye doğru akım yoğunluğu;

$$J_{sm} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (3.34)$$

3.34 ifadesinde $A^* = \frac{4\pi r m^* k^2}{h^2}$ elektronlar için etkin Richardson sabiti (n-tipi Si için $120 \text{ A.cm}^{-2}\text{K}^{-2}$) ve Φ_{Bn} , metal ile n-tipi yarıiletken arasında meydana gelen potansiyel engel yüksekliğidir. Metal n-tipi yarıiletken Schottky kontağı doğru öngerilim altında iken engel yüksekliği azalacağı için akım yoğunluğu değeri $\exp(eV/kT)$ çarpanıyla doğru orantılı olarak artar. Dolayısıyla yarıiletken yüzeyinden metal yüzeyine doğru akım yoğunluğu;

$$J_{sm} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (3.35)$$

Uygulama gerilimi sıfır olduğunda ya da diğer bir ifade ile termal denge durumunda her iki yöndeki akım yoğunlukları (J_{sm} ile J_{ms}) eşit olur.

$$J_{ms} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (3.36)$$

Oluşturulan eklemdeki net akım yoğunluğu ($J = J_{sm} - J_{ms}$) olacağı için ifadeyi daha açık bir şekilde yazacak olursak;

$$J_n = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.37)$$

olmaktadır. Burada $J_0 = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right)$ ifadesi ise sızıntı akım yoğunluğu olarak da bilinen ters doyma akım yoğunluğudur. (Cowley, 1965).

$J=I/A$ olduğunu dikkate alınacak olursa, Schottky kontakların çok ince bir ara yüzey tabakasına sahip olmalarından dolayı, termoiyonik emisyon teorisine göre uygulanan V gerilimi için oluşan doğru beslem akım ifadesi ($V > 3kT/q$) durumunda ise;

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (3.38)$$

şeklindedir. 3.38 ifadesinde n idealite faktörü, k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık ve I_0 ekstrapole edilmiş doyma akım değeri olarak ifade edilmektedir.

Seri direnç etkisi olduğu düşünülerek modifiye edilmiş ifadesi I ise;

$$I = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (3.39)$$

Bu ifadede,

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \quad (3.40)$$

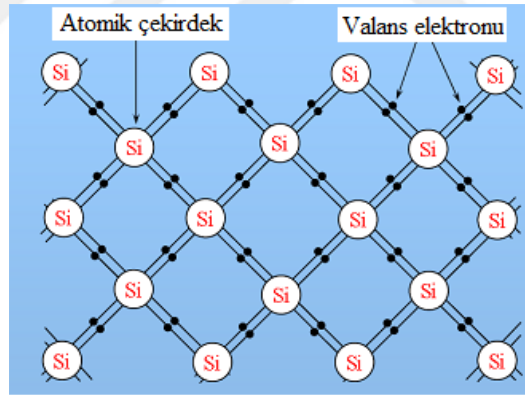
3.39 ifadesinde yer alan R_s etkisinden dolayı bir MIS Schottky bariyer diyota ait doğru beslemdeki (I-V) karakteristikleri ideal durumdan uzaklaştığı için literatürlerde ki çalışmalarda da görüleceği üzere akımın potansiyeli bu şekilde üstel bağılılığı genellikle kT/q ile ($\sim 1,5$ V) arasındaki bir değerde geçerli olmaktadır (D. Subba Reddy1, 2011), (Yıldırım, 2012), (Tataroğlu, 2013), (Farooq, 2010).

4. MATERYAL VE YÖNTEM, DENEYSEL ÇALIŞMA, TEORİ

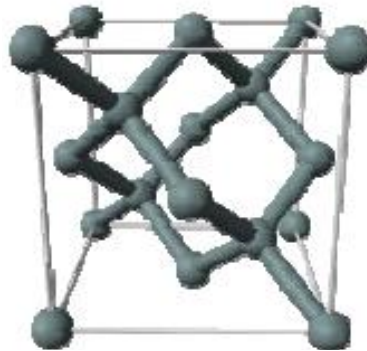
4.1. Materyal

4.1.1. Si Temel Özellikleri

Katı haldeki maddeler elektrik özelliklerine göre; iletken, yalıtkan ve yarıiletken olmak üzere üç grupta incelenmektedir. İletken maddelerde sıcaklık artışı olduğu zaman iletkenlik özelliği azalmaktayken yarıiletken maddelerde artmaktadır ve elektriksel öz dirençleri oda sıcaklığında $10^{-4} - 10^{10}$ (Wcm) arasında değişim göstermektedir. Yeryüzünde en çok bulunan, bilinen ve kullanılan yarıiletken madde olan periyodik çizelgenin IV. grubunda yer alan ve enerji aralığı yaklaşık 1.10 eV olan silisyumdur. Silisyum elementinin atom numarası 14 olup, elektron konfigürasyonu $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$ 'dir. Bahse konu olan silisyum elementinin konfigürasyonda da görülmekte olduğu üzere valans bandında dört elektron bulunan silisyum atomu kovalent bağ ile karakterize edilir ve kristal yapısı elmas kübik yapıda bulunmaktadır.



Şekil 4.1. Silisyum kristali kovalent bağ yapısı



Şekil 4.2. Silisyum kristalinin kübik yapısı.

Silisyum elementinin bazı fiziksel özellikleri ise Çizelge 4.1 de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Silisyum yarıiletkeninin bazı özellikleri

Özellik	Değer
Erime noktası ($^{\circ}C$)	1420
Kaynama noktası ($^{\circ}C$)	2355
Sertlik (Mohs)	6,5
Kırılma indisi	3,9
Dielektrik katsayısı	12
Örgü parametresi (nm)	0,543
Spesifik ısı kapasitesi (J/g.K)	0,7
Isıl iletkenlik (W/m.K)	150
Yoğunluk (g/cm^3)	2,33
Yasak band genişliği, 300 K (eV)	1,1
Elektronların mobilitesi, 300 K ($cm^2/V.s$)	1350
Deliklerin mobilitesi, 300 K ($cm^2/V.s$)	480
Özden yük taşıyıcılarının konsantrasyonu, 300 K (cm^{-3})	$1,5 \times 10^{10}$

Kullanmak istenilen özelliklere sahip yarıiletken madde elde edebilmek için bazı yabancı atomlar yarıiletken malzemeye çeşitli yöntemler kullanılarak katkılanmaktadır. Silisyum atomuna periyodik cetvelde yer alan ve V. grup elementlerinden (As, Sb, P, N) biriyle kakalandığında n-tipi silisyum elde edilmektedir. V. grup elementlerin son yörüngelerinde beş valans elektronu bulunmaktadır. Dolayısıyla elektronların dördü silisyum atomunun dört valans elektronu ile kovalent bağ kurmaktadır. Kalan bir elektron ise katkı atomuna zayıf bir elektriksel kuvvet ile bağlanmaktadır ve bağ çok zayıf olduğu için çok kolay iyonlaşır. Başka bir deyişle katkı atomu silisyum kristaline bir elektron vermiş olur. Dolayısıyla oluşan örgü içinde bağımsız hareket edebilir. Kristal oluşumunda katkı atomu bir elektron verdiği için donör diye adlandırılır ve bu donör atomları ile katkılı silisyum yani n tipi silisyum meydana gelir. Donör atomları yarıiletken madde içinde bulundukları enerji seviyesi, yasak band aralığında ve iletim bandı alt sınırı yakınındadır.

n-tipi yarıiletken maddede donörün iyonlaşması ile birlikte valans bandında boşluk oluşmaktadır. Donör konsantrasyonuna bağlı olacak şekilde n-tipi yarıiletken maddede elektron konsantrasyonu boşluk konsantrasyonundan büyük olacağı için, elektriksel iletkenlikte elektronların rolü çok daha fazla olacaktır. Bu nedenle n-tipi yarıiletken

maddelerde çoğunluk yük taşıyıcıları (n) elektronlar azınlık yük taşıyıcıları (p) ise boşluklardır.

4.1.2. Difüzyon Kuralları ve Difüzyon Mekanizmaları

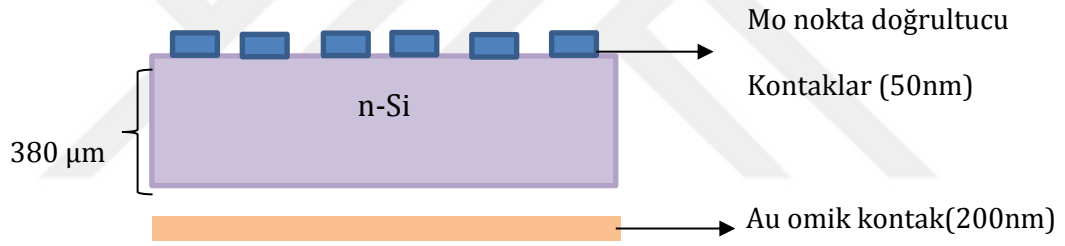
Katı maddelerde atomlar ısının etkisi ile denge konumlarında etraflarında küçük genlikli titreşim hareketleri yaparlar. Genlik ve sıcaklık doğru orantılı olduğu için sıcaklık arttıkça titreşimlerin genliği de artar ve bazı atomlar komşu atomlarla bağlarını koparıp ayrılır ve yeni bir denge konumuna geçerler. Bu süre zarfında çok sayıda atom tekrarlanır. Bu şekilde atomların ısı etkileri ile bir denge konumlarında diğer denge konumuna atlamaları olayına difüzyon denir. Bu nedenle de atomların malzeme içerisinde taşınma işlemine ise difüzyon olayı olarak adlandırılır. Şayet taşınan olayı içerisinde saf malzeme kendi atomları ile gerçekleşiyorsa olay öz difüzyon, yarıiletken katkı atomları hareket ederse difüzyon olarak adlandırılır.

Schottky bariyeri, yarıiletken taban üzerinde ince bir metal tabakanın birikimi ile oluşabilmektedir. Standartlara uygun bir kontak, uygun metalin ince film tabakası meydana getirecek şekilde; ara yüzey tabakası olmaksızın ve metal atomlarının yarıiletken içerisine difüze olmadan tutunması ile oluşmaktadır. Uygulamada ise fabrikasyon sürecinde çevre koşulları, kimyasal temizleme işlemi ve üretim aşamasında meydana gelen istenmeyen kirlilikler kontak kalitesini etkilemektedir (Rhoderick, 1988) (C. R. Crowell, 1966) (C. R. Crowell, 1981).

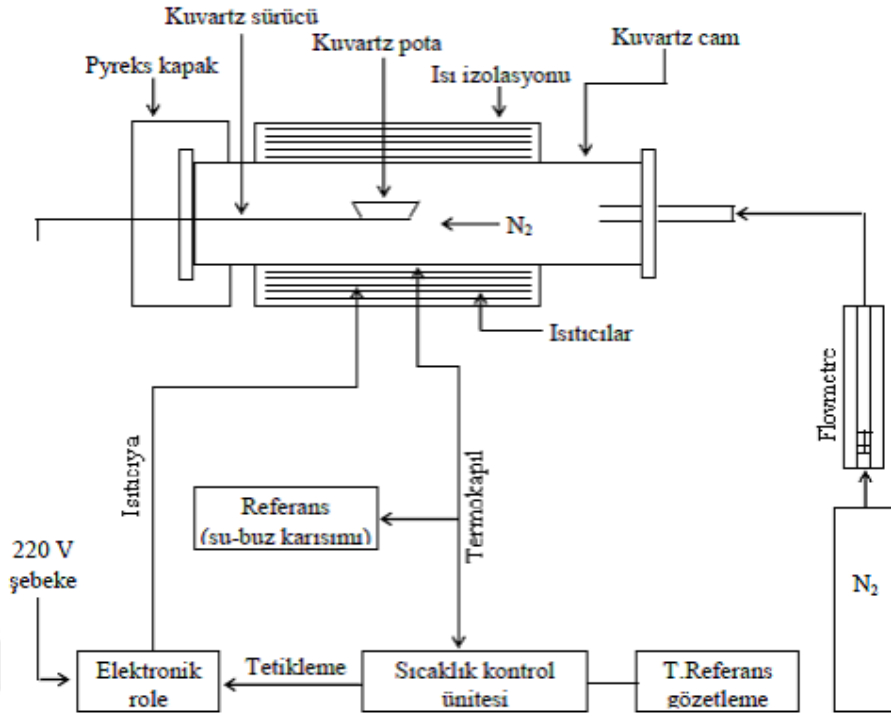
4.1.3. Silisyum Temizleme İşlemi ve Diyot İmalatı

Yaptığımız bu çalışmada Mo/n-Si Schottky diyotunu üretebilmek için (100) doğrultusunda büyütülmüş, 380 µm kalınlığında Fosfor (P) katkılı n-tipi Si yarıiletkeni kullanıldı. Kontak yapılmadan önce n-tipi Si numunesine sırası ile; 5 dakika asetonda ve 5 dakika metanolda ultrasonik yıkama yapıldı. Daha sonra $NH_4OH + H_2O_2 + 6H_2O$ içerisinde 60°C’de sıcaklıkta 10 dakika bekletilerek kimyasal olarak temizlendi ve devamında 10 dakika 60°C’de $HCl + H_2O_2 + 6H_2O$ içerisinde bekletildi. Bu işlemler esnasında ön yüzünde oluşan doğal oksit tabakasını kaldırmak için numune 30 saniye süre ile $HF + H_2O$ (1:10) çözeltisinde bekletildi. Omik kontak yapımından önceki her bir standart temizleme adımından sonra numune 30 saniye de-iyonize suda

durulandı, azot gazı ile kurutuldu. n-tipi Si kristalini temizleme işlemini yaptıktan sonra vakum kaplama cihazına alındı ve omik kontak için arka yüzeyine 10^{-5} Torr basınçta %99.999 saflıkta Altın (Au) metali buharlaştırma işlemi yapıldı. Oluşan n-Si/Au yapısı 580 °C’ de N₂ ortamında 3 dakika tavlandı. Daha sonrasında numune yeniden vakum ortamına alındı. Schottky (doğrultucu) kontak oluşturmak için %99.999 saflıkta Molibden (Mo) bir maske yardımıyla 1,0 mm çapında ve 50 nm kalınlıkta nokta kontaklar meydana getirecek şekilde manyetik saçtırma yöntemi kullanılarak Si numunesinin ön yüzeyine biriktirildi. Böylece Mo/n-Si/Au Schottky yapısı elde edildi. Elde edilen diyotun şematik modeli ise Şekil 4.3’te verilmiştir. Diyot imal edildikten sonra 573 K, 673 K, 773 K sıcaklıklarında 5’er dakika tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Diyotlarımızın I-V ölçümleri Keithley 2400 programlanabilir sabit akım kaynağı ile, C-V ölçümleri ise HP 4192A LF Impedance Analyzer cihazı ile alınmıştır.



Şekil 4.3. Mo/n-Si Schottky diyotun şematik modeli



Şekil 4.4. Şematik olarak tavlama fırını ve sıcaklık kontrol ünitesi (Özdemir, 2002)



Şekil 4.5. Vaksis PVD Handy Saçtırma Magnetron Kaynağı (Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Yarıiletken Laboratuvarı)



Şekil 4.6. HP-4192A Impedance metre (Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Yarıiletken Laboratuvarı)



Şekil 4.7. Keithley 2400 Ampermetre (Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Yarıiletken Laboratuvarı)

4.2. Yöntem

4.2.1. Akım-gerilim Karakteristikleri

Schottky diyot yapılarında akım iletimi çoğunluk taşıyıcılarıyla olmaktadır ve azınlık taşıyıcılarının akıma katkısı ise ihmal edilmektedir. Bu türdeki yapılarda yük taşıyıcılarını termal uyarma ile engeli aşması özelliği, diğer türdeki yapılara göre daha hızlı olmasını sağlamaktadır. Çok fazla katkılanmış yapılarda ise oluşabilecek tünelleme akımları yapının elektriksel performansına katkı sağlamaktadır. Schottky diyot yapılarının akım iletim mekanizmalarında düz beslem yüksek olmadığı süreçte termoiyonik emisyon teorisi geçerli olmaktadır. Aygıtın akım-gerilim ilişkisi;

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (4.1)$$

4.1 denkleminde I_0 doyma akımını ifade etmektedir. Doyma akımı ise;

$$I_0 = AA^*T^2 \exp \left[\frac{-q(\Phi_{B0})}{kT} \right] \quad (4.2)$$

burada A diyot kontak alanı, $A^* = \frac{4\pi qm^*k^2}{h^2}$ Richardson sabiti olup değeri n-tipi Si için $120 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ ve Φ_B potansiyel engel yüksekliğidir. Diyota uygulanan gerilimi kT/q değerinden büyükse $\ln I$ -V grafiğinin doğru olması beklenmektedir. Denklem 4.2'yi denklem 4.1'de yerine yazarsak;

$$I = AA^* \exp \left(\frac{-q\Phi_B}{kT} \right) \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (4.3)$$

elde edilir. I diyot akımı, Φ_B engel yüksekliği, k Boltzmann sabiti, q elektronik yük miktarı, T Kelvin cinsinden sıcaklık, A diyotun kontak alanı ve n idealite faktörüdür. Denklem (4.1)'in her iki tarafının logaritması alınarak V ye göre türevi alınırsa idealite faktörü;

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

olarak elde edilir. Denklemden görüldüğü gibi I-V ölçümlerinden elde edilen veriler ile $\ln I$ -V grafiği çizilir ve eğimi bulunur. N idealite denkleminde yer alan q, k ve T sabit değerler yerlerine yazılır ve numunenin idealite faktör değeri bulunur. Gerilime ve sıcaklığa bağlı ve ideal diyotlar için ise değeri 1 kabul edilmektedir.

$\ln I$ -V grafiğinden $V=0$ noktasında ise, düşey eksen kestiği nokta ise I_0 değeri bulunur. Denklem (4.2) in her iki tarafının logaritması alınarak $q\Phi_b$ engel yüksekliği çözümlenirse;

$$q\Phi_b = kT \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (4.5)$$

elde edilir. $\ln I$ - V grafiğinde $V=0$ 'da düşey eksenini kestiği nokta olan I_0 değeri denklem (4.4)'de yerine yazıldığı zaman kontağın sıfır beslemdeki engel yüksekliği hesaplanmış olur.

4.2.2. Seri direnç belirleme yöntemleri

Diyot parametrelerinin belirlenmesinde ve arayüzey durum yoğunluğu hesaplamalarında seri direnç önemli hatalara sebep olmaktadır. Seri direnç etkisini hazırlanan numunenin üretimi aşamasında ve yapılan ölçümler akabinde değişik teknikler kullanarak azaltmak mümkündür.

Metal/yarıiletken aygıtın seri direncini belirlemek amacı ile gerilime bağlı akım ölçümlerinin kullanıldığı çeşitli yöntemler vardır. Bunlardan en çok kullanılanları Norde yöntemi (Norde, 1979). Bahse konu olan bu yöntemde ideallik faktörü 1 olan yapılar için doğru sonuçlar vermektedir. İdeallik faktörünün 1'den büyük olduğu durumlarda ise modifiye Norde yöntemi geliştirilmiştir (Sato, 1985). 1986 yılında Cheung tarafından Schottky diyot parametrelerinin hesaplanmaları için düz beslem I - V grafiği verileri kullanılarak farklı bir hesaplama modeli ileri sürülmüştür.

4.2.2.1. Cheung yöntemi

Metal-yarıiletken diyotlarda (I - V) akım gerilim karakteristikleri yardımıyla idealite faktörü n , engel yüksekliği ve seri direnç değerlerinin belirlenmesinde Cheung fonksiyonları kullanılmaktadır. (Cheung, 1986). Denklem (4.1)'in logaritmasını alıp V 'ye göre çözümlenirse;

$$V = \left(\frac{nkT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{A A^* T^2} \right) + n\Phi_B + IR_s \quad (4.6)$$

denklemini elde edilir. Bu elde ettiğimiz denklemin her iki tarafın $\ln$ 'ya türevini alırsak;

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (4.7)$$

$dV/(d(\ln I))$ nın I 'ya göre grafiği bir doğrudur ve bu doğrunun eğimi bize R_s seri direncini vermektedir. Grafiğin doğrusunun düşey eksenini kestiği noktadan da n idealite faktörü bulunmaktadır. Potansiyel engel yüksekliği ise;

$$H(I) = V - \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I}{I_{AA} T^2} \right) \quad (4.8)$$

şeklinde bir $H(I)$ fonksiyonu ile tanımlanmaktadır. Denklem (4.5) ve (4.6)'dan $H(I)$ fonksiyonu;

$$H(I) = n\Phi_B + IR_s \quad (4.9)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (4.8) denklemi kullanılarak akıma karşı grafiği çizildiği zaman lineer bir doğru olması beklenmektedir. Meydana gelen lineer doğrunun eğimi seri direnci değerini, düşey eksenini kestiği noktadan ise engel yüksekliği hesaplanmaktadır.

4.2.2.2. Norde Yöntemi

Farklı kalınlıklara sahip arayüzey A_u yapılarının R_s değerlerini elde edilmesinde ki bir başka yöntem Norde Fonksiyonlarıdır. Norde fonksiyonları, Bohlin tarafından Φ_b (engel yüksekliği) ve R_s (seri direnç) değerlerinin sıcaklıkla beraber değişmediği durumlarda gerilim uygulanması ve buna bağlı akım ölçümlerin hesaplaması için önerilmiştir. (Norde, 1979; Bohlin, 1986)

Norde Yöntemi, ideallite faktörü bir olan aygıtlar için geçerli olup ve bir $F(V)$ fonksiyonunu kullanılmaktadır. Bu yöntemde diyot parametrelerini bulabilmek için $F(V)$ fonksiyonunun minimum noktasından yararlanılmaktadır. Tek bir sıcaklıkta elde edilmiş akım-gerilim ölçümleri kullanılarak I - V eğrisini kullanmak engel yüksekliği ve seri direnç parametreleri elde edilir.

Denklem (3.40)'de V harici beslem ve R_s 'de seri direnç olarak tanımlanmaktadır. ($V - IR_s$) ise diyot üzerine düşen gerilim miktarıdır.

Seri direncin yüksek olduğu çalışmalarda akım-gerilim eğrisinin lineer bölgesi oldukça küçülür. Bu durum karşısında Norde, seri direnç hesaplamaları için;

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (4.10)$$

dir. Denklem (4.9) eşitliğinin her iki tarafının ln'ini aldığımız ve denklem (4.10)'da yerine yazdığımız zaman;

$$F(V) = \left(\frac{n-2}{2n}\right)V - \frac{IR}{n} + \Phi_B \quad (4.11)$$

elde edilmektedir. Seri direnç sıfırdan farklı bir değere sahip ise eğri bir minimum değerden geçer.

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{V}{AA^*T^2R}\right) \quad (4.12)$$

Denklem (4.9)'un V'ye göre türevini alıp denklem (4.12)'de yerine yazdığımız zaman;

$$\frac{\partial F(V)}{\partial V} = \frac{n-2+\beta IR}{2(n+\beta IR)} \quad (4.13)$$

$$\beta = q/kT \quad (4.14)$$

denklem (4.13) sıfır olası durumunda,

$$n-2+\beta IR=0 \quad (4.15)$$

Burada seri direnci ve engel yüksekliğinin belirlenmesi için;

$$R_s = \frac{(2-n)kT}{qI} \quad (4.16)$$

$$\Phi_B = F(V)_{min} + \left(\frac{2-n}{2n}\right)\frac{V_0}{2} - \frac{kT}{q} \quad (4.17)$$

$V_0=F(V)$ eğrisinin ise minimumdaki değerine karşılık gelmektedir. 1986'da Bohlin idealite faktörünün 1'den büyük olduğu durumlarda bir modifiye Norde fonksiyonu geliştirilmiştir. (Bohlin, 1986) İdealite faktörünün 1'den büyük olduğu durumlarda (4.17) denklemin $V/2$ yerine V/γ yazıldığı takdirde Modifiye edilmiş Norde fonksiyonu;

$$F(V, \gamma) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{1}{AA^* T^2} \right) \quad (4.18)$$

ya da

$$F(V, \gamma) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (4.19)$$

denklem (4.9)'un her iki tarafı $\ln$ 'ini alıp 4.18 denkleminde çözümlemeler yapıldıktan sonra seri direnç ve engel yüksekliği;

$$\Phi_B = F(V_0, \gamma) - \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n} \right) V_0 - \frac{(\gamma-n)}{\beta n} \quad (4.20)$$

$F(V_0, \gamma) = \gamma$ eşitliğine bağlı yeni $F(V)$ eğrisinin minimum $V_0 = Y_{eni}F(V)$ eğrisinin minimum gerilim değeri hesapladığı zaman

$$R_s = \left(\frac{\gamma-n}{\beta I_0} \right) \quad (4.21)$$

ile hesaplanmaktadır. Ya da denklem (4.11)'de $F(V)$ - V grafiği çizilir ve bu grafiğin bir minimum gerilim değerine sahip olduğu görülür. Bu minimumun gerilim değeri V_{min} , bu değere karşılık gelen I_{min} ve eğimin 0 olduğu noktada seri direnç;

$$R_s = 2 - n/I_{min} \quad (4.22)$$

ve engel yüksekliği ise;

$$\Phi_b = F(V)_{min} + V_{min}/2 + kT/q \quad (4.23)$$

modifiye edilmiş Norde fonksiyonu [denklem (4.19)] kullanılarak ise seri direnç;

$$R_s = (kT/q)(\gamma - n)/I_{min} \quad (4.24)$$

olarak tanımlanır.

4.2.3. Kapasitans-Gerilim Karakteristikleri

Schottky diyotlarında uzay yükü bölgesinin kapasite, metal/yarıiletken ara yüzeylerin meydana gelmesi ile ilgili çok önemli bilgiler vermektedir. Kapasitenin ters beslem halinde gerilime bağlı değişimi nedeni ile doğrultucu kontağın engel yüksekliği, yarıiletkenlerde var olan taşıyıcı konsantrasyonu, difüzyon potansiyeli ve Fermi enerji seviyesi gibi parametreler hakkında bilgi sahibi olmamıza sağlamaktadır.(Wilmsen, 1985)

Schottky diyotlarının metal tarafında yer alan negatif yüklerle yarıiletken tarafında bulunan iyonize olmuş alıcıların meydana getirdiği tüketim bölgesinde kondansatör gibi davranış sergilediği tespit edilmiştir. Bahse konu olan yapıya ters beslem uygulandığı takdirde yapının engel bölgesi genişlemekte olup bölgede yük değişimlerinin meydana gelmektedir. Yaşanılan bu durum kapasitans değerlerinde değişim yaşanmasına sebep olmaktadır. Bu değişimleri kullanarak C-V ölçümlerinden elde edilen C^{-2} -V grafiğinin doğrusal kısmına fit yapılır. Bu doğrusal fitin eğiminden Denklem 3.17 ve 3.18 kullanılarak N_d hesaplanır.

n tipi yarıiletkende bulunan iletkenlik bandının elektron konsantrasyonu ise;

$$n_0 = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \quad (4.30)$$

ile verilmektedir (Neamen,1997). Bu ifadede, N_c termal denge durumunda iletkenlik bandında yer alan elektron konsantrasyonudur. Elektron konsantrasyonu;

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (4.31)$$

ile verilir. n-InP yarıiletkeni için oda sıcaklığında $m^*(=0.078m_0)$ etkin kütle değeri kullanılarak N_c değeri elde edilebilir. n_i asal elektron konsantrasyonu olarak n-tipi yarıiletken durumunda $N_d \gg n_i$ olacağı için $n_0 \cong N_d$ olur (Neamen,1997). Bu durumda denklem 4.30,

$$N_d = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \quad (4.32)$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklem 4.30'un her iki tarafının da logaritması alınarak iletkenlik bandı referans seviyesi $E_c=0$ kabul edilirse Fermi enerji seviyesi,

$$E_f = kT \ln\left(\frac{N_d}{N_c}\right) \quad (4.33)$$

elde edilir. Voltaj ekseninin kesme noktasıyla (V_o) difüzyon potansiyeli (V_d) arasındaki ilişki $V_d = V_o + \frac{kT}{q}$ kullanılarak engel yüksekliği

$$\Phi_b = V_d + V_n \quad (4.34)$$

elde edilir. Burada V_n referans noktası olarak alınan iletkenlik bandının tabanına göre fermi enerji seviyesidir.

4.2.4. Arayüzey Hallerinin Yoğunluğunu Belirleme

Schottky diyotlarında arayüzey hallerinin ortaya çıkmasının en önemli nedenlerinden birisi yüzeydeki periyodik örgü yapısında kesinti yaşanmasından kaynaklanmaktadır. (Nicollian, 1982). Eklem meydana gelmeden önceki bir yüzey durumudur. Kesintiye uğramış örgü kolayca bağ yapabilir. Bu da metal/yarıiletken Schottky diyotunun arayüzey kısmında belirli bir kalınlığa sahip arayüzey tabakasının oluşması anlamına gelmektedir. Meydana gelen bu tabaka, aygıtın temel parametrelerinin olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır. Kontakt meydana geldikten sonra oluşan yüzey durumları vardır ki bunlar yarıiletkenin yüzeyinde dağınık halde yer alan safsızlıklardır (S.M, 1981). Yarıiletkenin gövdesinin içerisinde ve yüzeyinde var olan kusurlar nedeni ile oluşan yüzey durumları mevcut bulunmaktadır. Arayüzey

hallerinin ortaya çıkmasının en önemli nedenlerinin bir diğeri de kimyasal reaksiyonların sebep olduğu yüzey durumlarıdır. Yarıiletken üzerine buharlaştırma yöntemi ile metal kaplandığı takdirde kimyasal bir reaksiyon oluşmaktadır. Bu reaksiyon neticesinde yeni bir bileşik yani arayüzey halleri meydana gelmiş olur (Coley, 1965)

Yarıiletken aygıtın arayüzey hal yoğunluklarını tespit etmek için bir takım metodlar mevcuttur. Var olan bu metotlardan akım-gerilim ölçümlerini kullanarak arayüzey hallerinin yoğunluğunu arayüzey hallerinin enerjisine göre belirlenebilir.

Card vd.(1971)'e göre arayüzey hallerinin yarıiletkenle dengede olduğu durumda kontağa uygulanan gerilime göre değişken idealite faktörü denklemi;

$$n(V) = 1 + \frac{\delta}{\varepsilon_i} \left(\frac{\varepsilon_i}{w} + eN_{SS} \right) \quad (4.35)$$

ile verilir. İdealite faktör denkleminin düzenlenmesi yapıldığı zaman ara yüzey yoğunluğu denklemi;

$$N_{SS}(V) = \frac{1}{e} \left[\frac{\varepsilon_i}{\delta} (n(V) - 1) - \frac{\varepsilon_i}{w} \right] \quad (4.36)$$

olur. Burada yer alan w deplasyon bölgesinin genişliği δ ara yüzeyin kalınlığını ifade etmektedir. N_{SS} ara yüzey yoğunluğunu, ε_i ara yüzey dielektrik sabitini ε_s ise yarıiletken dielektrik sabitini ifade etmektedir. Bununla beraber n-tipi yarıiletken için ara yüzey durumlarının enerjisini veren denklem;

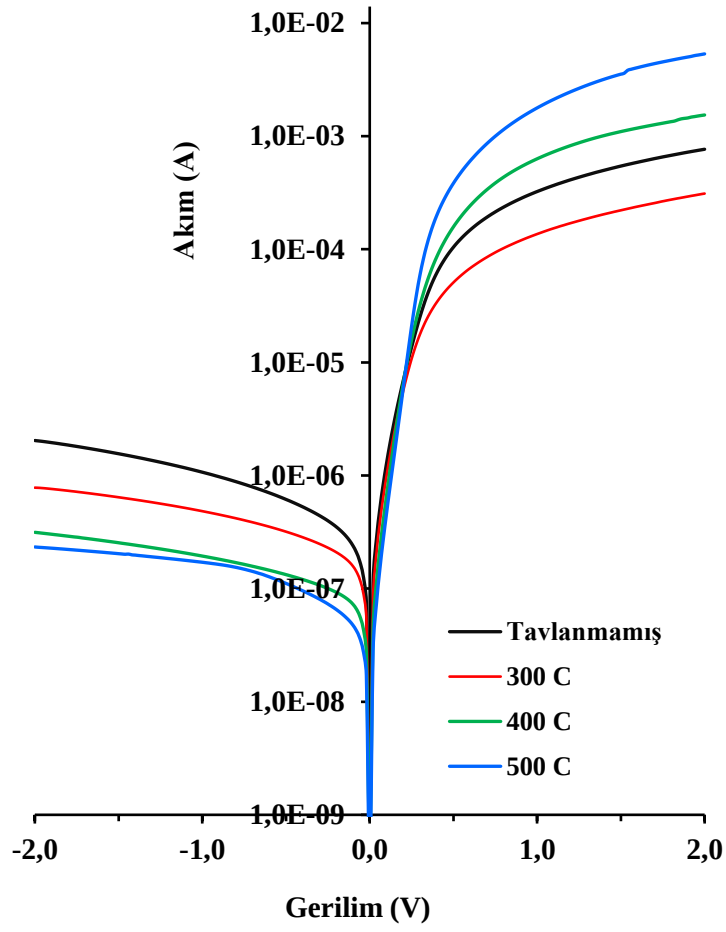
$$E_c - E_{SS} = e(\Phi_{bn} - V) \quad (4.37)$$

şeklindedir. Bu denklemde E_{SS} yarı iletkenin iletkenlik bandının tabanına göre arayüzey hallerinin enerji düzeyi, E_c iletkenlik bandının tabanının enerji düzeyi ve Φ_{bn} n-tipi yarıiletkene uygulanan gerilime göre etkin engel yüksekliğini ifade etmektedir.

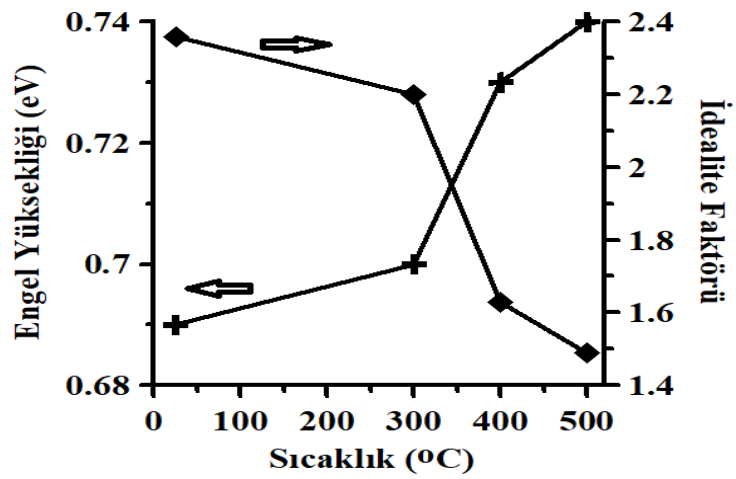
5. ARAŞTIRMA BULGULARI

5.1. Akım-Gerilim (I-V) Parametreleri

Mo/n-Si Schottky diyonu imal edildikten sonra referans olarak alınan tavlanmamış durumda ve 300°C, 400°C ve 500°C sıcaklıklarında tavlama işlemi gerçekleştirildikten sonra -2 ile +2 volt aralığında alınan akım-gerilim ölçümlerinden çizilen yarı-logaritmik doğru ve ters beslem akım-gerilim karakteristikleri Şekil 5.1’de verilmiştir. İdealite faktörü n , akım-gerilim grafiğinin doğru beslem bölgesinin lineer kısmının eğiminden bulunmaktadır. Bu lineer kısma fit yapılarak bulunan eğim değeri denklem (4.4)’te yerine yazılarak idealite faktörü (n) tavlanmamış durumda 2,36, tavlama sıcaklıkları 300°C, 400°C ve 500°C’de sırasıyla 2,20-1,63-1,49 olarak hesaplanmıştır. Doyma akımı I_0 ise; Şekil 5,1’den doğru beslem akım-gerilim karakteristiğinin lineer kısmının $V=0$ için akım eksenini kestiği noktadan tavlanmamış durumda $2,48 \times 10^{-7} \text{A}$, tavlama sıcaklıkları 300°C, 400°C ve 500°C’de sırasıyla $1,65 \times 10^{-7} \text{A}$ - $6,29 \times 10^{-8} \text{A}$ - $3,91 \times 10^{-8} \text{A}$ olarak bulunmuştur. Bulunan n ve I_0 değerleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Bölüm 4.2.2’de verilen (4.4) eşitliği kullanılarak engel yüksekliği (Φ) tavlanmamış durumda 0,69 eV, tavlama sıcaklıkları 300°C, 400°C ve 500°C’de, sırasıyla 0,70 eV – 0,73 eV – 0,74 eV olarak bulunmuştur.



Şekil 5.1. Mo/ n-Si Schottky kontağının yarı logaritmik ve ters beslem akım-gerilim (I-V) karakteristiği



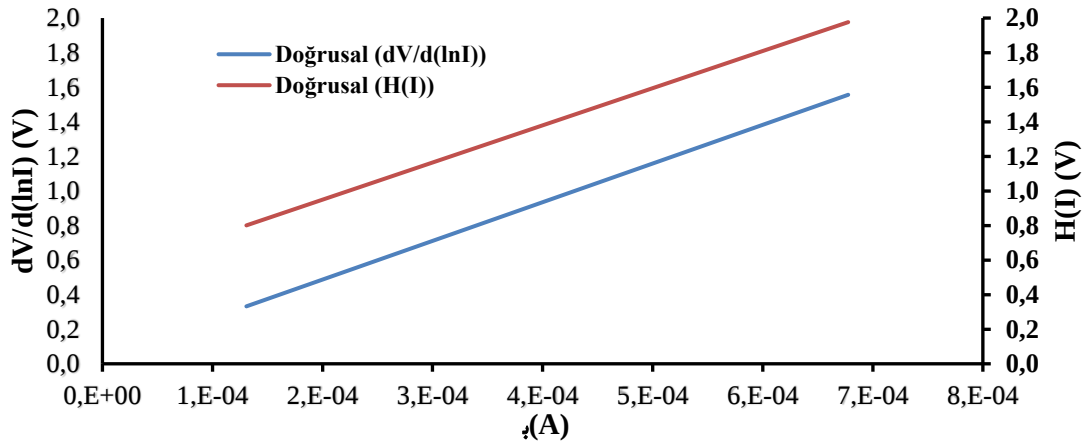
Şekil 5.2. Mo/n-Si için tavlama sıcaklığına karşı idealite faktörü ve tavlama sıcaklığına karşı engel yüksekliği grafiği

Çizelge 5.1. Mo/n-Si Schottky'nin I-V ölçümünden belirlenen n , I_0 ve Φ_b 'nin tavlama sıcaklığına bağlı değerleri

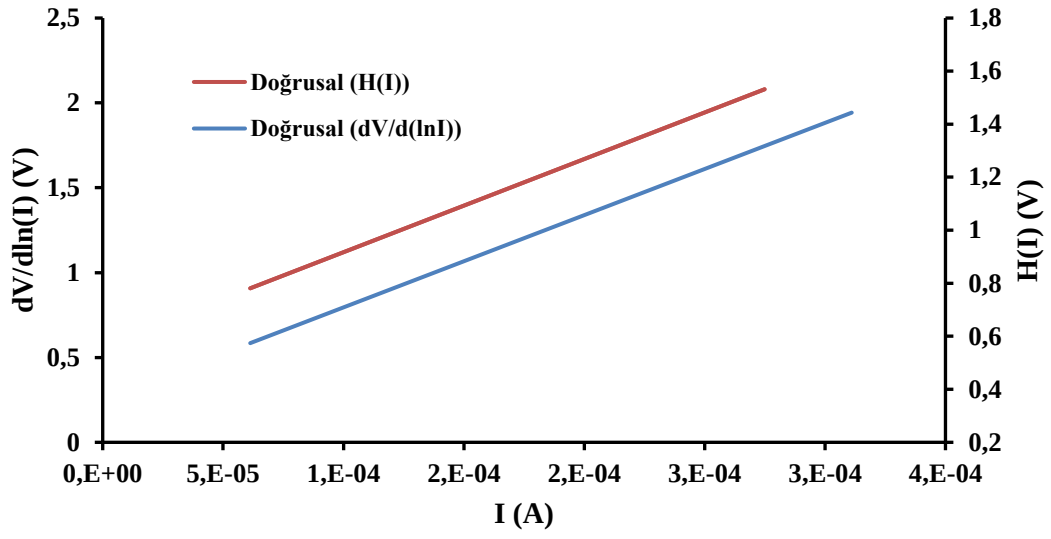
Numune (Mo/n-Si)	I_0 (A)	İdealite Faktörü (n)	Engel Yüksekliği Φ_b (eV)
Tavlanmamış	$2,48 \times 10^{-7}$	2,36	0,69
300°C	$1,65 \times 10^{-7}$	2,20	0,70
400°C	$6,29 \times 10^{-8}$	1,63	0,73
500°C	$3,91 \times 10^{-8}$	1,49	0,74

5.2. Cheung Fonksiyonlarından Elde Edilen Diyot Parametreleri

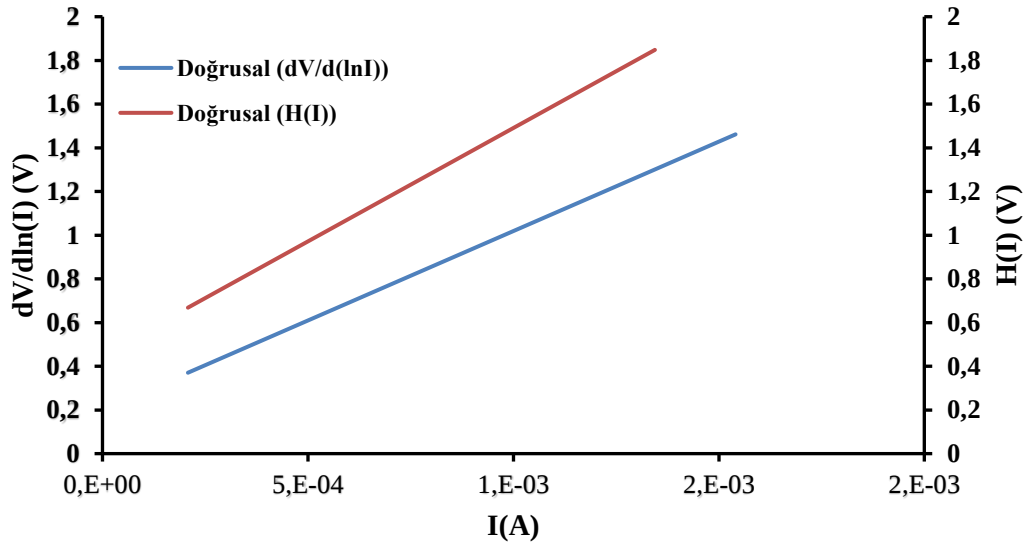
Kontak parametrelerinin Cheung fonksiyonları yardımıyla bulunması bölüm 4.2.3'te verilmişti. Cheung fonksiyonlarını Cheung fonksiyonlarını kullanarak diyot parametrelerini elde etmek için denklem (4.7) kullanarak $dV/d\ln I$ 'nin I 'ya göre grafiği sırası ile Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilmiştir. Mo/n-Si referans aldığımız numunemizi tavlanmamış hal, 300°C, 400°C ve 500°C tavlama sıcaklıklarında grafiklerin $I=0$ için $dV/d\ln I$ eksenini kestiği noktadan idealite faktörleri sırası ile 1,41 – 1,62 – 1,69 – 2,63 bulunurken aynı grafiğin eğiminden seri direnç değerleri ise sırası ile 2045Ω – 1231Ω – 923Ω – 330Ω bulunmuştur.



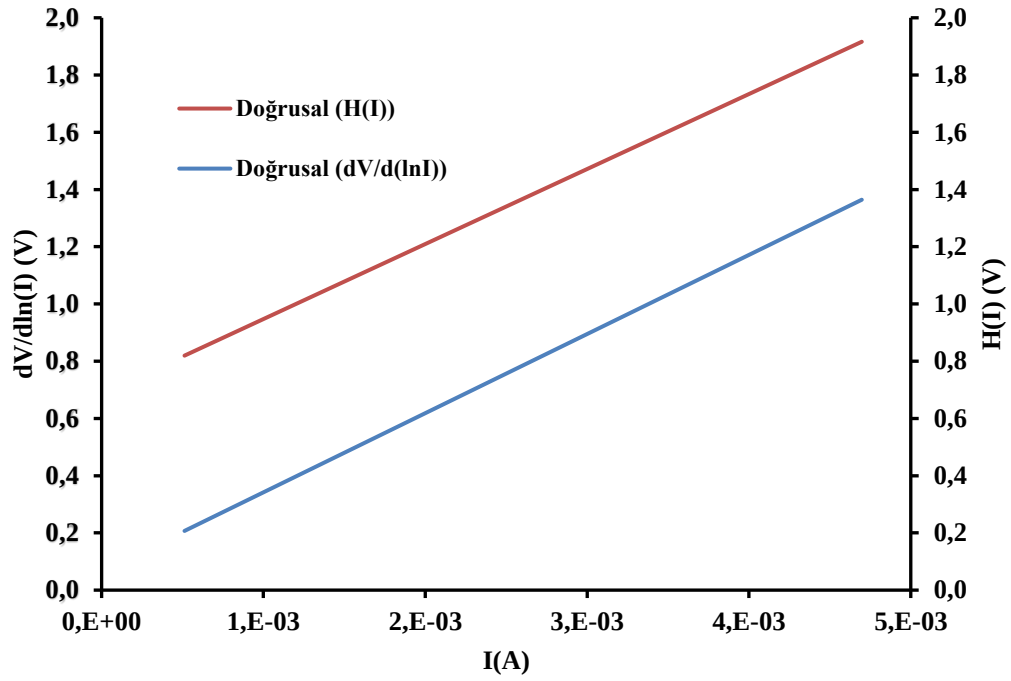
Şekil 5.3. Tavlanmamış Mo/n-Si Schottky diyota ait $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ -I grafiği çizilmiştir.



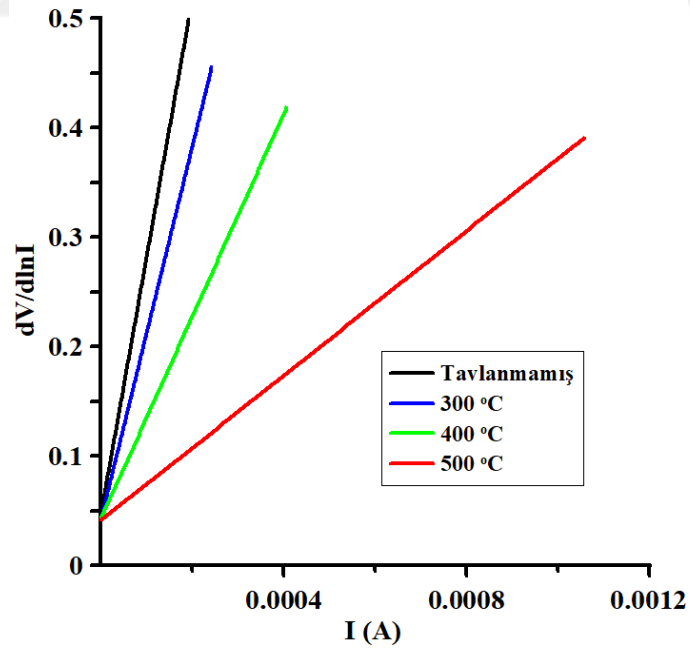
Şekil 5.4. 573 K Mo/n-Si Schottky diyota ait $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ -I grafiği çizilmiştir.



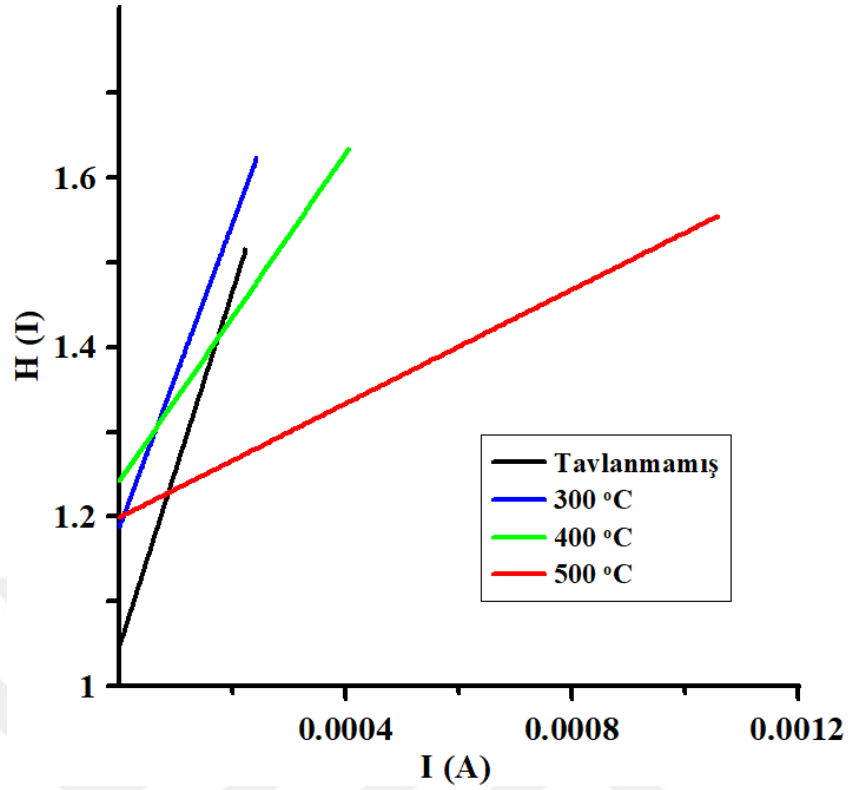
Şekil 5.5. 673 K Mo/n-Si Schottky diyota ait $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ -I grafiği çizilmiştir.



Şekil 5.6. 773 K Mo/n-Si Schottky diyota ait $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ -I grafiği çizilmiştir



Şekil 5.7. Mo/n-Si Schottky diyota ait $dV/d\ln(I)$ -I grafiği



Şekil 5.8. Mo/n-Si Schottky diyota ait H(I)-I grafiği

Cheung fonksiyonlarından olan $H(I)$ 'nın I 'ya göre grafikleri yine sırası ile Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da yer almaktadır. Mo/n-Si Schottky diyonu için grafiklerin $I=0$ için $H(I)$ eksenini kestiği noktadan daha önce bulduğumuz n değerini kullanarak Φ_b değerleri sırası ile 0,73 eV – 0,76 eV – 0,67 eV ve 0,64 eV olarak bulunmuştur.

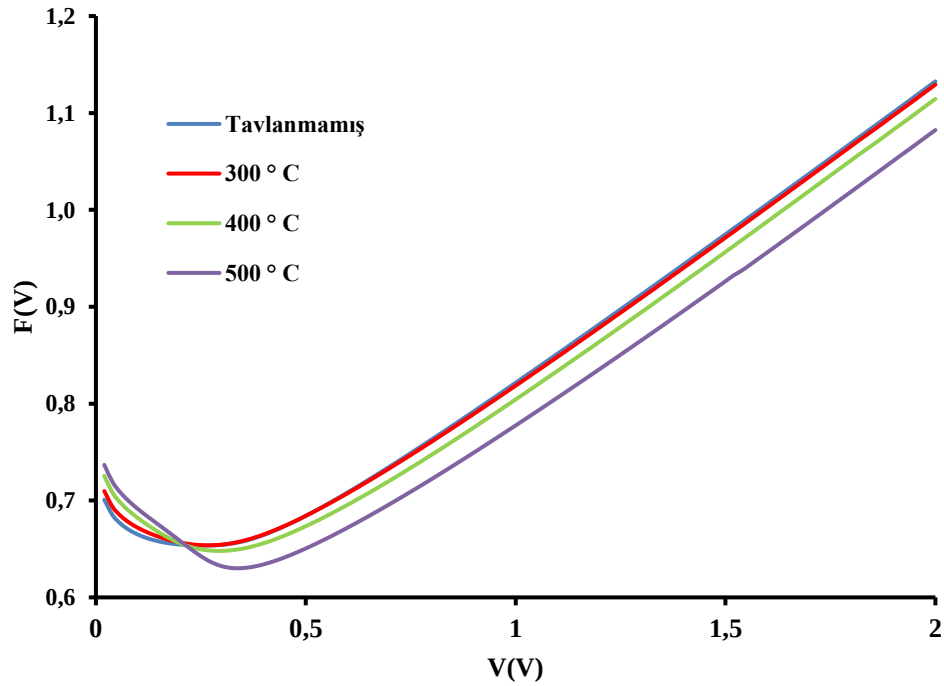
Cheung fonksiyonlarından bulunan tüm değerler seri direncin etkili olduğu I-V karakteristiğindeki lineer olmayan kısmında yer alan verilerden yararlanılarak elde edilmiştir.

Çizelge 5.2. Mo/n-Si için tavlama sıcaklığına karşı idealite faktörü, tavlama sıcaklığına, engel yüksekliği ve direnç değeri çizelgesi

Sıcaklık(K)	n	$\frac{dV}{d \ln I}$ $R_s (\Omega)$	$\frac{H(I)}{R_s (\Omega)}$	Φ_b (eV)
Tavlanmamış	1,58	1986	1937	0,73
300°C	1,15	5334	5439	0,76
400°C	2,47	846	850	0,67
500°C	2,70	300	304	0,64

5.3. Norde Fonksiyonlarından Elde Edilen Parametreler

Yüksek seri direnç ve idealite faktörü oluşan Schottky diyotlarında Bohlin tarafından seri direnç ve engel yüksekliği gibi parametrelerin belirlenebilmesi amacıyla fonksiyonel olarak denklem (4.10)'da ifade edilmiştir. $n < \gamma$ keyfi bir değer $F(V)$ - V grafiğimizde seri dirençten dolayı $dF(V)/dV=0$ şartını saylayan minimum $F(V)$ değerini geçtiği görülmektedir. Bu noktaya gelen gerilimi, akım verileri ve I - V grafiğinden eğiminden elde etmiş olduğumuz denklem (4.15), (4.16) ve (4.17) eşitliklerinden yararlanarak seri direnç ve engel yüksekliğini verileri Çizelge 5.3 ve grafiğimiz Şekil 5.6'da görülmektedir.



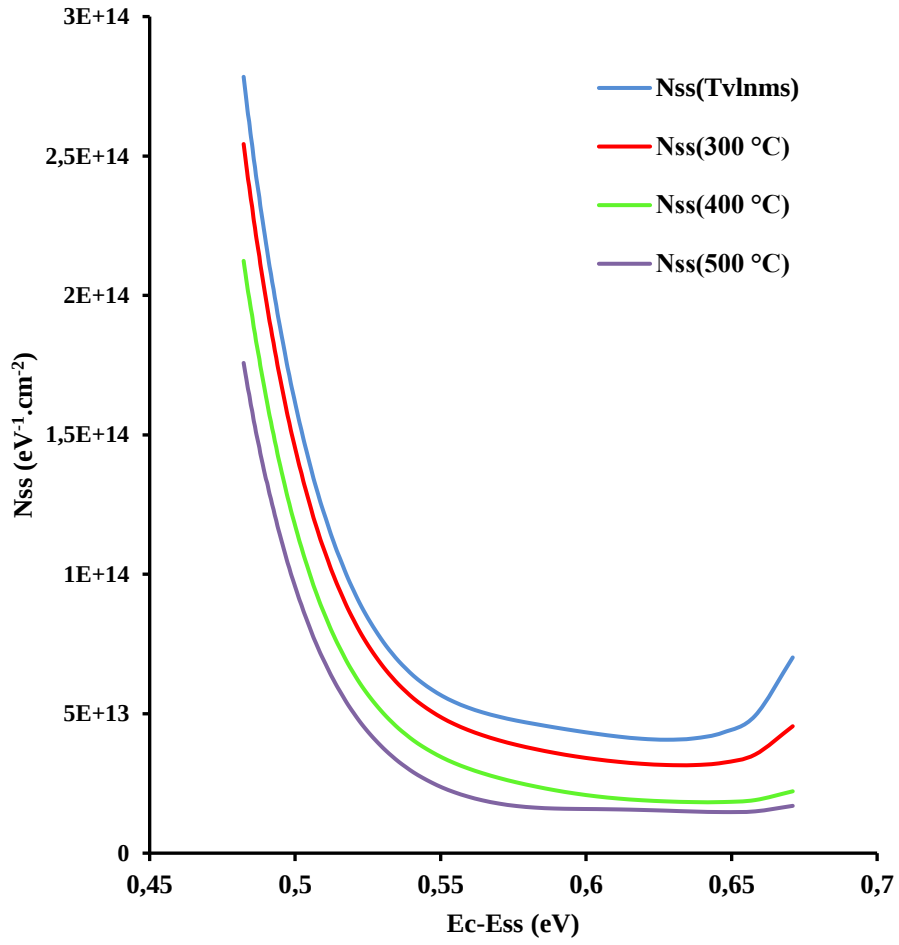
Şekil 5.9. Mo/n-Si Schottky diyotunun tavlama yapılmamış ve farklı sıcaklıklarda tavlama yapılmış durumları için $F(V)$ - V eğim grafiği

Çizelge 5.3. Mo/n-Si Schottky diyotunun Norde yöntemi ile seri direnç değeri ve engel yüksekliği verileri

Numune	F(V _{min}) (V)	V _{min} (V)	I _{min} (A)	n	α	α/β	R _s (Ω)	Φ_e (eV)
Tavlanmamış	0,65	0,26	$1,55 \times 10^{-5}$	2,34	3	$7,76 \times 10^{-2}$	1068,4	0,67
300°C	0,66	0,24	$9,53 \times 10^{-6}$	2,25	3	$7,76 \times 10^{-2}$	2036,3	0,68
400°C	0,65	0,30	$3,21 \times 10^{-5}$	1,63	3	$7,76 \times 10^{-2}$	1096,3	0,70
500°C	0,63	0,34	$1,08 \times 10^{-4}$	1,55	3	$7,76 \times 10^{-2}$	348,8	0,71

5.4. Arayüz Hal Yoğunluğu Dağılımının Belirlenmesi

MS kontak yapıların elektronik özellikleri arayüzey tabakası sebebi ile etkilenir. Nss ile verilen arayüzey hal yoğunluğunun dağılımını belirlemek gerekmektedir. Mo/n-Si Schottky diyotunun tavlanmamış ve farklı sıcaklıklarda tavlanmış durumları için denklem (4.36) kullanılarak arayüzey yoğunlukları Nss, (Ec-Ess)'nin bir fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Arayüzey hallerinin, arayüzey hallerinin enerjisine göre çizilen grafik Şekil 5.10'da gösterilmiştir.

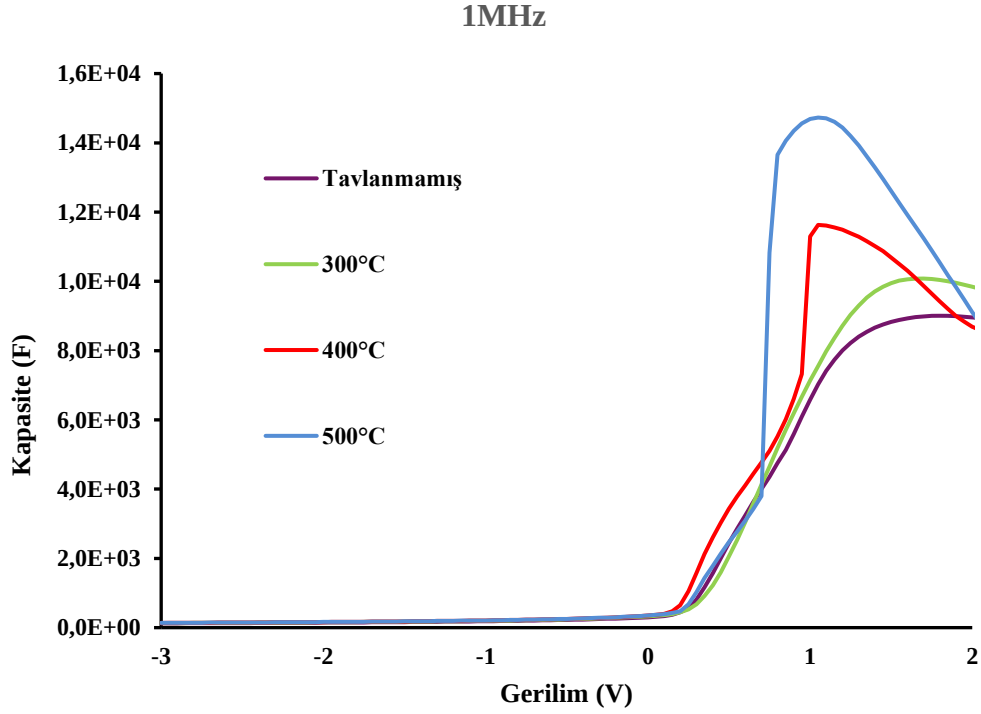


Şekil 5.10. Mo/n-Si Schottky diyotunun tavlınmamış ve farklı sıcaklıklarda tavlınmış durumları için arayüzey hallerinin arayüzey hallerinin enerjisine göre değişim grafiği

Şekilden görüleceği gibi arayüzey hal yoğunluğu, diyodun tavlınmamış halinde ($E_c - 0.66$ eV) enerjisinde $3,54 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ değerinden ($E_c - 0.47$ eV) enerjisindeki $2,54 \times 10^{14} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ değerine, üstel bir şekilde artmıştır. Tavlama sıcaklıkları 300°C, 400°C ve 500°C’de sırasıyla ($E_c - 0.66$ eV) enerjisinde $4,93 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ değerinden ($E_c - 0.48$ eV) enerjisindeki $2,78 \times 10^{14} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ değerine, ($E_c - 0.66$ eV) enerjisinde $1,83 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ değerinden ($E_c - 0.47$ eV) enerjisindeki $2,12 \times 10^{14} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ değerine ve ($E_c - 0.66$ eV) enerjisinde $1,49 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ değerinden ($E_c - 0.43$ eV) enerjisindeki $1,76 \times 10^{14} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ değerine aynı şekilde üstel olarak artmıştır.

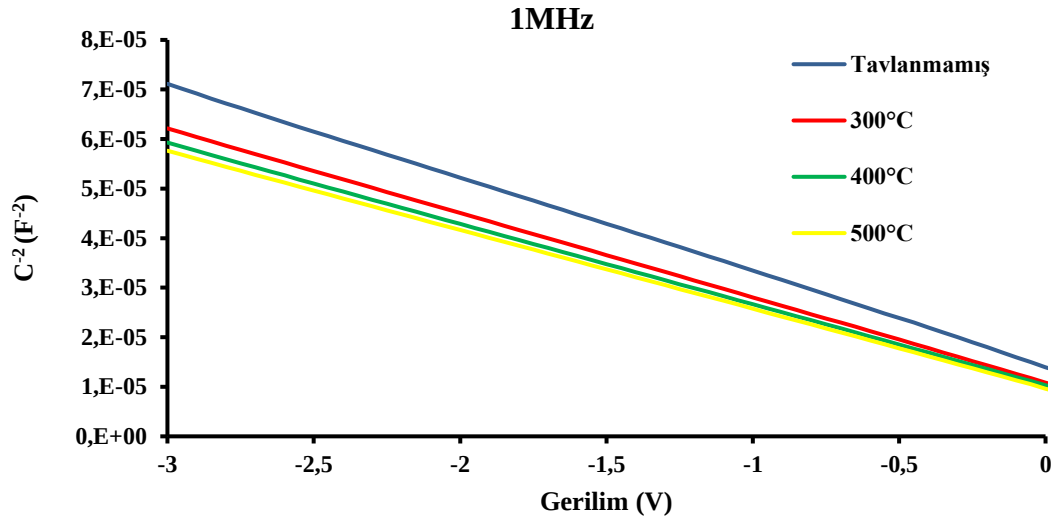
5.5. Kapasite-Gerilim Ölçümlerinden Elde Edilen Diyot Parametreleri

Mo/n-Si Schottky kontağımızın C-V ölçümleri -3 ve +3 Volt gerilimleri arasında, tavlannmamış 300°C, 400°C ve 500°C sıcaklıklarında tavlannmış numunemizin 1MHz frekansta için Kapasite-Gerilim grafiğı Şekil 5.11'deki gibidir.



Şekil 5.11. 1MHz frakansta Mo/n-Si Schottky diyotu için farklı tavlama sıcaklıklarında kapasite-gerilim (C-V) grafiğı

Kontağın kapasite-gerilim grafiğinde tavlannmamış, 300°C, 400°C ve 500°C'de sıcaklıklarda tavlannmış olduğumuz numunemizin tepe noktaları görölmektedir. Tepe noktalarının görölməsi bize belirli bir gerilim değeri ne kadar artış olduğunu ve tepe noktasından sonra artan gerilim ile birlikte kapasitenin ise azaldığını ifade etmektedir.



Şekil 5.12. 1MHz Mo/n-Si Schottky diyotu için farklı tavlama sıcaklıklarında ters beslem C^2 -V grafiği

Hesaplamalar yapılırken daha kullanışlı olduğu için C-V grafiği yerine tercihen C^2 -V grafiği kullanılmaktadır. 10 kHz frekansta C^2 -V grafiğinden elde ettiğimiz veriler Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4. 1 MHz C^2 -V karakteristiklerinden elde edilen diyot parametreleri

F (1 MHz)	V_d(eV)	N_D (eV)	E_f (eV)	Φ (eV)	$W(V=0)$ cm
Tavlanmamış	0,79	2,52	0,18	0,97	2,03E-05
300°C	0,67	2,78	0,18	0,85	1,77E-05
400°C	0,66	2,91	0,18	0,84	1,72E-05
500°C	0,63	2,97	0,18	0,82	1,68E-05

6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada, Mo/*n*-Si Schottky diyot imal edildikten sonra akım-voltaj (*I*-*V*) ve kapasite-voltaj (*C*-*V*) karakteristikleri üzerinde ısıtılma işlemin etkisini görebilmek amacıyla 300°C, 400°C ve 500°C sıcaklıklarında termal tavlama işlemine tabi tutulmuştur. Diyot imalatında yarıiletken olarak [100] doğrultusunda büyütülmüş, 380 mm kalınlığında Fosfor (P) katkılı *n*-tipi Si dilimi kullanılmıştır. Bu *n*-Si yarıiletkeninin arka yüzüne metal olarak altın (Au) buharlaştırılarak omik kontak, ön yüzüne ise yine metal olarak Molibden (Mo) buharlaştırılarak 1 mm çaplı doğrultucu kontaklar ($A = 0,00785 \text{ cm}^2$) oluşturulmuş ve Mo/*n*-Si Schottky diyonu elde edilmiştir. Oda sıcaklığında diyot imal edildikten sonra herhangi bir tavlama işlemi uygulanmadan *I*-*V* ve *C*-*V* ölçümleri alınmış, daha sonra bu çalışmanın konusu olan tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Diyot 300°C, 400°C ve 500°C sıcaklıklarda Azot gazı (N₂) ortamında 5 dakika süreyle tavlama işlemine tabi tutulmuştur. Her tavlama sonrası diyotun oda sıcaklığında (-2V-2V) aralığında *I*-*V* ölçümleri ve (-3V-3V) aralığında 10KHz ve 1 MHz frekanslarında *C*-*V* ölçümleri alınmıştır. $\ln I$ -*V* karakteristiğinden diyonun her bir sıcaklık değeri için elektriksel parametrelerinden idealite faktörleri, engel yükseklikleri ve seri dirençleri farklı metotlarla hesaplanmıştır. Arayüzey hallerinin yoğunluğunun dağılımının enerjiye bağlı değişimi *I*-*V* verileri kullanılarak hesaplanmış ve çizilmiştir. *C*-*V* karakteristiğinden de C^{-2}/V grafiği çizilerek diyot parametreleri belirlenmiştir. Farklı karakteristiklerden farklı tekniklerle hesaplanan diyot parametrelerinden yola çıkılarak tavlamanın Mo/*n*-Si Schottky diyot üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Termiyonik emisyon teorisine göre *I*-*V* ölçümlerinden diyot parametrelerinin belirlenmesi için 4.2 eşitliği kullanıldı. Mo/*n*-Si Schottky diyonunun yarı-logaritmik doğru beslem ve ters beslem *I*-*V* karakteristiklerinin verildiği Şekil 4.1'den deneysel *n* ve Φ_b değerleri her bir sıcaklık için doğru beslem $\ln I$ -*V* grafiğinin lineer kısmına yapılan fitin, eğimi ve düşey eksen kestiği nokta kullanılarak hesaplandı. Mo/*n*-Si Schottky diyot için *n* ve Φ_b değerleri, tavlınmamış halde 2,36 ve 0,69 eV iken, 300°C, 400°C ve 500°C sıcaklıklarda tavlınmış durumda, sırasıyla, 2,20 ve 0,70 eV, 1,63 ve 0,73 eV ve 1,49 ve 0,74 eV olarak bulundu. Tavlınmamış durumda diyonun

idealite faktörünün yüksek değerinden Si yarıiletkeni ile Mo metali arasında doğal oksit tabakası oluştuğu anlaşılmaktadır. Mo/n-Si yapı metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapıya dönüşmüştür. İdealite faktörü diyotun ne kadar ideal olduğunun göstergesidir. Değer 1,1'den küçükse ideal diyot olarak kabul edilir. İdeal diyotta akım termoiyonik emisyon akım teorisine uyar ve uygulanan gerilim tüketim bölgesinde düşer (Norde 1979). İdealite faktörünün yüksek değerlerine özellikle omik kontak yapımından sonra istenmeden oluşan MS arayüzeydeki yalıtkan oksit tabakanın varlığı ve yasak enerji aralığındaki kusurların varlığı, engel yüksekliğinin homojen olmayışı, homojen olmayan engelin uygulanan voltaja bağlı olması sebep olabilmektedir. Tavlama sıcaklığının artmasıyla diyotun idealite faktörünün azalması yani 1'e yaklaşması kontak homojenliğinin geliştiğinin bir göstergesi olduğu söylenebilir. Engel yüksekliğinin 0,69 değeri Aboelfotoh(1989)'in Ti/n-Si ve Nuhoğlu (2010)'nun Au/n-Si engel yükseklikleri değerinden büyüktür. Bu tabii oksit tabakasından dolayı yarıiletkenin bant aralığında fermi seviyenin mihlanmasına yol açan arayüzey hallerinin artmasından kaynaklanabilir. Yeterince kalın bir tabii oksit tabakasından dolayı arayüzey halleri yarıiletkenle dengededir ve metalle etkileşimde bulunmaz. (Rhoderick, 1988) Şekil 5.2 ve Çizelge 5.1'de görüleceği gibi tavlama sıcaklığı ile engel yüksekliğinin arttığını görmekteyiz. Engel yüksekliğinin tavlama sıcaklığı ile artması, tavlama sıcaklığı ile fermi seviyenin mihlanmasına yol açan arayüzey halleri ve kusurların etkinleşmesine ve doğal oksit tabakasının pasivasyon etkisini azaltmasına yada kaldırmasına atfedilebilir (Nuhoğlu vd. 2000, Ayyıldız vd. 1999). Dolayısıyla termal tavlama sonucu MS kontakların performansında bir iyileşme ve termal kararlılık oluştuğu görülmektedir. Tavlama işlemi bir metal-yarıiletken yapıyı termal dengeye getirme eğilimindedir ve daha kararlı bir yapı oluşturur (Cimilli 2009, Brillson vd. 1982), Ayyıldız vd.1999, Nuhoğlu vd. 1998).

Mo/n-Si yapı için doğru beslem I-V karakteristiğinin doğrusal bölgesinde arayüzey hallerinin etkisi vardır ve artan uygulama voltajı ile doğrusallıktan sapma sebebi seri dirençtir. Bu sebeple Mo/n-Si diyot için idealite faktörü, seri direnç ve engel yüksekliği parametreleri Cheung ve Norde fonksiyonlarından ayrı ayrı hesaplandı. Cheung fonksiyonlarının $dV/d(\ln I)$ -I ve $H(I)$ -I grafiklerini kullanarak seri direnç, idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerinin yer aldığı Çizelge 5.2'de görüldüğü gibi seri

direnç tavlammamış Mo/n-Si için 1986 Ω , 300°C, 400°C ve 500°C sıcaklıklarında tavlammış durumda sırasıyla 5334 Ω , 846,3 Ω ve 122,7 Ω olarak bulunmuştur. Norde fonksiyonlarından hesaplanan R_s ve Φ_b değerlerinin yer aldığı Çizelge 5.3 görüldüğü gibi seri direnç değeri tavlammamış Mo/n-Si için 1068,4 Ω , 300°C, 400°C ve 500°C sıcaklıklarında tavlammış durumda sırasıyla 2036,3 Ω , 290,2 Ω ve 108,3 Ω olarak bulunmuştur. Seri dirençin yüksek değerlerine arka yüze yapılan omik kontakın kaliteli olmamasından ve yarıiletken ile Schottky kontak metali arasındaki istenmeden oluşan tabii oksit tabakasının varlığından kaynaklanmaktadır. Norde fonksiyonlarından bulunan engel yüksekliği değerleri hemen hemen 0,67 eV civarında sabit kalmıştır. (Rhoderick, 1988), (Sze, 1981).

Tavlama etkisi ile seri direncin azalması ise arayüzeyde istenmeden oluşan oksit tabakasının ve istenmeyen safsızlıkların indirgenmesi sonucu diyot kararlılığı üzerinde olumlu bir etki meydana getirmesinden kaynaklanmaktadır (Chattopadhyay and Raychaudhuri 1992). Cheung fonksiyonları ile hesaplanan n ve Φ_b değerleri, I-V yöntemi ile bulunanlardan farklı çıkmıştır. Bunun sebebi her iki yöntemin doğru beslem I-V ölçümlerinin farklı bölgelerini dikkate almalarıdır. I-V metodu doğru beslem bölgesinin düşük voltaja karşılık gelen lineer bölgesini kullanırken Cheung fonksiyonları yüksek voltaj kısmı olan lineer bölgenin bozulduğu bükülmüş bölgeden hesaplanmaktadır. Bu bölgelerde arayüzey hallerinin ve seri direncin etkisi mevcuttur. Ayrıca Cheung ve Norde fonksiyonlarından elde edilen seri direnç değerleri farklıdır. Çünkü Cheung fonksiyonu doğru beslem I-V karakteristiğinde uygulanan yüksek voltajın bükülme bölgesindeki verileri, Norde fonksiyonu ise bütün verileri kullanmaktadır. Norde fonksiyonundan bulunan engel yüksekliği değerleri I-V metodu ile bulunan engel yükseklikleri değerleri ile hemen hemen uyum içindedir.

Mo/n-Si diyodun ters beslem C-V ölçümlerinden yararlanarak çizilen $1/C^2$ -V karakteristiğinden diyodun difüzyon potansiyeli, donör konsantrasyonu, Fermi enerjisi hesaplanarak engel yüksekliği bulundu. Tavlammamış ve 300°C, 400°C ve 500°C'de tavlammış Mo/n-Si Schottky diyodunun bu hesaplamalarının yer aldığı Çizelge 5.4'te görülebileceği gibi bulunan engel yükseklikleri I-V grafiklerinden elde edilen engel yükseklikleri ile karşılaştırıldığında C-V değişimlerinden bulunan engel

yüksekliklerinin daha büyük olduğu görülmektedir. Yukarıda bahsettiğimiz gibi diyot imal edilirken istenmeden oluşan arayüzey tabakası, engelin homojen olmaması ve yarıiletkendeki tuzak seviyelerine atfedilebilir [(Özdemir vd 2003), Rhoderick vd. 1988)]. Akım ve kapasite değerleri homojen olmayan bir arayüzey için engel yüksekliğindeki ve bant bükülmesindeki lokal bölgeler için farklı engel yükseklikleri ortaya çıkarır (Sullivan 1991), (Brillson 1982). Çünkü her iki teknik farklı yöntemlerle ölçüm yapmaktadır. I-V ölçümlerinde engel yüksekliği akım akışı için bir aktivasyon potansiyelini ifade eder. C-V ölçümleri ise empedans ölçümlerine dayanır ve kapasite uygulama geriliminin bir fonksiyonu olarak belirlenir. Homojen engele sahip bir diyotta kapasite tükenim bölgesinin genişliği ile orantılıdır. Eğer engel homojen olursa her iki ölçümden elde edilen sonuçlar birbiriyle tutarlı olurdu. Lakin bu diyotta engelin homojen olmaması I-V ve C-V ölçümleri sonucu elde edilen parametrelerin farklı olmasına sebep olmaktadır (Özdemir vd 200), (Rhoderick et al. 1988).

Ara yüzey hallerinin yoğunluk dağılımları Şekil 5.10'den görülebileceği gibi tavlama sıcaklıkları arttıkça azalmıştır. Arayüzey hallerinin yoğunluğu yasak bandın ortasından iletkenlik bandına doğru üstel bir şekilde artmıştır.

Sonuç olarak çalışmamızın konusu olan Mo/n-Si Schottky diyodunun imalatı aşamasında kimyasal işlemler ile metal buharlaştırma işlemleri sırasında metaller ile yarıiletken arasında istenmeyen doğal oksitlenmeye maruz kaldığı fakat yapılan termal tavlama işlemi ile diyot parametrelerinin nispeten düzeldiği görülmektedir. Termal tavlama ile özellikle 500°C'de daha kararlı bir yapı elde edilmiştir. Bu çalışmaya konu olan Mo/n-Si diyodunun termal tavlama yanında sıcaklığa bağlı ölçümlerinde alınması ve analiz edilmesi yapının çalışma prensibini ve uygulama alanını daha net belirleyecektir.

KAYNAKLAR

- A. Akkaya, L. Esmer, B. Boyarbay Kantar, H. Cetin, E. Ayyıldız, Effect of thermal annealing on electrical and structural properties of Ni/Au/n-GaN Schottky contacts, *Microelectronic Engineering* 130 (2014) 62–68
- Asıl Uğurlu, H., Çınar Demir, K., & Coşkun, C. (2021). The effect of thermal annealing on Ti/p-Si Schottky diodes. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(11), 15343-15351.
- Bethe, H.A., 1942. Theory of the Boundary Layer of Crystal Rectifiers. MIT. Radiation Lab. Rep. 43, 12.
- Bohlin K. E. Generalized Norde Plot Including Determination of the Ideality Factor, *Journal of Applied Physics* - 1986. - Cilt 60.
- Boltovets NS vd. Echnological aspects of manufacturing planar microwave diodes with Au-Ti(ZrB/sub x/)-n-n/sup +/- 4HSiC schottky barrier - 3. Uluslararası Kırım Konferansı Mikrodalga ve Telekomünikasyon Teknolojisi, 2003. - Cilt 562-563.
- Brillson Leonard. Proceedings of the Topical Conference on Frontiers in Electronic Materials, American Institute of Physics, 1986; Contacts to Semiconductors: Fundamentals and Technology, Noyes Press, 1993.
- C. R. Crowell S. M. Sze. Current transport in metal-semiconductor barriers *Solid State Electronics*, 1966. - 11-12: Cilt 9.
- Card, H. C., Rhoderick, E. H., Studies of Tunnel MOS Diodes II. Thermal Equilibrium Considerations, *J. Phys. D:Appl. Phys.*, 4, 1602-1611, 1971.
- Card H. C. Aluminum-Silicon Schottky Barriers and Ohmic Contacts in Integrated Circuits *IEEE Trans. On Electron Devices*, 1976. - 538-544: Cilt 23.
- Card H. C., Rhoderick, E. H.. - Studies of Tunnel MOS Diodes I Interface Effects In Silicon Schottky Diodes *Journal of Physics - Applied Physics*, 1971. - 1589-1601: Cilt 4.
- Castagne R., Vapaille, A. Description of the SiO₂-Si Interface Properties by Means of Very Low Frequency MOS Capacitance Measurements *Surface Science*, 1971. - 157: Cilt 28.
- Chandra, M.M. And Prasad, M., *J.Phys. State Solid.(A)* 77, (1983)
- Chattopadhyay, P., Raychaudhuri, B., 1992. Origin of The Anomalous Peak in The Forward C-V Plot of a Schottky Barrier diode, *Solid-State Electron.*, 35(6): 875-878.

- Cheung, S. K., Cheung, N. W., Extraction of Schottky Diode Parameters from Forward Current-Voltage Characteristics, J. Appl. Phys. Let., 49, 85-87, 1986.
- Chang, S., Raisanen, A., Brillson, L.J., Inhomogeneous and Wide Range of Barrier Heights at Metal/Molecular Beam Epitaxy GaAs(100) Interfaces Observed With Electrical Measurements, J. Vac. Sci. Techno. B, 10(4), 1932-1939, 1992.
- Çiğdem Nuhuğlu, Yasir Gülen, The effect of high temperature annealing on Schottky diode characteristics of Au/n-Si contacts, Vacuum 84 (2010) 812-816.
- Cimilli F.E (2009). Ag/n-InP/In, Au/n-InP/In ve Cd/n-InP/In Schottky diyotların akım-voltaj ve kapasite-voltaj ölçümlerinden elde edilen karakteristik parametreler üzerine numune sıcaklığının ve termal tavlamanın etkileri (Doctoral dissertation, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum,).
- Cowley, A.M., Sze, S.M., Surface States and Barrier Height of Metal Semiconductor Systems, J. Appl. Phys. 36, 3212-3220, 1965.
- C. R. Crowell S. M. Sze S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices.. - New York: John Wiley&Sons, 1981. - Cilt 2.
- Çaldıran, Z., Deniz, A.R., Aydoğan, Ş., Ekinci, D. and Yeşildağ, A., 2013. The barrier height enhancement of the Au/n-Si/Al Schottky barrier diode by electrochemically formed an organic Anthracene layer on n-Si. Superlattices and Microstructures 56, 45-54.
- Çiğdem Nuhuğlu, Enise Ayyıldız, Mustafa Sağlam, Abdülmecit Türüt, Thermal treatment of the MIS and intimate Niri-LEC GaAs Schottky barrier diodes, Applied Surface Science 135 _1998. 350-356
- D. Subba Reddy1 Matli Bhaskar Reddy2, N. Nanda Kumar Reddy1, Varra Rajagopal Reddy.- Schottky Barrier Parameters of Pd/Ti Contacts on N-Type InP Revealed from I-V-T And C-V-T Measurement - Department of Physics, Sri Venkateswara University, Tirupati, Indi: Journal of Modern Physics, 2011. - 113: Cilt 2.
- Duman, S., Dogan, S., Gürbulak, B., & Türüt, Abdülmecit (2008). The barrier-height inhomogeneity in identically prepared Ni/n-type 6H-SiC Schottky diodes. Applied Physics A, 91(2), 337-340.
- E. Ayyıldız, A. Türüt, S. Tüzemen, Thermal stability of NiTi alloy contacts on n-type liquid encapsulated Czochralski GaAs, Solid State Communications 110 (1999) 419-423.

- Ejderha, K., Orak, I., Duman, S., & Turut, A. (2018). The effect of thermal annealing and measurement temperature on interface state density distribution and time constant in Ni/n-GaP rectifying contacts. *Journal of Electronic Materials*, 47(7), 3502-3509.
- Enise Ayyıldız, Abdulmecit Türüt, The effect of thermal treatment on the characteristic parameters of Ni/-, Ti/- and NiTi alloy/n-GaAs Schottky diodes, *Solid-State Electronics* 43 (1999) 521±527.
- E. Ayyıldız, B. Batı, C. Temirci, A. Türüt, Dependence of thermal annealing on the density distribution of interface states in Tirn-GaAs_Te/ Schottky diodes, *Applied Surface Science* 152 _1999. 57–62.
- Farooq AAM FaragaB. GündüzB. Fahrettin Yakuphanoglu c.dWA Al/p-Si Schottky diyotun elektriksel özelliklerinin tris(8-hidroksikinolinato) alüminyum organik film ile kontrolü - Elsevier, 2010. - 23-24: Cilt 160.
- GY Robinson III-V Yarıiletkenler için Schottky Diyotları ve Ohmik Kontaklar. Wilmsen CW III-V Bileşik Yarı İletken Arayüzlerinin Fiziği ve Kimyası - Boston Springer, Boston, MA, 1985. - 978-1-4684-4837-5
- H.C.Cheng C.Y.Wu J.J.Shy. GaAs substratları üzerinde kobalt-alüminyum alaşımı Schottky kontaklarının mükemmel termal kararlılığı - Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ulusal Chiao-Tung Üniversitesi, Hsinchu, Tayvan, Çin Cumhuriyeti - 1990. - 7: Cilt 33.
- Hill W.A. Coleman, C.C.A single-frequency approximation for interface-state density determination, *Solid-State Electronics*-1980. - 987: Cilt 23.
- İ. Orak, K. Ejderha, E. Sönmez, M. Alanyalıoğlu, A. Turut, The effect of annealing temperature on the electrical characterization of Co/n type GaP Schottky diode, *Materials Research Bulletin*, Volume 61, 2015, Pages 463-468.
- John Wiley & Sons New Jersey. - Physics of Semiconductor Devices 3rd ed [Dergi] / yaz. Sze S.M., K. Ng Kwok. - Wiley & Sons, New Jersey, 2007. - 362-390.
- Jong-Hoon Shin, Jinhong Park, SeungYup Jang, T. Jang ve Kyu Sang Kim. AlGaIn/GaN Schottky diyotta metal kaynaklı homojen olmayan Schottky bariyer yüksekliği Uygulama Fizik Lett, 2013. - 243505: Cilt 102.
- Kin Man Yu SK Cheung, T. Sands, JM Jaklevic, NW Cheung ve EE Haller.-Yüksek sıcaklıkta tavlama sonrasında W/GaAs sisteminin Schottky bariyer bozulması - AIP Uygulamalı Fizik Dergisi, 1986. - 9: Cilt 60.
- Kowalczyk S., Waldrop, J. and Grant, R - Reactivity and interface chemistry - Appl. Phys. Lett., 1981. - 167-169: Cilt 38.

- Kumar S. Arulkumaran J. Arokiaraj N. Dharmarasu J -Etkili bariyer yüksekliğinin arttırılması üzerine Schottky bariyer diyotları - Kristal Büyüme Merkezi, Anna Üniversitesi, Madras-600 025, Hindistan - 1996. - 4: Cilt 119.
- Li, Baojun, et al. "Properties of Schottky contact of titanium on low doped p-type SiGeC alloy by rapid thermal annealing." *Solid-State Electronics* 47.4 (2003): 601-605.
- M. Gökçen 1 ve M. Yıldırım Bir Au/Bi₄Ti₃O₁₂/n-Si yapısının homojen olmayan bariyer yüksekliğinin Gaussian bariyer yüksekliği dağılımı ile incelenmesi *Chinese Phys*, 2012. - 12: Cilt 21.
- M. Mrovec J.-M. Albina, B. Meyer ve C. Elsässer. Geçiş metalinde Schottky bariyerleri *Fizik Rev.*, 2009. - 245121 - Cilt 79.
- M.O. Aboelfotoh, Influence of thin interfacial silicon oxide layers on the Schottky-barrier behavior of Ti on Si(100), *Phys. Rev. B* 39 _1989. 5070.
- Mönch, W., Barrier Heights of Real Schottky Contacts Explained by Metal-Induced Gap States and Lateral Inhomogeneities, *J. Vac. Sci. Techno B.*, 17(14), 1867-1876, 1999.
- Neamen D.A - *Semiconductor Physics and Devices* 2nd ed - New York, : Mc Graw-Hill, 1997. - Cilt 420-450, 517-523.
- Nicollian, E.H., Brews, J.R., *MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology*, John Wiley & Sons, New York, 1982.
- Nuhoğlu, Ç., Ayyıldız, E., Sağlam, M., & Türüt, A. (1998). Thermal treatment of the MIS and intimate Ni/n-LEC GaAs Schottky barrier diodes. *Applied Surface Science*, 135(1-4), 350-356.
- Nuhoğlu, Ç., Temirci, C., Bati, B., Biber, M., & Türüt, A. (2000). Effect of thermal annealing on Co/n-LEC GaAs (Te) Schottky contacts. *Solid state communications*, 115(6), 291-295. Norde H., A -Modified Forward I-V Plot for Schottky Diodes with High Series Resistance *Journal of Physics*, - 1979. - Cilt 50.
- Ohdomani, I., Tu, K., Parallel Silicide Contacts. *J. Appl. Phys.* 51, 3735–3739, 1980.
- Ohdomari, I., Aochi, H., Size Effect of Parallel Silicide Contact, *Physical Rev. B*, 25, 682-686, 1981.
- Ozdemir, A. F., Turut, A., & Kokce, A. (2003). The interface state energy distribution from capacitance-frequency characteristics of gold/n-type Gallium arsenide Schottky barrier diodes exposed to air. *Thin Solid Films*, 425(1-2), 210-215.

- P. Lahnor K. Seiter, M. Schulz, W. Dorsch & R. Scholz. Barrier-height non-uniformities of PtSi/Si(111) Schottky diodes - Applied Physics A, 1995. - 369-375: Cilt 61.
- Pang TS Huang J.G.-Pd-Al alaşımı Schottky temaslarının n -GaAs ile termal kararlılığı - Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Ulusal Tsing Hua Üniversitesi, Hsinchu 30043, Tayvan, ROC 1997. - 2: Cilt 49.
- Rhoderick E.H., Williams R.H Metal Semicondutor Contacts - Oxford Press, 1988. - Cilt 2/257-264.
- Santosh Pandey, S. Kal, A simple approach to the capacitance technique for determination of interface state density of a metal-semiconductor contact, Solid-State Electronics, Volume 42, Issue 6, 1998, Pages 943-949.
- Sato K., Yasamura, Y. - Study of Forward I-V Plot for Schottky Diodes ith High Series Resistance, Journal of Physics. - 1985. - Cilt 60.
- Schmitsdorf, R.F., Kampen, T. U., Mönch, W., Correlation Between Barrier Height and Interfaces Structure of Ag/Si (111) Schottky Diodes, Surface Science 324, 249-256, 1995.
- Schottky, W., The Development of Silicon Crystal Rectifiers for Microwave Radar Receivers, Z. Phys., 113, 367-414, 1938.
- Sharma B.L Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications Plenum Press, New York, 1984. - Cilt 1-3.
- Sullivan, J. P., Tung, R. T., Pinto, M. R., & Graham, W. R. (1991). Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers: A numerical study. Journal of applied physics, 70(12), 7403-7424.
- Sze, S.M., Physics of Semiconductor Devices, 2nd. Ed., pp.254-311, Willey-Interscience Publication, ABD, 1981.
- Tan S. O., "Schottky yapılar üzerine inceleme ve analiz çalışması", Politeknik Dergisi, 21(4): 977-989, (2018).
- Taşcıoğlu, İ. (2012). Au/PVA: Zn/n-Si (MPS) Schottky engel diyodun elektriksel özelliklerinin sıcaklık ve radyasyona bağlı incelenmesi (Doctoral dissertation, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 49-51).
- Tataroğlu, Adem. "Comparative study of the electrical properties of Au/n-Si (MS) and Au/Si₃N₄/n-Si (MIS) Schottky diodes." Chinese Physics B 22.6 (2013): 068402.Asano Hideaki Fujitani ve Setsuro. - Schottky engelleri - ABD: Fizik Rev., 15.07.1990. - 1696: Cilt 42.

- TJ Vink KJBM Nieuwesteeg ve G. Oversluizen - Tunneling through thin oxide interface layers in a-Si: H Schottky diodes - Journal of Applied Physics, 1992. - 4399: Cilt 71.
- Tung R.T Electron Transport at Metal-Semiconductor Interfaces - General Theory, Phys. Rev, 1992. - 23: Cilt 45.
- Tung, R. T., 1992. Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers. Appl. Phys. Lett., 58, 2821-23.) ve (Sullivan, J. P., Tung, R. T., Pinto, M. R., Graham, W. R., 1991. Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers: A numerical study. J. Appl. Phys, 70, 7403-7424
- Türüt, A., & Sağlam, M. (1992). Determination of the density of Si-metal interface states and excess capacitance caused by them. Physica B: Condensed Matter, 179(4), 285-294.
- Turut, A., Saglam, M., Efeoglu, H., Yalcin, N., Yildirim, M., & Abay, B. (1995). Interpreting the nonideal reverse bias CV characteristics and importance of the dependence of Schottky barrier height on applied voltage. Physica B: Condensed Matter, 205(1), 41-50.
- Türüt E. Ayyıldız B. Batı C. Temirci A Termal tavlamanın Ti/n-GaAs(Te) Schottky diyotlarında arayüzey durumlarının yoğunluk dağılımına bağımlılığı - Fizik Bölümü, Fen-Edebiyat Fakültesi, Atatürk Üniversitesi, 25240 Erzurum, Türkiye: Elsevier, 1999. - 1-2: Cilt 152.
- Turut, A., Ejderha, K., Yildirim, N., & Abay, B. (2016). Characteristic diode parameters in thermally annealed Ni/p-InP contacts. Journal of Semiconductors, 37(4), 044001.
- Varenne, C., Brunet, A., Pauly, A. and Lauron, B., 2009. A comparative study of Schottky barrier height enhancement by realized pseudo-Schottky diodes on p-InP, Physica B 404, 1082–1086.
- Wang, X., Wang, Y., Li, D., Zou, L., Zhang, Q., Zhou, J., Liu, D., Zhang, Z., 2015. Thermal annealing and air exposing effect on the graphene/silicon Schottky junctions. Solid State Communications 201, 115–119.
- Wiley & Sons New Jersey. - Transport mechanisms in porous silicon -J. Appl. Phys, 1998. - 3232-3235: Cilt 84.
- Woodall J., Freeouf, J., Petit, G., Jackson, T., and Kirchner, P. - Ohmic contacts to normal- GaAs using graded band-gap layers of Ga 1-x In x As grown molecular beam epitaxy. J. Vac. Sci. Technol. - J.Vac.Sci.Technol., 1981. - 626-629: Cilt 19.
- Wu Hsun-Hua Tseng /Ching-Yuan. - Schottky engel diyotunun ideal olmayan I - V ve C - V özellikleri için basit bir arayüzey katmanı modeli - Elektronik

Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Ulusal Chiao Tung Üniversitesi, Hsin Chu, Tayvan, Çin Cumhuriyeti, 1987. - 4: Cilt 30.

Yıldırım, N., 2009. Saçtırma Yöntemiyle Hazırlanan Ni/n-GaAs Schottky Engel Diyotların Karakteristik Parametrelerinin Tavlama ve Numune Sıcaklığına Bağlı Değişimleri. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Z. Çaldıran A.R. Deniz Ş. Aydoğan A. Yeşildağ D. Ekinici. Au/ n -Si/Al Schottky bariyer diyotunun n -Si üzerinde elektrokimyasal olarak organik bir Antrasen tabakası oluşturarak bariyer yüksekliğinin arttırılması Fizik Bölümü, Fen Fakültesi, Atatürk Üniversitesi, 25240 Erzurum, Türkiye 2013. - Cilt 56.

Ziel A - Metal-Semiconductor Contacts/Solid State Physical Electronics, Prentice-Hall International Inc- Minnesota: Clarendon, Oxford, 1968. - Cilt 2.