



GİRESUN
ÜNİVERSİTESİ



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Al/CORONENE/n-Si SCHOTTKY DİYOTLARININ SERİ
DİRENÇLERİNİN HESAPLANMASI**

**FİZİK
ANA BİLİM DALI
Yüksek Lisans Tezi
Cemalettin KAYGUSUZ
20152101005
Haziran 2019**

GİRESUN



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

**A/CORONENE/n-Si SCHOTTKY DİYOTLARININ SERİ
DİRENÇLERİNİN HESAPLANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cemalettin KAYGUSUZ

Enstitü Anabilim Dalı : Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Behzad BARIŞ

Haziran 2019

T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Al/CORONENE/n-Si SCHOTTKY DİYOTLARININ SERİ
DİRENÇLERİNİN HESAPLANMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cemalettin KAYGUSUZ

Enstitü Anabilim Dalı

: Fizik Anabilim Dalı

Bu tez .././20.. tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Sema BİLGE OCAK

.....
Jüri Başkanı

Prof. Dr. Serdar KARADENİZ

.....
Üye

Doç. Dr. Behzad BARIŞ

.....
Üye (Danışman)

Doç. Dr. Bahadır KOZ

.....
Enstitü Müdürü

BEYAN

Tez de bulunan tüm verilerin akademik kurallar içerisinde tarafımdan elde edildiğini, yazılı ve görsel bütün bilgi ve sonuçların etik ve akademik kurallara uygun bir şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun bir şekilde atıfta bulunulduğunu, tezde bulunan verilerin Giresun Üniversitesi'nde veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Cemalettin KAYGUSUZ

.../.../20...

TEŞEKKÜR

Bu çalıőmanın her aşamasında, bütün bilgi ve birikimini benimle paylaşan, benden yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen, Yüksek Lisans eğitimim boyunca bana bilgi ve tecrübesiyle ışık tutan danışman hocam Doç. Dr. Behzad BARIŞ' a, bütün zor zamanlarımda yanımda olan hem sosyal hayatımda hem de çalışma hayatım boyunca benden hiçbir zaman desteğini esirgemeyen, karőılaőtığım bütün zorluklar da bir an bile terettüd etmeden benimle mücadele eden ve hayatımın her döneminde yanımda olan sevgili hayat arkadaőtım Nihal ARICAN KAYGUSUZ'a ve tabi ki biricik kızım Öykü Nas KAYGUSUZ'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	I
İÇİNDEKİLER	II
TABLolar DİZİNİ	IV
ÇİZELGELER DİZİNİ	V
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VI
SİMGELER.....	VIII
ÖZET.....	X
SUMMARY	XI
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Yarıiletkenler.....	3
2.1.1. Deşik Kavramı	5
2.1.2. Gerçek Yarıiletkenler	7
2.1.3. Katkılı Yarıiletkenler	8
2.2. Metal-Yarıiletken Kontak	11
2.2.1. n-tipi Yarıiletken/Metal Omik Kontaklar.....	13
2.3. Metal (Omik)/n-tipi Yarıiletken/Metal (Doğraltucu) Yapı.....	17
2.4. Metal-Yarıiletken Schottky Diyotlarda Akım İletimi ve Termiyonik Emisyon .	19
2.4.1. Metal-Yarıiletken Schottky Diyotlarda Akım İletimi Mekanizmaları.....	19
2.4.2. Termiyonik Emisyon Teorisi	20
2.5. Schottky Diyot Yapılarında İdealden Sapmalar.....	21
2.5.1. Arayüzey Tabakası Etkisi	22
2.5.2. Seri Direnç Tesiri	22
2.5.3. Seri Direnç Ölçme Yöntemleri.....	24
2.5.3.1. Norde Yöntemi.....	24

2.5.3.2. Cheung Yöntemi	29
2.5.3.3. Missous Yöntemi	30
2.6. Aygıt Karakterizasyonu	31
2.6.1. Akım- Voltaj (<i>I-V</i>) Karakteristikleri	32
2.7. Reaktif Boyar Maddeler	34
2.7.1. Coronene boyar maddenin yapısal özellikleri.....	35
BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	36
3.1. Yapıların Hazırlanması	36
3.1.1. Kristal Temizleme İşlemi	36
3.1.2. Al/Coronene/n-Si Yapılarının Oluşturulması	39
3.2. Kullanılan Ölçüm Cihazları ve Düzenekleri	45
BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	46
4.1. Giriş.....	46
4.2. Düz Beslem Akım-Voltaj (<i>I-V</i>) Karakteristikleri	46
BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	57
KAYNAKLAR	60
ÖZGEÇMİŞ	63

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1 Bazı Yarıiletken Malzemelerin Sınıflandırılması	5
Tablo 2.2 Oda Sıcaklığında Bazı Yarıiletkenlerin Eg Değerleri.....	7
Tablo 2.3 İş Fonksiyonlarının Durumuna Göre, Omik ve Doğrultucu Kontakların Meydana Gelişi.....	15



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 Al/Coronene/n-Si Schottky diyotlarının I-V karakteristiğinden elde edilen R_s , n , I_0 , ϕ_B değerleri	49
Çizelge 4.2 Cheung yöntemiyle elde edilen R_s , n ve ϕ_B değerleri	54
Çizelge 4.3 $F(V)$ fonksiyonu yardımıyla elde edilmiş ϕ_B ve R_s değerleri.....	56



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Farklı Türde Schottky-bariyer diyotlar: Düşük sinyalli RF cihazları (Mavi), orta ve yüksek sinyalli Schottky doğrultucu diyotlar (Kırmızı ve Siyah)	1
Şekil 1.2 Devredeki Elektronik Gösterimi (Anode: Anot, Cathode: Katod)	2
Şekil 2.1 Metal, seramik, polimer ve kompozit malzemelerin oda sıcaklığındaki elektrik iletkenlik değer aralığını gösteren grafik	4
Şekil 2.2 Elektron ve Deşik Hareketleri; (a) Elektronların valans bandından iletim bandına ısıl uyarılması yoluyla elektron deşik çifti üretimi, (b) Bir Ex alanı uygulanması durumunda bir yarıiletkendeki elektron ve deşik hareketi	6
Şekil.2.3 Bir p Tipi Yarıiletken Malzeme Oluşturmak İçin Üç Değerlikli Safsızlıkların Eklenmesi	9
Şekil 2.5 p tipi ve n tipi Malzemelerdeki Safsızlık Enerji Seviyeleri	10
Şekil 2.6 Schottky Diyotun Şematik Gösterimi	12
Şekil 2.7 Metal / n-tipi Yarıiletken Omik Kontakta Enerji - Bant Grafiği.....	12
a) Kontak oluşuşmundan Önce, b) Kontak oluşuşmundan Sonra, c) Ters Beslem Altında, d) Düz Beslem Altında	12
Şekil 2.8 Kontakta Önce ve Sonra n-tipi Yarıiletken ve Metale Ait Enerji-Bant Diyagramları	18
Şekil 2.9 Yarıiletken Diyodun Enerji-Bant Diyagramı.....	19
Şekil 2.10 Düz Beslem Altında Schottky Engeline Akım İletim Mekanizmaları. 20	
Şekil 2.11 Metal / Yarıiletken Kontakta Seri Direncin Tesiri.....	23
Şekil 2.12 N-tipi yarıiletken MS kontakın detaylı enerji-bant çizimi.....	32
Şekil 3.1 Boron katkılı p-tipi Silisyum kristali	37
Şekil 3.2 “Bandelin Sonorex” marka ultrasonik banyo	37
Şekil 3.3 “Innovation Water Purification” marka deiyonize su sistemi.....	38
Şekil 3.4 Kristal temizliği aşamasında kullanılan ısıtıcı düzeneği.....	39
Şekil 3.6 Omik kontakın oluşturulması için kullanılan metal maske.....	40
Şekil 3.7 Numune tutucu içerisine maske ile yerleştirilmiş silisyum kristali	41

Şekil 3.8 Evaporasyon işleminde kullanılan tungsten pota.....	41
Şekil 3.9 “Edwards FTM6” marka kalınlık ölçer	42
Şekil 3.10 Omik kontak oluşumunda kullanılan tungsten levhalar	43
Şekil 3.11 Doğrultucu kontak yapımında değerlendirilen metal maske	43
Şekil 3.12 Çeyrek silisyum alttabaka üzerinde oluşturulan Al/Coronene/n-Si Schottky yapılarının görüntüsü	44
Şekil 3.13 Oluşturulan Al/Coronene/n-Si Schottky yapılarının şematik diyagramı ..	44
Şekil 3.14 Bilgisayar kontrollü Keithley 2400 Source Meter ve Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer cihazları.....	45
Şekil 4.1 Tüm Al/Coronene/n-Si Schottky diyotlarına ait yarı logaritmik düz beslem altında işlem görmüş I-V karakteristikleri:a) 1’den 3 nolu numuneye kadar, (b) 3’den 6 nolu numuneye kadar	48
Şekil 4.2 Al/Coronene/n-Si Schottky diyotlarından bir tanesinin yarı logaritmik düz beslem altında işlem görmüş I-V karakteristiği	49
Şekil 4.3 Tüm Al/CORONENE/n-Si Schottky diyotlarının $dV/d(\ln I) - I$ eğrileri: a) 1’den 3 nolu numuneye kadar, (b) 4’den 6 nolu numuneye kadar	51
Şekil 4.4 Tüm Al/CORONENE/n-Si Schottky diyotlarının $H(I)-I$ eğrileri: a) 1’den 3 nolu numuneye kadar, (b) 4’den 6 nolu numuneye kadar	52
Şekil 4.5 (1) nolu diyot için: a) $dV/d(\ln I) - I$ eğrisi, b) $H(I)-I$ eğrisi.....	53
Şekil 4.6 Tüm Al/CORONENE/n-Si Schottky diyotlarının $F(V) - V$ eğrileri: a) 1’den 20 nolu numuneye kadar, (b) 21’den 40 nolu numuneye kadar	55

SİMGELER

Si	: Silisyum
E_g	: Yasak enerji bant aralığı
E_F	: Fermi enerji seviyesi
q	: Elektronik yük
n	: Elektronların etkin yoğunluğu
k	: Boltzmann sabiti
T	: Kelvin cinsinden sıcaklık
m_e^*	: Elektronların etkin kütlesi
m_h^*	: Deşiklerin etkin kütlesi
h	: Planck sabiti
γ	: Parçacık frekansı
Φ_m	: Metalin iş fonksiyonu
F_s	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
I	: Taşıyıcıların oluşturduğu toplam akım
V_d	: Difüzyon potansiyeli
V_F	: Düz beslem
V_R	: Ters beslem
J_{sm}	: Elektronların yarıiletkenden metale doğru oluşturduğu akım yoğunluğu
v_x	: Elektronların hızı
Φ_B	: Engel yüksekliği
m^*	: Taşıyıcıların etkin kütlesi
A^*	: Richardson sabiti
J_n	: Doyma akımı yoğunluğu
$n_{(x)}$: Elektron yoğunluğu
$E_{(x)}$: Schottky bölgesindeki elektrik alanı
N_D	: Verici atomlarının yoğunluğu

ϵ_s	: Yarıiletkenin elektrik geçirgenliği
J_o	: Akım yoğunluğu
n	: İdeallik faktörü
V_n	: Gerçek Fermi enerji seviyesi ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkı
N_A	: Alıcı atomlarının yoğunluğu
ϵ_o	: Boşluğun elektriksel geçirgenliği
$\Delta\phi_B$: Schottky alçalması
N_{ss}	: Arayüzey durumları
N_m	: Metal ile dengede olan arayüzey durumları yoğunluğu
N_y	: Yarıiletken ile dengede olan arayüzey durumları yoğunluğu
ϵ_i	: Oksit tabakasının elektriksel geçirgenliği
d	: Arayüzey tabakasının kalınlığı
W_D	: Tüketme bölgesinin genişliği
$F(V)$: Norde fonksiyonu
R_s	: Seri direnç
V_o	: Norde fonksiyonu için minimum voltaj
γ	: Norde fonksiyonu için bir tam sayı
$dV/d(\ln I)$: Birinci Cheung fonksiyonu
$H(I)$: İkinci Cheung fonksiyonu
$q\phi_o$: Yüzey enerjisi Fermi seviyesi
E_F	: Fermi enerji seviyesi
Q_m	: Metal üzerindeki yüzey yükü
I_o	: Doyma akımı
$F(V_o)$: Minimum Norde fonksiyonu
r	: Özdirenç
N_{AD}	: Deneysel taşıyıcı yoğunluğu
Φ_F	: Gerçek Fermi enerji seviyesi ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkı
ϕ_B	: Ortalama engel yüksekliği
σ_s	: Engel yüksekliğinin standart sapması

Al/CORONENE/*n*-Si SCHOTTKY DİYOTLARININ SERİ DİRENÇLERİNİN HESAPLANMASI

ÖZET

Schottky tabanlı metal/organik/yarıiletken yapılar, üretim teknolojilerinin gelişmesi ve her geçen gün önemlerinin artması sonucunda dedektörler, güneş pilleri, anahtarlama elemanları, mikrodalga devre elemanları gibi birçok farklı kullanım alanları bulmuşlardır. Bir metal/organik/yarıiletken oluşumunda engel yüksekliğinin kontrolü, yüksek performanslı bir opto-elektronik devre elemanı tasarlamak için önemlidir. Devre elemanının performansı ve güvenilirliği, o malzemenin atomik boyutta geometrik ve elektronik özellikleri ile yakından ilişkilidir.

Bu kapsamdan yola çıkarak araştırmanın amacı:

Metal/Organik/Yarıiletken yapıların, elektriksel karakteristikleri incelenerek, seri dirençlerinin hesaplanmasıdır. Buna göre; öncelikli olarak *n*-tipi Si yarıiletkenler ve kaplanan metaller farklı kimyasal yöntemlerle temizlendikten sonra, metal ve organik madde (CORONENE- C₂₄H₁₂) yarıiletken yapının üzeri vakumlu ortamda evaporasyon yöntemiyle kaplama yapılarak, Al/Coronene/*n*-Si Organik Schottky Diyot yapıları oluşturulmuştur. Elde edilen bu yapıların iki ucundan elektriksel bağlantı yapılarak karakterizasyon işlemleri yapılmıştır. Uygulama aşamasında her numune oda sıcaklığında *I-V* (Akım-Gerilim) ölçümleri bilgisayar kontrollü cihazlar ile alınarak diyot parametreleri hesaplanmıştır. Ayrıca farklı üretim yöntemleri kullanılarak, Schottky tabanlı Metal/Organik/Yarıiletken yapılarının elektriksel özelliklerinde değişiklik meydana getirilmenin de mümkün olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Schottky Diyot, Coronene, Seri Direnç.

CALCULATION OF SERIAL RESISTORS OF Al/CORONENE/n-Si SCHOTTKY DIODES

SUMMARY

Schottky based metal/organic/semiconductor structures, as a result of the development of production technologies and increasing importance with each passing day detectors, solar cells, switching elements, and microwave circuit elements have found many different uses. Control of barrier height in a metal/organic/semiconductor formation is important to design a high-performance opto-electronic circuit element. The performance and reliability of the circuit element is closely related to the geometric and electronic properties of that material in atomic dimensions.

The aim of this research is:

The calculation of series resistances of metal/organic/semiconductor structures by examining their electrical characteristics. According to this; n-type Si semiconductors and coated metals are firstly cleaned by different chemical methods. Al/Coronene/n-Si Organic Schottky Diode structures are formed by coating the metal and organic material (CORONENE- $C_{24}H_{12}$) on the semiconductor structure by vacuum evaporation method. Characterizations of these structures were made by electrical connection at both ends. At the application stage, diode parameters were calculated by taking *I-V* (Current-Voltage) measurements at room temperature with computer controlled devices. Furthermore, it was seen that it is possible to make changes in electrical properties of Schottky based Metal/Organic/Semiconductor structures by using different production methods.

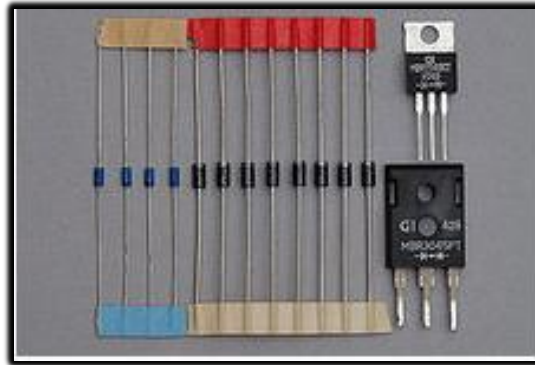
Keywords: Schottky Diode, Coronene, Series Resistor.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

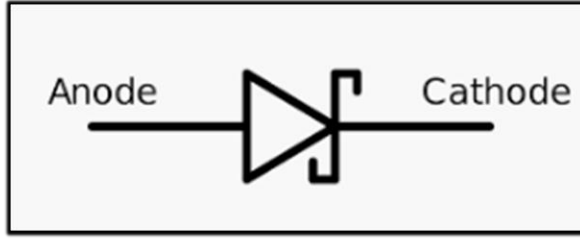
Metal ve yarıiletken yapıların birbiri ile ara yüzey olmadan bir araya gelmesi sonucu oluşan metal-yarıiletken kontak yapılarında, kontak malzemelerin iş fonksiyonlarının farklı olması sebebiyle Fermi enerji seviyeleri eşitleninceye kadar aralarında bir yük akışı söz konusu olmaktadır [1].

Metal-yarıiletken yapılar birçok elektronik devre elemanında omik veya doğrultucu kontaklar olarak bulunmaktadır. Başlangıçta radyo dedektörü, daha sonralarda radar dedektörü ve mikro dalga diyotu olarak geliştirilen metal-yarıiletken yapılar, günümüzde aktif devre elemanları, varaktörler (Gerilim değişimine bağlı olarak değişen kondansatörler), güneş pilleri, anahtarlama devreleri gibi birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [1].

Metal-yarıiletken Schottky kontaklarının, elektronik devre elemanları içerisinde ki teknoloji alanında önemli bir yeri vardır. Schottky diyotlar, yarıiletken dedektörler, güneş pilleri, metal-yarıiletken alan etkili transistörler ve mikrodalga devre öğeleri türünden birçok elektronik devre elemanlarını Schottky kontaklar oluşturularak yapılmaktadır [2, 3].



Şekil 1.1 Farklı Türde Schottky-bariyer diyotlar: Düşük sinyalli RF cihazları (Mavi), orta ve yüksek sinyalli Schottky doğrultucu diyotlar (Kırmızı ve Siyah) [4].



Şekil 1.2 Devredeki Elektronik Gösterimi (Anode: Anot, Cathode: Katod) [4].

Devre öğelerinin üretiminde, ideal standartları sağlamayan metal-yarıiletken Schottky kontak yapının, metal-oksit ve oksit-yarıiletken ara yüzlerdeki karakteristiklerinin, ayrıca oksit ve yarıiletken karakteristiklerinin biliniyor olunması kesinlikle önemlidir. Üretilen bir devre elemanının tam kapasite ile çalışabilmesi, devreyi oluşturan temel yapının tüm özelliklerinin bilinmesine ve böylece çıkabilecek tüm aksaklıkların giderilebilmesine bağlıdır. Bu kapsamda yürütülen çalışmaların gayesi, bir yandan bu yapıların, fiziksel özelliklerini, parametrelerini belirlemek, diğer taraftan da bu tür özelliklerden yararlanarak daha istenilen ve yeni devre öğeleri geliştirerek, üretilmesinin sağlanmasıdır [2, 5].

Schottky diyotlarda arayüzey halleri ile ilgili bir teorik çalışma da Heine tarafından yapılmıştır. Metal elektronlarının dalga fonksiyonlarının yarıiletken üstel olarak bozunduğu ve bu dalga fonksiyon kuyruklarının yarıiletkenin yasak enerji aralığında metal tarafından indüklenen yasak enerji halleri olarak bilinen halleri meydana getirdiği gösterilmiştir. Metal-yarıiletken ara yüzey yapısının, Schottky engel yüksekliğinin tespitinde etkili rol oynadığı bilinmektedir [2, 5].

Schottky diyotlar üretildiğinde, üretimin doğasından ötürü yarı iletken metal arasında doğal bir ara yüz oluşturulmaktadır. Deneyler ve araştırmalar, bu ara yüzlerin diyotun fiziksel özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Bu noktadan sonra farklı elektriksel özelliklere sahip ve farklı kalınlıklarda farklı ara yüzler kullanan daha kararlı Schottky diyotlarının elde edilmesi amacıyla çalışmalar yapılmıştır. Bu bağlamda, deneyler, ara yüz olarak çok çeşitli maddeler kullanılarak yapılmıştır. Polimerler, mekanik mukavemet ve tedarik kolaylığı nedeniyle metallere doğrudan kontaktlar oluşturdukları için, politiofen gibi polimerler artık birçok deney ve ara yüz olarak araştırmanın ilgi odağı olmuştur [5, 6].

BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Yarıiletkenler

Yarıiletkenler, katıların en ilginç ve önemlisi olup, metallere yakın yalıtkanlara uzanan bölgeyi kapsayan malzeme tipidir. Günümüz teknolojisinde kullanılan elektronik cihazların büyük bir bölümünde yarıiletken olarak bilinen malzemeler kullanılarak üretilmektedir. Yarıiletken maddeler, iletkenlik(öz direnç) özellikleri olan metal maddeler ile iletkenlik özellikleri olmayan yalıtkan maddeler arasında olan, birçok fiziksel(elektriksel) özelliğinin katkılama yardımıyla hassas bir şekilde kontrol altına alınabilen, taşıyıcı yoğunluğu ve öz direnç gibi parametrelerinin sıcaklık benzeri dış faktörlerle önemli ölçüde değişme gösteren maddelerdir [1].

Malzemeler elektrik akımını iletim yeteneğine göre; yarıiletken, iletken ve yalıtkan malzemeler olarak üç temel gruba ayrılır.

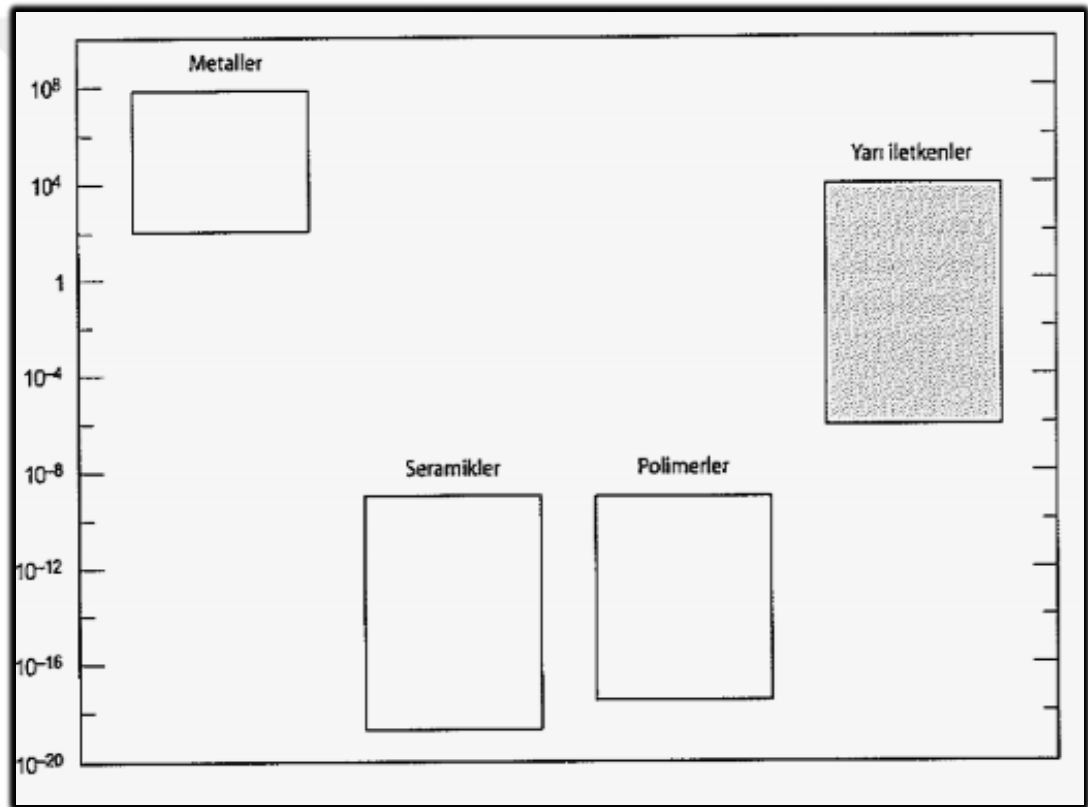
- Metal olan malzemeler iyi bir iletkenlerdir, genel olarak 10^7 ($\Omega \cdot m$)⁻¹ büyüklüğünde elektrik iletkenliğine sahiptirler.
- Yalıtkan malzemeler, 10^{-10} ile 10^{-20} ($\Omega \cdot m$)⁻¹ arasında değişen çok küçük iletkenlik değerlerine sahip malzemeler şeklinde tanımlanır.
- Orta düzeyde ki iletkenliğe sahip olan malzemeler yani yarı iletken malzemeler, genellikle 10^{-6} ile 10^4 ($\Omega \cdot m$)⁻¹ arasında bir değere sahiptir, iletken ve yalıtkan malzemelerin iletkenlik değerleri arasında ki iletkenlik değerlerine sahip maddeler yarı iletken malzemeler olarak adlandırılır.

Mutlak sıfır sıcaklığında, saf ve mükemmel Kristal yarıiletken maddeler yalıtkan özelliği gösterir. Bir yarıiletkenin elektriksel iletkenliği, sıcaklığa hassas bir şekilde

bağlıdır. Sıcaklık yükseldiğinde, bir yarıiletkenin öz direncinin küçülmesi yarıiletken malzemelerin en belirgin özelliklerindedir.

Yarıiletkenlerin diğer özelliklerinden birisi de, yabancı madde konsantrasyonu arttırıldıkça öz dirençlerinin azalmasıdır. Metallerde ise, yarıiletkenlerin aksine, saflık arttıkça öz direnç küçülmektedir [1].

Yarıiletken malzemelerin sayısı oldukça fazladır. Bunların bir kısmı element, bir kısmı bileşik veya alaşımdır (Tablo 2.1) [1].



Şekil 2.1 Metal, seramik, polimer ve kompozit malzemelerin oda sıcaklığındaki elektrik iletkenlik değer aralığını gösteren grafik [1]

Tablo 2.1 Bazı Yarıiletken Malzemelerin Sınıflandırılması

Genel Sınıflandırma	Örnek
Element Yarıiletkenler	Si,Ge
II-VI Yarıiletkenler	CdSe, CdS, dTe, HgS, ZnO, HgTe, CdTe
IV-VI Yarıiletkenler	SnS, SnSe, GeS
Alaşımalar	GaAs _x P _{1-x} » HgC _x Te _{1-x}

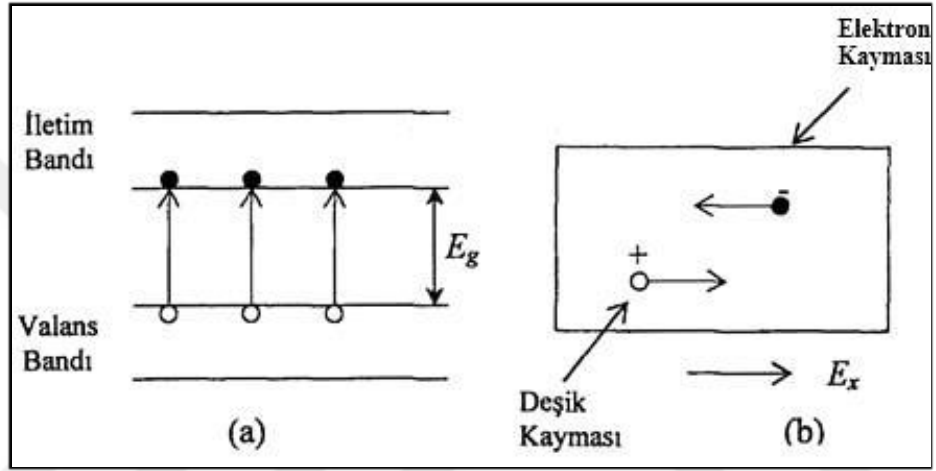
2.1.1. Deşik Kavramı

Yapılan labaratuvar çalışmalarında, atomun artı yüklü bir çekirdek ile bunun çevresinde ayrı yörüngelerde yerleşmiş elektronlardan oluştuğunu göstermiştir. Aslında elektronlar, çekirdek etrafında belli kesikli enerji değerlerinde olan kararlı enerji düzeylerinde bulunmaktadır [2].

En minik kristaller dahi sayısı milyonları bulan atomlardan meydana gelir. Bundan dolayı bütün çekirdeklerle ilgili birçok enerji düzeyi vardır ve tüm kristale özgü uygun enerji seviye şekli bu düzeylerden oluşan bir şerittir(band). Var olan enerji seviyelerinin her birinde bir elektron bulunan ve elektronlarla tamamen dolu olan en küçük değerli enerji bandına valans band denir. Valans banddaki herhangi bir elektron çeşitli sebeplerle bulunduğu mevcut enerji bandından koparılıp serbest duruma gelirse elektronun bu haldeki mevcut bandına iletim bandı denir. İletim bandı tam olarak valans bandının üstünde bulunan ve atomların en dış yörüngelerine tekabül eden, boş olan bir banddır. Elektron iletkenliği bu bandda meydana gelir. Enerji bandlarını ayıran enerji bölgelerine yasak bölge adı verilir. Yasak bölgeler, elektronlar tarafından işgal edilemezler, iletim ve valans bandları arasındaki enerji aralığı, hiçbir kuantum durumuna sahip bulunmadığından elektron içermez ve bu bölge yasak enerji bölgesi adını almaktadır [2].

Gerçek yarıiletkene dışardan ışık gönderildiğinde foton enerjisi E , $E > E_g$ ilişkisine sahip ise, bu foton, elektronu bağlı olduğu konumdan kopararak serbest kalmasına

neden olur. Bu durumda elektronun valans bandından iletim bandına uyarıldığı söylenebilir. Elektronun bu şekilde ait olduğu bağdan koparılması geride bir elektron boşluğu bırakır. Bu elektron boşluğuna deşik denir. Sonuçta yarıiletken üzerine düşen ışık, malzemede bir elektron-deşik çifti oluşturmaktadır (Şekil 2.2 (a)). Eğer bir elektrik alan, böyle bir malzemeye uygulanırsa, iletim bandındaki elektronlar ve valans bandındaki deşikler Şekil 2.2 (b)' de gösterildiği gibi farklı yönlerde hareket ederler ve her ikisi de yüklerdeki farklılık sebebiyle akıma katkıda bulunurlar [1, 2].



Şekil 2.2 Elektron ve Deşik Hareketleri; (a) Elektronların valans bandından iletim bandına ısı uyarılması yoluyla elektron deşik çifti üretimi, (b) Bir E_x alanı uygulanması durumunda bir yarıiletkendeki elektron ve deşik hareketi [2]

Eğer elektron, tekrar bu elektron boşluğuna(deşik olarak adlandırılan atomik bağa) yakalanacak olursa bu işleme yeniden birleşme süreci denir. Eğer yük çiftleri yeniden birleşmeden malzeme içerisinde bir elektrik alan etkisi ile hareket ediyorsa bu olaya sürüklenme süreci denir. Eğer malzeme içerisinde, farklı bölgelerde, farklı yük taşıyıcı yoğunlukları nedeniyle bir yük akışı söz konusu ise bu olaya difüzyon denir. Bu üç temel süreç bir yarıiletkende akım iletimine katkıda bulunan üç temel mekanizmadır [1, 2].

Tablo 2.2 Oda Sıcaklığında Bazı Yarıiletkenlerin E_g Değerleri [1]

Kristal	$E_g(eV)$	Kristal	$E_g(eV)$
Si	1,1	GaSb	0,7
GaAs, GaP	1,4	InAs	0,4
CdS, CdSe	2,6 1,7	InP	1,3
PbS, PbTe	0,4 0,3	Ge	0,7
CdTe	1,5	ZnTe	2,3
ZnS	3,6		

Tablo 2.2’de oda sıcaklığında ki değişik yarıiletkenler için E_g değerleri verilmiştir. Bir yarıiletken, mutlak sıfırda yalıtkan haline dönüşür. Böyle bir malzemede elektronlar atomlara sıkı bağlı konumdadır. Malzeme içerisinde serbest dolaşan elektron yoktur. Mutlak sıfır sıcaklığında, saf bir yarıiletkenin iletim bandı boş iken valans bandı büsbütün doludur. Valans elektronların tümü, iletim mekanizmasında yer alamaz. Çünkü iletim bandı valans bandından E_g ile tanımlı bir enerji aralığı ile ayrılmıştır. Saf bir yarıiletkenin E_g band aralığı yalıtkanlardan çok daha küçüktür [1,2].

2.1.2. Gerçek Yarıiletkenler

Gerçek yarıiletken, kusur veya safsızlık içermeyen, dışardan başka bir malzeme katkılanmamış ve yasak enerji aralığının(E_g), iletkenler ile yalıtkanlar arasındaki değerlere sahip olan bir malzemedir. Gerçek yarıiletkenler, gerek doğal gerekse dış etkiler sonucu bir takım kusur ve safsızlıklara sahip olurlarsa birçok fiziksel özelliği önemli ölçüde değişim gösterir, özellikle malzemelerin içerisine büyültülme (hazırlanma) sırasında veya daha sonradan başka malzemelerin katkılanması, elektriksel özellikleri çok farklı olan ve bu özelliklerin katkı maddesinin cinsi ve miktarı ile önemli ölçüde kontrol edilebilen yapıların elde edilmesine imkan vermektedir [1,2].

Gerçek yarıiletken mutlak sıfırda($T=0$) tutulursa ve dışardan hiçbir uyarıcı ışık gönderilmezse, oluşan tüm elektron deşik çiftleri yeniden birleşerek kısa sürede yok olur. Ancak sıcaklık artırılacak olursa, E_g band aralığı çok büyük olmadığından ısısal etkileşmeler sonucu valans bandından iletim bandına elektronlar uyarılabilirler ve elektron deşik çiftleri oluşmaya başlar. Belirli bir süre sonra valans bandındaki deşik sayısı, iletim bandındaki elektron sayısına eşit olduğu denge durumuna ulaşır [1, 2].

2.1.3. Katkılı Yarıiletkenler

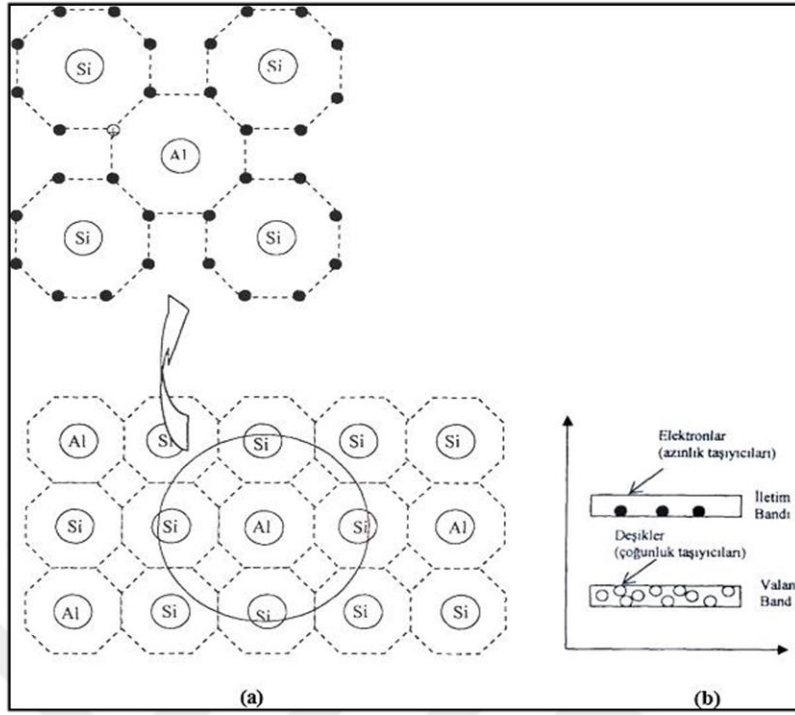
Katkılama, yarıiletken teknolojisinde bir yarıiletken malzemeye, malzeme içerisindeki elektron veya deşik yoğunluğunu artırmak amacıyla kontrollü miktarda safsızlık(katkı) atomunun eklenmesidir [1, 2].

Yarıiletken malzemeye ve içerisine katkılanan madde cinsine bağlı olarak iki tip yarıiletken üretilir:

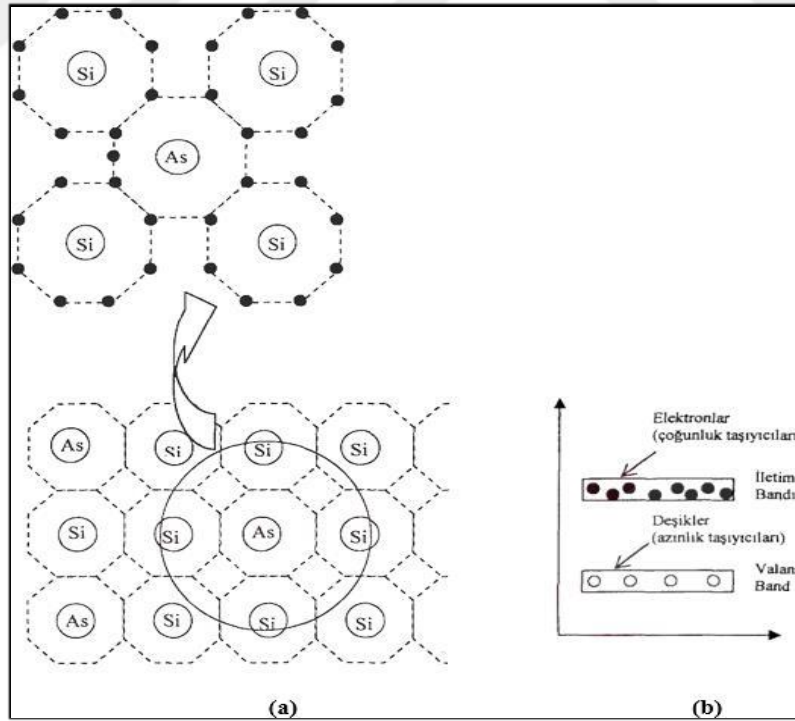
- **n tipi yarıiletkenler**
- **p tipi yarıiletkenler**

Silisyum (Si) kristalini göz önüne alalım. Si bir IV. grup elementidir ve safsızlık içermemesi durumunda nötr bir malzemedir ($_{14}\text{Si} = 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2 \rightarrow (2+2=4>)$). Silisyum'a periyodik tablonun III. grubundan bir element, örneğin; Alüminyum(Al) eklenecek olursa ($_{13}\text{Al} = 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1 \rightarrow (2+1=3)$) tamamlanmamış bir bağ nedeniyle (valans elektronları $4+3=7$) atomun eklendiği örgü noktasında bir açık bağ yani elektron boşluğu(deşik) oluşur (Şekil 2.3.(a)).

Bu elektron boşluğu malzeme içerisinde bir artı (+) yük şeklinde davranır. Bu şekilde çok sayıda Alüminyum(Al) atomunun eklenmesi ile (+) yüklerden oluşan net bir yük yoğunluğu(deşik yoğunluğu) ortaya çıkar (Şekil 2.3 (b)).



Şekil.2.3 Bir p Tipi Yarıiletken Malzeme Oluşturmak İçin Üç Değerlikli Safsızlıkların Eklenmesi

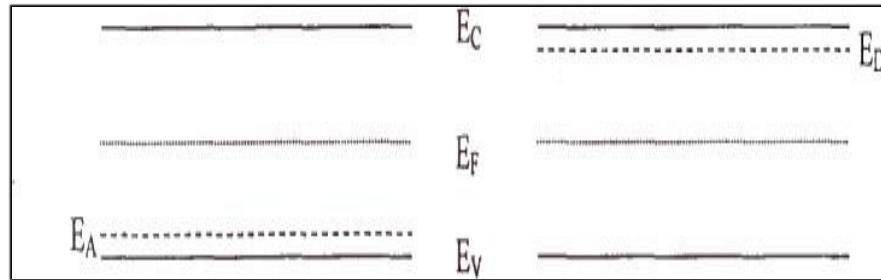


Şekil 2.4 Bir n Tipi Yarıiletken Malzeme Oluşturmak İçin Beş Değerlikli Safsızlıkların Eklenmesi

Benzer şekilde Silisyum'a V. gruptan bir element olan Arsenik(As), (${}_{33}\text{As}=\text{1s}^2 \text{2s}^2 \text{2p}^6 \text{3s}^2 \text{3p}^6 \text{4s}^2 \text{3d}^{10} \text{4p}^3 \Rightarrow (2+3=5)$) eklenecek olursa bu sefer fazla bir valans elektronu ortaya çıkar (Şekil 2.4.b). Bu fazla elektron, Arsenik(As) atomuna çok zayıf bağlanır ve nispeten serbest bir elektron gibi davranır. Bu fazla elektronun bağlanma enerjisi oldukça küçüktür. Si kristaline, As eklenirse, As atomu bir Si atomunun yerine yerleşir ve komşu Si atomları ile bağ yapar (Şekil 2.3(a)). Fazla valans elektronu, dış yörünge tamamlandığında As atomuna çok zayıf bağla bağlanır [1, 2].

Katkılanan safsızlıklar malzemede artı(+) yüklü deşikler oluşturuyorsa malzeme *p* tipi yarıiletken, eksi(-) yüklü elektron fazlalığına yol açıyorsa malzeme *n* tipi yarıiletken olarak sınıflandırılır [1, 2].

p tipi malzemede (+) yüklü deşikler(yük taşıyıcıları) oluşturan safsızlık atomlarına akseptör(elektron alan), *n* tipi malzemede (-) yüklü elektron fazlalığı oluşturan safsızlık atomlarına donör(elektron veren) denir, *p* tipi yarıiletkende azınlık yük taşıyıcıları elektronlar iken çoğunluk yük taşıyıcıları deşiklerdir, *n* tipi malzemede azınlık taşıyıcılar deşikler iken, çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlardır [1,2].



Şekil 2.5 *p* tipi ve *n* tipi Malzemelerdeki Safsızlık Enerji Seviyeleri [1, 2]

Bir yarıiletken malzemeye katkılanan safsızlık atomları, oluşturdukları safsızlık türüne(donor veya akseptör) ve iyonlaşma enerjilerine göre ana malzemenin enerji band diyagramında belirli safsızlık enerji seviyeleri işgal ederler (Şekil 2.5) [1,2]. Bu safsızlıkların iyonlaşma enerjileri çok küçük olduğundan oluşan enerji seviyeleri valans veya iletim bandına çok yakındır. Bu safsızlık enerjii seviyeleri genelde iletim(veya valans) bandına çok yakın olup bandlar ile bu safsızlık seviyeleri

arasında elektron geçişini sağlamaya yetecek minimum enerji safsızlıkları, iyonlaşma enerjilerine eşittir [1,2].

2.2. Metal-Yarıiletken Kontak

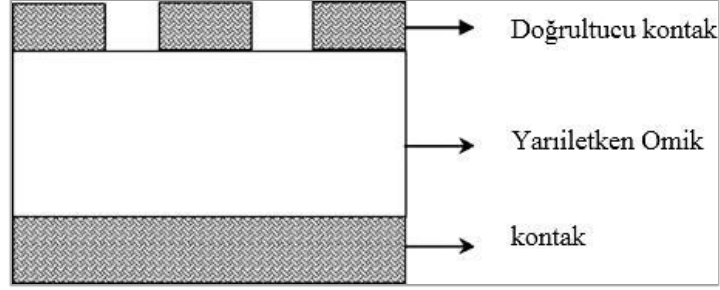
Yarıiletken, yalıtkan ve metal kristallerin iletkenlik özellikleri ile ilgi çalışma yapabilmek, uygun kontakların kristallere uygulanması ile mümkün olacaktır. Kontak, iki maddenin en düşük değerli direnç ile, ideal kontak da ise, sıfır değerli dirençle etki ettirilmesidir. İdeal kontak, yüzeylerin pürüzsüzlük, hijyenlik ve parlaklık gibi parametrelerine bağlıdır [1].

İki madde(metal/metal, metal/yarıiletken, yarıiletken/yarıiletken) kontak şekline dönüştürüldüğünde aralarındaki yük alışverişi sonucunda yeni denge durumu hali ortaya çıkar ve her iki maddenin Fermi enerji düzeyleri eşitlenir. Meydana gelen güncel yük dağılımı sonucunda kontak bölgesinde bir dipol tabakası oluşur. İki metal arasında meydana gelen kontak durumunda, kontakın her iki tarafında ki yüzey yükleri sebebiyle dipol tabakası meydana gelir. Meydana gelen bu kontak, omik kontak olarak adlandırılır(elektronların her iki yönde serbestçe hareket edebilmeleri sonucunda oluşur). Eğer, kontakı meydana getiren maddelerden biri yarıiletken, diğeri metal ise meydana gelecek kontak doğrultucu ya da omik olabilir.

Doğrultucu kontak(Schottky kontak), akımın bir doğrultudaki hareketinin kolay iken diğeri doğrultudaki hareketinin çok daha zor olduğu kontakdır. Doğrultucu kontak durumunda elektronlar aynı yönde rahatça akarken, ters yöndeki akışları kontak bölgesinde meydana gelen potansiyel engeli sebebiyle zorlaşır. Bu durum maddelerin elektronik enerji-bant diyagramı ile direk ilişkilidir [3].

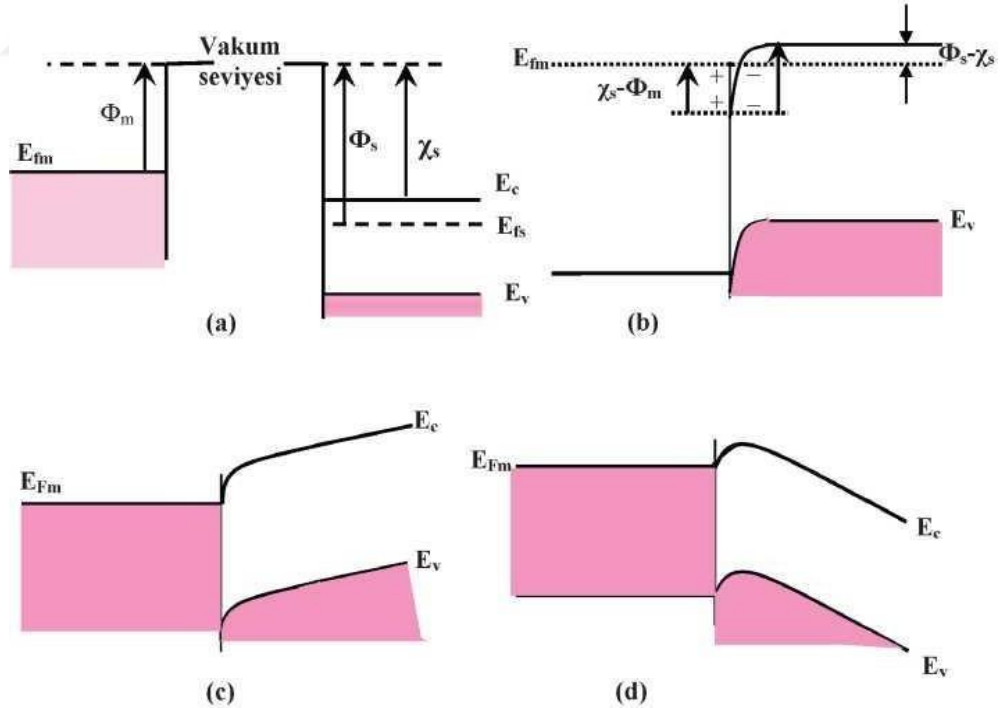
Schottky diyotlar yarıiletken malzemeler ile metal malzemelerin bir birleri ile kontak edilmesi sonucunda oluşmaktadır. Metal ile yarıiletken malzemelerin kontak işlemi gerçekleşikten sonra, termal denge sağlanıncaya kadar yarıiletken ile metal kristal arasında yük transferleri(difüzyon) meydana gelmektedir. Yarıiletken ile metalin Fermi enerji seviyeleri eşitleninceye kadar yük transferi bitmeyecektir. Kontak haline getirilen yarıiletken ile metal yapılar, metal-yarıiletken diye isimlendirilir ve iş

fonksiyonları türünden; Omik kontak ve Doğrultucu kontak olarak ikiye ayrılırlar (Şekil 2.6) [2,3].



Şekil 2.6 Schottky Diyotun Şematik Gösterimi [3]

Kontak durumuna getirilen maddeler, termal dengeye ulaşıldığında fermi enerji düzeyleri aynı seviyeye gelmekte ve yük transferleri olmaktadır. Bahse konu bu olay iki metal arasında olduğu gibi, metal ile yarıiletkenler (n -tipi veya p -tipi) arasında da meydana gelmektedir. Bir yarıiletkenin enerji-bant diyagramı Şekil 2.7'de görülmektedir [3].



Şekil 2.7 Metal / n -tipi Yarıiletken Omik Kontakta Ait Enerji - Bant Grafiği [3]

- a) Kontak oluşumundan Önce, b) Kontak oluşumundan Sonra, c) Ters Beslem Altında, d) Düz Beslem Altında

Bir metal ve bir yarıiletken madde diğer herhangi bir malzeme olmaksızın temasa geçtiğinde, oluşan metal-yarıiletken yapısı, her iki maddenin çalışma fonksiyonuna bağlı olarak metal yarıiletken kontaklar [3]:

- Taşıyıcı hareketi bir yönde diğerine göre çok büyük olan doğrultucu kontak,
- Taşıyıcıların bir maddeden diğerine kolaylıkla geçirilebilmekte olan omik kontak olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Katı hal elektronisinde yük ve potansiyel dağılımı nedeniyle doğrultucu ve omik kontakların akım iletim olaylarının ve fiziksel özelliklerinin hassas bir yeri bulunmaktadır [6, 7].

2.2.1. n-tipi Yarıiletken/Metal Omik Kontaklar

Günümüzde elektronik aletlerin büyük bir bölümü doğru akımla çalışmaktadır. Elektronik sistemlerde alternatif akımı doğru akıma çeviren bu işlem, diyotlarla gerçekleştirilmektedir. *n*-tipi bir yarıiletkenle *p*-tipi bir yarıiletkenin atomik boyutlarda üst üste gelmesiyle *p-n* eklem diyotu, bir yarıiletken ile metalin belirli koşullar altında yapılan işlemler sonucunda Schottky diyotu elde edilir. Metal/yarıiletken arayüzeyinde bir potansiyel engeli olduğu fikrinin ilk kez Schottky tarafında ortaya konulduğu için bu kontaklara atfen Schottky diyotlar veya Schottky kontaklar şeklinde isimlendirilmiştir [8]. Metal/yarıiletken kontaklarda yapılan doğrultma işlemi yarıiletkenin eklem tarafındaki deplasyon tabakası tarafından gerçekleştirilir [8,9].

Mikro elektronik aygıtların çoğunluğunun çalışma prensipleri, metal/yarıiletken ve *p*-tipi yarıiletken/*n*-tipi yarıiletken(*pn*-eklemi) kontakların fiziksel karakteristiklerine bağlıdır.

Butür kontakların sınır bölgesinde potansiyel engelleri meydana gelmektedir. Potansiyel engellerinin oluşması metal/yarıiletken arası veya *p*-tipi/*n*-tipi yarıiletkenler arası yük taşıyıcıların konsantrasyonlarının yeniden dağılmasına bağlıdır. Bu tür kontakların elektriksel özellikleri dışarıdan uygulanan gerilimin değeri ve yönü ile değişmektedir.

Yarıiletken kontaklar lineer olmayan akım-gerilim karakteristiklikler göstermektedir. Kontakların lineer olmayan özellikleri elektrik akımın doğrultulması, dönüşümü, amplifikasyonu veya elektrik sinyallerinin jenerasyonu için kullanılabilir. Bu tür doğrultucu eklemlerden diyotlar, transistörler, tünel diyotlar, Schottky diyotları yapılmaktadır [8, 9].

Metal/yarıiletken kontaklar bütün yarıiletken devre elemanlarında yer aldıkları için büyük bir öneme sahiptir. Schottky diyotların, yalıtkan ve yarıiletken kristallerin iletkenlik durumunun anlaşılabilmesinin bir yöntemi de kristale uygun kontakların yapılmasıdır. Kontaklar ara yüzeyin karakteristiklerine bağlı olarak ya bir Schottky engeli ya da bir omik kontak gibi davranmaktadırlar. Kontak, kristal ile kristale uygulanacak olan kontak malzemenin en az dirençle atomik boyutta temas etmeleri olarak düşünülebilmektedir. Kontakın ideal olması kontak malzemenin yüzeylerinin temiz ve pürüzsüz olmasıyla doğrudan ilişkilidir [8, 9].

Bir metal/yarıiletken eklem üzerindeki akım çoğunluk taşıyıcılarına bağlıdır. Başlıca üç farklı mekanizma bulunur: Bunlar; yarıiletkenden metale doğru taşıyıcıların difüzyonu, Schottky engeli üzerindeki taşıyıcıların termoiyonik emisyonu ve engel boyunca kuantum-mekaniksel tünellemedir. Difüzyon teorisi, deplasyon tabakasının genişliği üzerinden itici gücünün akıma katkı sağladığı varsayılmaktadır. Öte yandan termoiyonik emisyon teorisi, sadece metal/yarıiletken ara yüzeyindeki iletkenlik bant enerjisine eşit ya da daha fazla enerjiye sahip enerjik taşıyıcıların akıma katkısını kabul etmektedir. Engel boyunca kuantum mekaniksel tünelleme ise; elektronun dalga yapısının engelden geçmesine izin verdiğini düşünmektedir. Verilen bağtıda bu üç mekanizmanın bir birleşimi bulunmaktadır. Buna rağmen, baskın akım mekanizması olan sadece bir tanesi akımı oluşturmaktadır [10, 11].

İletkenliği sağlayan yük taşıyıcıları(elektronlar), metal/yarıiletken kontaklar da bir yönden diğer yöne daha kolay iletiliyorsa bu tür davranışa doğrultma denilmektedir. Yani; diyotun tam ilettime geçtiği voltaj değerinde, doğru beslem altındaki akımın, ters beslem altındaki akıma oranı "doğrultma oranı" olarak verilmektedir. Bu oran diyotun kalitesini önemli ölçüde belirlemektedir. İdeal diyotlarda doğrultma oranı(IF/IR) yaklaşık olarak, 108-1010 civarındadır [11].

Metal/yarıiletken kontakları iki kısımda incelemek mümkündür. Bunlar; iş fonksiyonlarına(ϕ_m ve F_s) bağlı olarak, omik ve doğrultucu(Schottky kontak) kontaklardır. N-tipi yarıiletken/metal kontaklarında $\phi_m > F_s$ ise; doğrultucu kontak, eğer $\phi_m < F_s$ ise; omik kontak oluşur. p-tipi yarıiletken/metal kontaklarında ise; $\phi_m < F_s$ durumunda doğrultucu kontak ve $\phi_m > F_s$ durumunda da omik kontak oluşmaktadır. Doğrultucu ve omik kontakların oluşumu kısaca; ϕ_m metalin ve F_s yarıiletkenin iş fonksiyonları olmak üzere, Tablo 2.3 'de verilmiştir [11, 12].

Tablo 2.3 İş Fonksiyonlarının Durumuna Göre, Omik ve Doğrultucu Kontakların Meydana Gelişi

İş Fonksiyonlarının Dururumu	Kontak Cinsi	Yarıiletkenin Cinsi
$\phi_m > F_s$	Doğrultucu	n-tipi
$\phi_m < F_s$	Omik	n-tipi
$\phi_m > F_s$	Omik	p-tipi
$\phi_m < F_s$	Doğrultucu	p-tipi

Bir Schottky engel diyotu(SED), pn eklem diyotuyla karşılaştırıldığında birçok avantaja sahiptir. Bu avantajlar ile kullanıldıkları yerlere göre gösterdikleri farklılıklar aşağıda ele alınmıştır [13, 14, 15]:

- Schottky engel diyotunda akım iletimi çoğunluk taşıyıcıları tarafından sağlanırken, bir pn eklemde ise; akım iletimi azınlık taşıyıcıları tarafından sağlanır. Bu da gösterir ki akımda bir azalma olmadığından ve veriminde daha yüksek olmasından dolayı Schottky engel diyotunda, yeniden birleşme(rekombinasyon) olmayacağı anlamına gelir. Ama bir pn eklemde ise; yeniden birleşme olacağından akımda azalma meydana gelir.
- Schottky engel diyotunda ters beslemde oluşturulan akımın sıcaklığa bağımlılığı oldukça düşük iken, bir pn eklemde ise ters beslemde oluşturulan akımın sıcaklığa bağımlılığı oldukça yüksektir. Yani bir FET'in(alan etkili transistör), kapı(gate) terminali Schottky engel diyotundan yapılmış ise; akım azalır ve sıcaklıktan hemen hemen bağımsız bir karakteristik gösterir. Genellikle kızılötesi yani IR(infrared)

dedektörleri negatif beslemde yani ters beslemde tutulur. Bunun için sıcaklıktan etkilenmemeleri çok önemlidir.

- Schottky engel diyotunda anahtarlanma hızı, enjekte edilen elektronların termal hızları ile kontrol edilirken, pn eklemünde anahtarlama hızı, enjekte edilen azınlık taşıyıcıların yeniden birleşmesiyle(rekombinasyon) kontrol edilir. Buna göre Schottky engel diyotunun, çok daha yüksek frekans uygulamalarında kullanılabileceği durumu ortaya çıkar. Ancak bu uygulamalarda Schottky engel diyotu için kullanılan metal yeterince ince yani, yarı geçirgen film şeklinde olmalıdır. Aksi takdirde, gelen ışığın şiddetinin düşmesine neden olur.

- Schottky engel diyotunu ilettime geçirmek için gerekli olan cut-in(turn-on) gerilimi oldukça küçük iken, pn eklemine ilettime geçirmek için gerekli olan gerilim daha büyüktür. Buda eklemde daha az enerji harcaması anlamına gelir ve dolayısıyla daha az ısınmasına neden olur.

- İdealde Schottky engel diyotunda yeniden birleşme olayı(rekombinasyon) olmadığından, idealite faktörü yaklaşık olarak 1,0'dir. Ama pn eklemde deplasyon bölgesindeki yeniden birleşmeden dolayı idealite faktörü yaklaşık olarak (1,2-2,0) arasındadır.

- Schottky engel diyotunun oluşturulması, teknolojik açıdan bir pn eklemine oluşturulmasından oldukça kolaydır. Ayrıca pn eklemde genelde aynı malzemenin hem n -tipi hem de p -tipini elde etmek mümkün olmamakta, mümkün olsa bile aynı özelliklere sahip olamamaktadır. Mesela; mobiliteleri; birbirinden farklı olmakta, buda eklemde verimli çalışmasını engellemektedir.

- pn eklemiyle yapılan bir dedektörde kullanılan malzemenin cinsine bağlı olarak, mesela Si'ü ele alalım; gelen parçacık veya foton enerjisinin, kullanılan malzemenin yasak enerji aralığından daha büyük olması gerekmektedir.. Aksi durumda durumda bir IR dedektörü yapımı mümkün olmaz. Ama böyle bir yapı Schottky engel diyotu

kullanılarak, rahatlıkla elde edilebilir. Çünkü engel yüksekliği kontrol edilebilmektedir. Genellikle de pn metali kullanılmaktadır. Bunun dışında pn eklemesinde kullanılan yarıiletkenin yasak enerji aralığı, gözlenen fotonun enerjisinden küçük seçilmelidir.

2.3. Metal (Omik)/ n -tipi Yarıiletken/Metal (Doğraltucu) Yapı

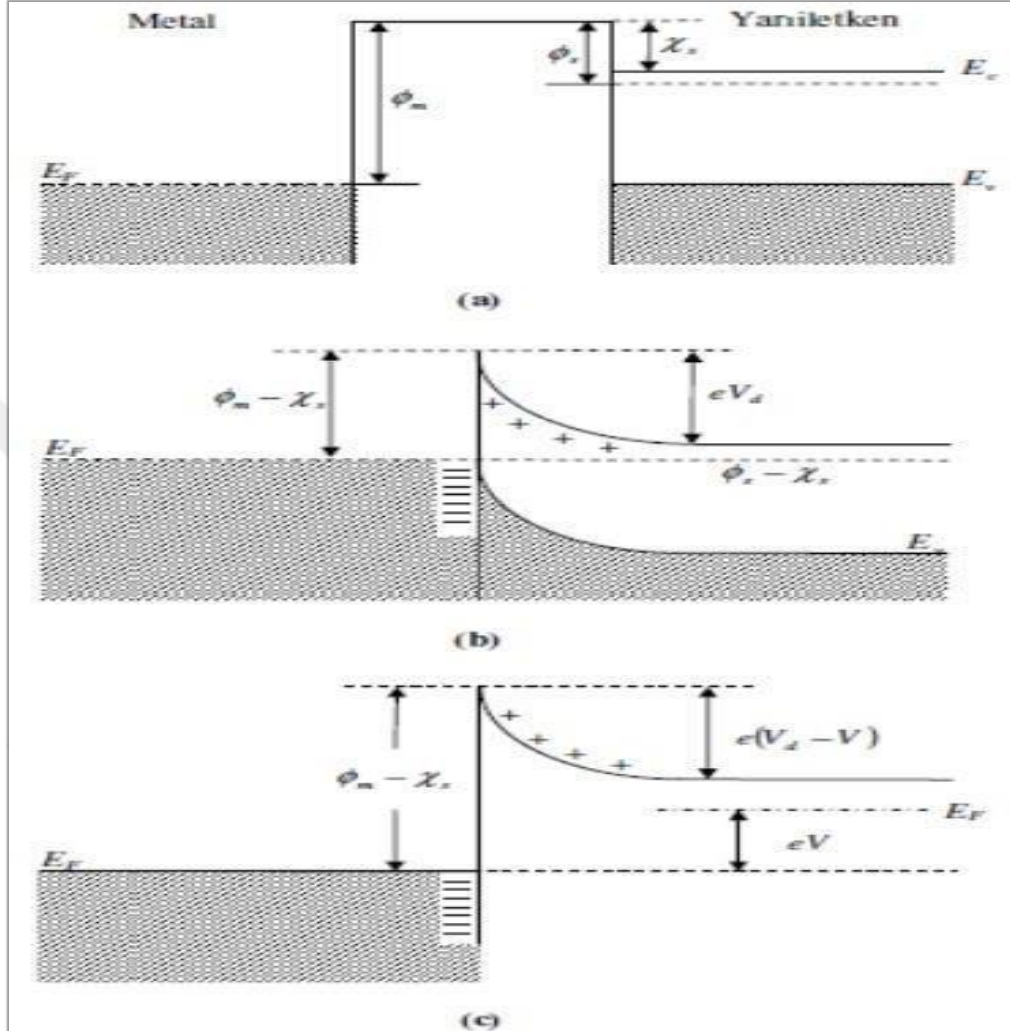
Doğraltucu kontaklar da akım taşıyıcıları (boşluk ve elektron) bir doğrultuda rahatça hareket ederken, potansiyel engelinden ötürü diğer yönde hareketleri zorlaşır. Metalin ve n -tipi yarıiletkenin iş fonksiyonuna bağlı olarak ($\phi_m > F_S$) ise metal/ n -tipi yarıiletken doğraltucu kontak oluşmaktadır. Burada ϕ_m metalin iş fonksiyonu, F_S ise yarıiletkenin iş fonksiyonudur. Oluşan bu kantağa Schottky kontak da denir [15].

Kontaktan önce yarıiletken fermi seviyesi metalin fermi düzeyinden üsttedir. Kontakın oluşturulmasından sonra meydana gelen yük transferiyle yarıiletkenin yüzeyindeki elektronlar, iyonize olmuş donörler bırakarak metale geçerler. Bu yük transferi bittikten sonra yarıiletken ve metalin Fermi düzeyleri aynı seviyeye gelir. Bir başka söylemle; yarıiletkenin enerji seviyeleri, iş fonksiyonları farkı ($\phi_m < F_S$) kadar alçalmaktadır. Kontak yapıldıktan sonra denge hali oluşana kadar yarıiletken ve metal arasında yük alışverişi meydana gelir. Yarıiletkenin yüzey tabakasından elektronlar, geride iyonize olmuş donörler bırakarak metalin içine doğru geçmektedirler. Bu yük alışverişi Fermi seviyeleri aynı oluncaya kadar devam etmektedir [3,16].

Yarıiletkenin Fermi seviyesi, aradaki enerji farkı kadar alçalmakta olup, metalin Fermi seviyesiyle aynı düzeye gelmektedir. Yarıiletken tarafındaki uzay yükleriyle (yarıiletkenin yüzey tabakasından kalan iyonize olmuş donörler) metal tarafındaki yüzey yüklerinin meydana getirdiği dipol tabakası kontakta bir potansiyel engelinin meydana gelmesine sebep olmaktadır. Metal n -tipi yarıiletkenin kontaktan önceki ve sonraki enerji bant diyagramı Şekil 2.7' de verilmiştir.

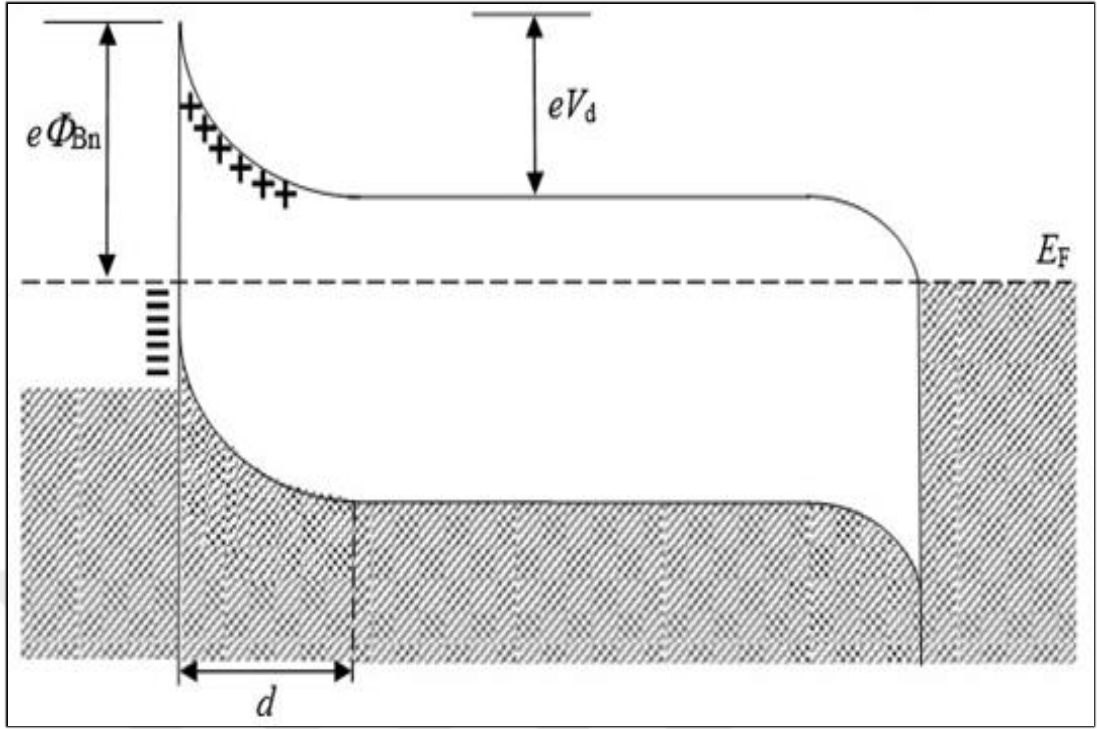
Bu potansiyel engelinin yarıiletken tarafındaki değeri;

$eV_d = \phi_m - F_s$ 'dir. Burada metal yüzeyine göre ölçülen V_d potansiyeline difüzyon potansiyeli denir [17].



Şekil 2.8 Kontaktan Önce ve Sonra n-tipi Yarıiletken ve Metale Ait Enerji-Bant Diyagramları [8]

n-tipi yarıiletkenin bir yüzeyine doğrultucu kontak, diğer yüzeyine elektron bakımından çok zengin omik kontak, uygulanmasıyla elde edilir. Omik kontak tarafı $V < 0$ olacak şekilde beslendiğinde yapı doğru beslemde, $V > 0$ olacak şekilde beslendiğinde yapı ters beslemde olur. Bu şekildeki yapılar, yarıiletken diyot olarak adlandırılır (Şekil 2.8).



Şekil 2.9 Yarıiletken Diyodun Enerji-Bant Diyagramı [9]

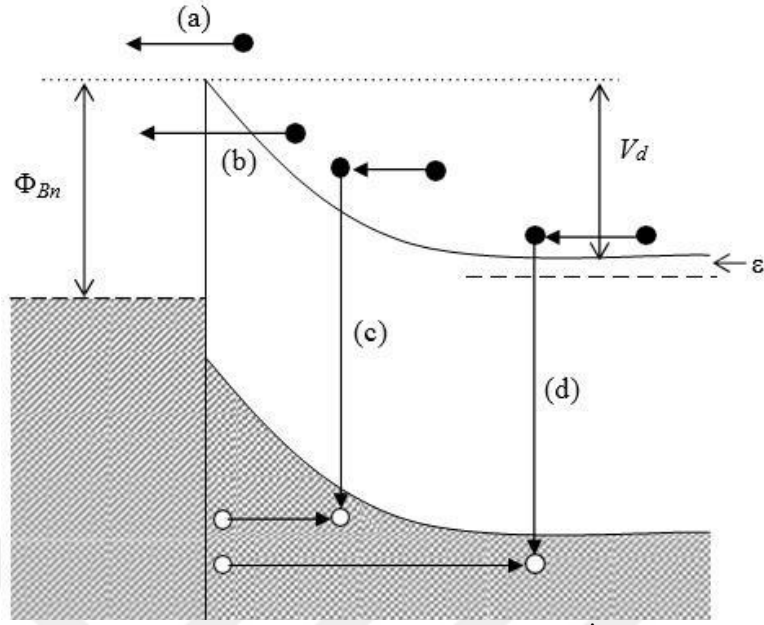
2.4.Metal-Yarıiletken Schottky Diyotlarda Akım İletimi ve Termiyonik Emisyon

2.4.1.Metal-Yarıiletken Schottky Diyotlarda Akım İletimi Mekanizmaları

Düz beslem altında n-tipi bir yarıiletken için eklem boyunca elektronların taşınabileceği çeşitli yöntemler şunlardır (Şekil 2.9) [18]:

- (a) Elektronların, yarıiletkendeki engelin üstünden aşarak metalin içine yayınlanmaları,
- (b) Engelin bir tarafından diğer tarafına kuantum mekaniksel tünelleme,
- (c) Uzay yükü bölgesinde rekombinasyon,
- (d) Nötr bölgedere kombinasyondur.

(a) Durumunun çok önemli olduğu böyle elde edilen diyotlar genellikle ideal olarak görülmektedir. (b), (c), ve (d) işlemleri ise ideal durumdan uzaklaşmaya sebep olmaktadır.



Şekil 2.10 Düz Beslem Altında Schottky Engeline Akım İletim Mekanizmaları

2.4.2. Termiyonik Emisyon Teorisi

Taşıyıcıların sıcak bir yüzeyden salınması, Termiyonik Emisyon anlamına gelir. Metal yarıiletken doğrultucu kontaklarda bu olay, metal ya da yarıiletken tarafındaki taşıyıcıların potansiyel engelini ısısal enerjileri sebebiyle aşması olarak tanımlanır. Bu olay metal *p*-tipi yarıiletken oluşumlarında boşluklar tarafından sağlanır.

Bethe'nin termiyonik emisyon teorisi aşağıdaki kabuller altında türetilmiştir [19]:

- Termal denge kurulmuş olup, net akımın akması bu dengeye etki etmez.
- Engel yüksekliği, kT enerjisi değerinden çok büyüktür.
- Engel bölgesinde taşıyıcı etkileşimleri olmaz. Buna göre taşıyıcıların ortalama serbest yolları Schottky bölgesinin kalınlığından daha da büyüktür.
- Görüntü kuvvetlerin etkisi göz ardı edilmektedir.
- Engel görüntüsünün şekli önemsiz olup, akım değeri engel yüksekliğine bağlıdır.
- Net akım hareketi bu dengeden etkilenmez. Bu yaklaşımlara göre akım hareketi sadece engel yüksekliğine bağlıdır [20].

Potansiyel engelini geçmeye yetecek enerjiye sahip olan ve yarıiletkenden metale doğru hareket eden elektronların oluşturduğu akım,

$$J_{SM} = \int_{E_f + q\phi_B}^{\infty} q\vartheta x dn \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada V_x elektronların hızı, d_n , küçük bir enerji aralığındaki elektron yoğunluğu ve $(E_f + q\phi_B)$ metalden TE için gerekli minimum enerjidir. Bu ifade yardımıyla yarıiletken malzemedan metal malzemeye doğru hareket eden elektronlar için akım,

$$J_{SM} = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (2.2)$$

şeklini alır. Burada A^* , (2.1) denklemindeki ilk terime karşılık gelir ve Richardson sabiti olarak adlandırılır. Diğer taraftan metal tarafındaki engel yüksekliği değişmediğinden yarıiletkene akan elektronların oluşturduğu akım değeri uygulanan gerilime bağlı olmayıp,

$$J_{SM} = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilir. Sonuç olarak net akım yoğunluğu bu iki akımın (denklem(2.2) ve denklem(2.3)) toplamları olup,

$$J = \left[A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilir. (2.4) ifadesindeki parantezli ilk terim doyma akımı yoğunluğudur.

2.5. Schottky Diyot Yapılarında İdealden Sapmalar

Schottky engel diyotları gibi cihazlar için pratikte ideal davranıştan sapmaya sebep olabilecek hata kaynakları, metal ile yarıiletken arasında ara yüzey tabakasının olması, yarıiletken yüzey yükü ya da arayüzey durumunun uygulanan gerilimle varyasyonu, yarıiletken külçenin nötral bölge direnci, arınma bölgesi genişliği ile etkin kontak alanındaki değişimler ve engel yüksekliğinin gerilime bağlı imaj-kuvvet

etkisiyle azalmasından başka arınma bölgesindeki tuzaklar şeklinde bildirilmiştir. Bunlar içinde düz beslem akım-voltaj karakteristiklerini etkileyen en önemli iki sebep, ara yüzey tabakasının etkisi ve seri direnç etkisidir [21].

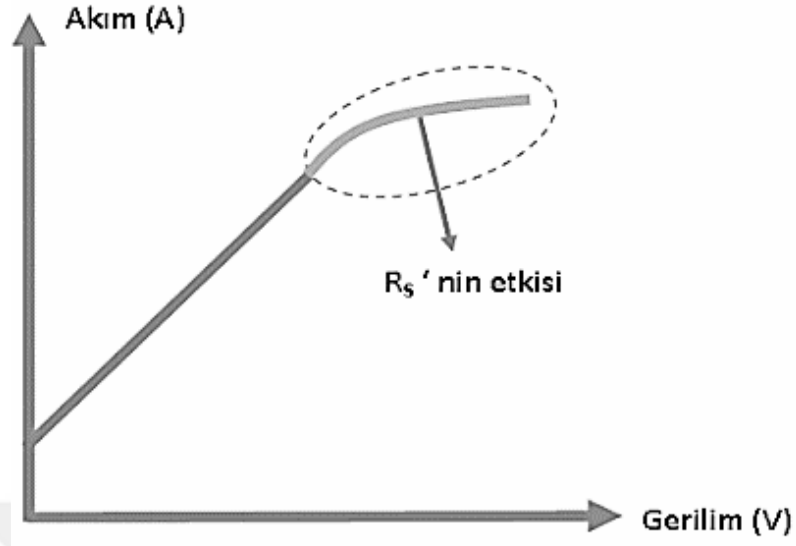
2.5.1. Arayüzey Tabakası Etkisi

Yarıiletken çok yüksek bir vakumda yarılarak üretilmedikçe, Schottky diyotlarda hemen hemen her zaman metal ve yarıiletken arasında ince bir oksit tabakası bulunur. Bu ara yüzey tabakası ince olsa bile, bir yalıtkan olarak göz önüne alınabilir. Yalıtkan tabaka üç etkiye sahiptir [22]:

- Yalıtkan tabaka boyunca potansiyel düşmesi yüzünden, sıfır beslem engel yüksekliği ideal bir diyottakinden daha düşüktür.
- Uygulanan bir düz beslem gerilimi için akım, Rn^* değerindeki azalmaya denk olacak şekilde azalır; bu durumda elektronlar yalıtkan tarafından oluşturulan engelin içinden tünelleme yaparak geçmek zorundadırlar.
- Uygulanan düz beslem geriliminin bir kısmı metal ile yarıiletken arasında oluşan arayüzey tabakasından düşer. Bu durumda, engel yüksekliği düz besleme geriliminin bir fonksiyonu olur. Engel yüksekliğinin bu beslem bağımlılığı, etkisi n idealite faktörü cinsinden tanımlanacak bir tarzda akım-gerilim karakteristiğinin şeklini değiştirmektedir.

2.5.2. Seri Direnç Tesiri

Metal yarıiletken doğrultucu kontakları durumunda, yarı iletken taraftaki biriktirme bölgesinin dışındaki nötr bölge, diyot akımına direnç gösterir ve R_s sembolü ile ifade edilir. Bu tesir, yüksek voltajda baskın hale gelir ve diyot akımının değerinin azalmasına neden olur. Şekil 2.11'deki bir Schottky diyotu, yüksek voltaj uygulandığında, seri direncin doyma etkisinin neden olduğu diyot akımınının değerindeki düşüşü göstermektedir [23].



Şekil 2.11 Metal/Yarıiletken Kontakta Seri Direncin Tesiri [23]

Bir diyodun kötü performans sergilemesinin sebeplerinden biriside seri dirençtir. Ters beslemde ideal bir diyot oldukça yüksek bir direnç gösterir. Düz beslemde uygulanan gerilim arttıkça direnç üstel olarak düşer. Bir yapıda meydana gelen seri direnç 5 farklı kaynaktan oluşur. Bunlar;

- Yarıiletken gövde içerisindeki düzensiz katkı dağılımından açığa çıkan,
- Yarıiletken omik kontak ve tüketme tabakası arasındaki gövde direncinden açığa çıkan,
- Kontak arasına oturtulmuş kirli bir film tabakası ile yarıiletken gövde veya bir parçacıktan oluşur,
- Yarıiletken kristale etki ettirilmiş omik kontakten oluşur,
- Kontaklardan elektriksel değeri hesaplamaları için alınmış tellerden oluşan direnç şeklindedir.

Yarıiletken içerisindeki düzensiz katkıları yüksek öz dirençli bölgeler meydana getirebilir. Bu sonuç yavaş taşıyıcı yoğunluğunu meydana getirir. Genelde yarıiletken gövdesinden gelen seri direnç değeri çok küçüktür ve yok sayılabilir. Seri direnç özellikle admittans tekniği kullanılarak yapılan ara yüzey durum yoğunluğu hesaplamalarında büyük hatalara sebebiyet verebilir. Seri direnç tesiri, gerek

numunenin yapım aşamasında gerekse ölçüm aşamasında çeşitli tekniklerle azaltılabilir. Örneğin omik kontak direnç değeri, ısı uygulanarak metalin yarıiletken yüzeyine çöktürülmesi ile azaltılabilir. Bir diğer yöntem de, değeri elde edilmiş admittans değerleri üzerinde değişim yapıldıktan sonra parametre tayini hesaplamalarına devam etmektir. Seri direnç, yapının $I-V$ eğrilerinde de özellikle yüksek voltaj değerlerinde istenmeyen bükülmeler(ideallikten sapmalar) meydana getirir.

2.5.3. Seri Direnç Ölçme Yöntemleri

Bir metal/yarıiletken diyodun $I-V$ ölçüm verileri kullanılarak seri direncinin tayin edilmesi için değişik yöntemler vardır. Bunlar, Norde yöntemi [15], Sato ve Yasamura [16] yöntemi ki, bu modifiye Norde yöntemi olarak da anılır ve ideallik faktörünün 1'den büyük olduğu durumlar için geliştirilmiştir. Diğer taraftan değişik sıcaklıklar kullanılarak elde edilen seri direnç yöntemi (McLean) [17] ve bir diğeri de Cheung [18] yöntemidir ki bu da seri direncin etkin olduğu yüksek voltaj bölgesinde kullanılır.

2.5.3.1. Norde Yöntemi

Metal-Yarıiletken yapıların bir çok özelliklerini ve akım hareketlerini önceki kısımlarda bahsedilen yöntemlerle incelemiştik. Seri direnç, idealite ve engel yüksekliği gibi fiziksel(elektronik) parametrelerin özellikle yüksek seri dirence sahip metal-yarıiletken kontaklarda tayin edilmesi amacıyla, geliştirilen yöntemlerden biri olan Norde yöntemidir. Norde tarafından geliştirilen yöntemde göre $n = 1$ durumu için $F(V)$ fonksiyonudur. Bu fonksiyon engel yüksekliği ve seri direnci tanımlar. Norde yöntemi R_s ve J_b parametrelerinin sıcaklıkla değişmediği durumlarda geçerliliği olduğu için sadece bir sıcaklıkta $I-V$ eğrisine ihtiyaç duyulur.

İdealite faktörünün 1'den büyük olduğu durumlarda da $n(1 < n < 2)$, R_s ve J_b değerinin hesaplanabileceğini gösteren Sato ve Yasamura, Norde tarafından sunulan yöntemi geliştirmişlerdir. Sato ve Yasamura'nın geliştirdiği bu yöntemle R_s ve J_b parametrelerinin hesaplanmasında sıcaklık değerinin değiştiği ortamlarda da

uygulanabileceğinden en az iki farklı sıcaklık değerine sahip $I - V$ eğrisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yöntemle benzer çalışmalar Mc Lean tarafından da öne sürülmüştür.

Schottky diyotların akım-gerilim karakteristikleri aşağıdaki fonksiyon kullanılarak gösterilmiştir:

$$F(V) = \frac{V}{2} - (\beta^{-1}) \ln(1/AA^*T^2) \quad (2.5)$$

Yukarıdaki denklemden yola çıkarak bir çok Schottky diyotunun seri direnç değerlerinden engel yüksekliklerine ulaşılabilir.

Hesaplanan Schottky diyotlarının $I - V$ karakteristiklerinden Schottky engel yüksekliği Φ_B değerlerinin hesaplanabilir şekle gelmesi için formülündeki fonksiyonun fit değerlerini içine alan standart bir yaklaşım Rhedorick (1978) tarafından geliştirilmiştir.

$$I = I_s e^{\beta V/n} \quad (2.6)$$

Eğrinin extrapole edilmesi suretiyle akım eksenini kestiği noktadan Schottky engelin büyüklük değeri hesaplanabilir. Bu duruma ilave olarak $\ln(I) - V$ eğrisinin seri direnç değeri çok büyük ve doğrusal bölgesi de yoksa, böyle bir durumda standart yaklaşımı uygulamak çok zordur. Neyse ki $F(V)$ eğrisinin kullanılmasıyla böyle bir durumda ortadan kalkmıştır. Bu fonksiyon aşağıdaki ifade şeklinde yazılır:

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{1}{AA^*T^2}\right) \quad (2.7)$$

Yukarıdaki verilen ifadede A^* değiştirilmiş Richardson sabiti, alanını ifade eden büyüklükte A şeklinde gösterilmiştir. Şayet $F(V)$ değerlerinin gösterdiği değişime karşılık gelen seri direnç değeri mevcut değil ise şu yöntem izlenir; Öncelikle $F(V)$ 'ye karşılık olarak $V = -I/2$ ile verilir ve Schottky engel yüksekliğinin değerini, grafik eğrisinde extrapole (bilinenden hareketle bilinmeyeni tahmin etme metodu)

edilerek $F(V)$ değerlerinin bulunduğu eksenini kestiği nokta verir. Fonksiyon değerinin asimptotik olarak $+1/2$ 'nin bir gradientin değeri ile aynı olduğu durum vardır oda tek bir seri direncin olduğu durumdur, f olur. Farklı iki senaryoda da V_0 değerinde bir minimum vardır. Engel yüksekliği (ϕ_B) ve seri direnç değeri (R) aşağıda verilmiştir:

$$\Phi_B = F(V_0) + \frac{V_0}{2} - \frac{1}{\beta}, \quad R = (\beta I_0)^{-1} \quad (2.8)$$

Yukarıdaki ifadelerdeki I_0 , V_0 doğru beslem değerindeki minimum akım ve ona karşılık gelen voltaj ölçüsüdür.

Engel yüksekliğinin değeri farklı iki senaryoda şu şekilde bulunur; Birinci senaryo, çok küçük seri direnç değeri mevcut ise grafik eğrisinde extrapole (bilinenden hareketle bilinmeyeni tahmin etme metodu) edilerek $F(V)$ değerlerinin bulunduğu eksenini kestiği noktadan ya da eğer çok büyük direnç değeri mevcut ise minimum $F(V)$ değerinde ki pozisyonundan hesaplanabilir.

1979 Norde'un ortaya koyduğu metod, çok büyük değerlere sahip seri dirençlerin ara yüzey düzensizliklerinden bağımsız olarak ideal diyotlar için Φ_B değerini belirlemek üzere izlenen standart yöntemdir. Buna ilave olarak Φ_B değerinin iletim mekanizması ya da voltaj bağımlılığı termiyonik emisyonrakine benzer olarak hesaba dahil edilmez. Termiyonik alan emisyon eğrisinin göz ardı edilmesine hafifçe dop edilmiş diyotlarda sürekli rastlanır. Bunun sebebi büyük ölçüde geniş engellerin tünelleme olasılığını odasicaklığında tünelleme mekanizmasının güvenli bir şekilde göz ardı edilebileceği bir seviyeye düşürmesidir. Lakin bazı hallerde rekombinasyon etkilerinin ihmal edilmesi ve deplasyon bölgesinde lokalize olmuş hallerde taşıyıcıların tuzaklanması doğru olmaz. Doğru akım için bir rekombinasyon ögesi, yarıiletkenin enerji bandının enerjisine sahip lokalize olmuş haller aracılığıyla meydana gelen arınma bölgesini geçebilen taşıyıcılar ile meydana gelir. Rekombinasyon merkezleri, paralel iletim örneğini sağlar ve $I-V$ karakteristikleri hemen hemen aşağıdaki verilen formül ile ifade edilebilir:

$$I = I_S(e^{\beta(V-IR)} - 1) + I_r(e^{\beta(V-IR)/2}) \quad (2.9)$$

I_r : Asal taşıyıcı konsantrasyonunun ve deplasyon bölgesi boyunca taşıyıcı yaşama zamanı ile ters orantılı ve deplasyon tabaka genişliğinin direkt olarak bir oranıdır.

Rekombinasyon bileşeni düşük değerli sıcaklıklardaki ideal lineer hareketten sapan $F(V)$ 'ye neden olur bu da $V=0$ da $F(V)$ ' nin minimumunda bir yön değişimine sebep olur. Şayet $F(V)$ büyük bir rekombinasyon ögesine sahip Schottky engel yüksekliklerinde elde edilerek kullanılıyorsa engel yüksekliği düşünülen değer altında bir değer olacaktır. Meydana gelen bu zorluk, standart yaklaşımda da vardır. Orijinal bir yaklaşımı olan Norde, Φ_B değerinin voltaja bağımlılığını göz ardı eder ve bunun $F(V)$ değerine tesiri engel yüksekliğinin voltaj değerine bağımlılığının lineer ve $F(V) = \Phi_B - \Delta\Phi$ (bu eşitlikte sıfır beslemdeki engel düşmesidir)'ye eşit olduğunu kabul etmekle ortaya çıkarılabilir. Bu sayede $F(V)$ ifadesi (2.10) daki şeklini almaktadır.

$$F(V) = \Phi_B - \Delta\Phi + IR - \frac{V}{2}(1 - 2\alpha) \quad (2.10)$$

Düşük voltaj bölgesinde $F(V)$ değerlerinin eğimi $-1/2$ den $+1/2$ ye değişir ve eğrinin V_0 'da kesilmesi ile $F(V)$, asal Schottky engelin yüksekliğine(Φ_B) eşit olur ($\Delta\Phi$ değişimi ile). Φ_B değerinin voltaja bağımlılığı eğrinin eğimini farklılaştırır ve böylelikle minimum değer durumunda farklılık gösterir. Bunun yardımıyla $F(V)$ değerlerinden $\Phi_B - \Delta\Phi$ ifadesi için doğru bir şekilde değer elde edebilmek Φ_B 'nin voltaj değerlerine bağımlılığının minimum durumunu nasıl etkilediğini öğrenmekle mümkün olur.

Schottky engel yüksekliği bahsedilen temel değişkenlere bağlı olarak şu ifade ile gösterilebilir:

$$\Phi_B - \Delta\Phi = F(V) + (1 - 2\alpha) \left(\frac{V_0}{2} - \frac{1}{\beta} \right) \quad (2.11)$$

1985' de Cibil & Buitrago Φ_B ve $F(V)$ değerlerinin voltaja bağımlılığı durumu ile ilgilenmişlerdir. Buna ilave olarak R'nin büyük olduğu hallerde sadece oda

sıcaklığında meydana gelen $I-V$ ölçümlerinden sade bir grafiksel yöntem elde edilememiştir. Norde yöntemi rekombinasyon-jenerasyon tesiri ve voltaja bağlı engel yüksekliğini kapsayacak bir şekilde genellenemez. Bu genellenenin yapılabilmesi için R , I_r , n , Φ_B parametrelerinin bazılarının biliniyor olması gerekir.

Netice olarak, voltaja bağlı engelin yahut rekombinasyon-jenerasyon akımlarının varlığında $F(V)$ 'nin minimumu olan V_0 'ın pozisyonunun değiştiği gözlenmiştir. Φ_B 'nin voltaja bağlılığı bir(1) değerinden daha büyük olan idealite faktörlerine sebep olur ve bu da Φ_B değerinin olduğundan daha büyük hesaplanmasına sebep olur. Şayet rekombinasyon akımı V_0 değerinden ΔV_0 kadar bir değişiklik oluşturursa bu Φ_B 'nin hemen hemen ΔV_0 farkıyla olduğundan daha küçük bir değer olarak hesaplanmasına sebep olur.

Norde metodunun çoğu pratik diyota uygulanması yalnızca Φ_B ve R değerlerinin yaklaşık olarak bir tahminini değerlerini ortaya koyar. Gerçekte çoğu durumda eğri fit etme prosedürünü kullanarak diyotun elektriksel özelliklerini tahmin etmek çok daha kolaydır. Bu duruma göre modifiye edilmiş Norde fonksiyonu,

$$F(V, \gamma) = F_R(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{V}{AA^*T^2} \right) \quad (2.12)$$

şeklinde ifade edilir. (2.12) denkleminde iki tarafın Ln'i alınıp (2.47)'de yerine yazılırsa,

$$F(V, \gamma) = F_R(V) = \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n} \right) V + \phi_B + \frac{IR}{n} \quad (2.13)$$

elde edilir. Seri direnc sıfır ise $F(V)-V$ eğrisi, eğimi $(n-\gamma)/n\gamma$ olan bir doğru olur. Seri direnç sıfırdan farklıysa ve (2.12) denklemindeki akım ifadesinin açık şekli yazılırsa,

$$F(V, \gamma) = F_R(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{V}{RAA^*T^2} \right) \quad (2.14)$$

elde edilir. (2.13) ifadesinin V 'ye göre türevi alınıp gerekli düzenlemeler yapılırsa,

$$\phi_B = F(V_0, \gamma) - \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n}\right) V_0 - \frac{(\gamma-n)}{(\beta n)} \quad (2.15)$$

ve

$$R_s = \left(\frac{\gamma - n}{\beta I_0}\right) \quad (2.16)$$

şeklinde ifade edilir.

2.5.3.2. Cheung Yöntemi

1986'da Cheung tarafından [24], metal/yarıiletken kontak yapısının doğru beslem I - V karakteristiklerinden yararlanarak Schottky diyot parametrelerinin hesaplanması işleminde, farklı bir model sunulmuştur. Termiyonik emisyonun bulunan diyotun etkin alanı A ile akım (J) çarpılırsa diyottan geçen toplam akım değerini veren ifade aşağıda verilmiştir:

$$I = AJ = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV}{kT} - 1\right) \quad (2.17)$$

Yukarıdaki ifade de $eV \gg kT$ ise, bir (1) göz ardı edilebilir. Pratikte uygulanan gerilimin tamamı deplasyon bölgesinde düşmediği hususu göz önüne alındığında, ideal bir durumdan sapmaların olacağı söylenebilir. İdeal bir halden sapmaları söyleyebilmek için sabit olan idealite faktörü (n -birimsiz) göz önüne alınıp akım denklemini aşağıdaki gibi yazabilir:

$$I = AJ = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV}{nkT} - 1\right) \quad (2.18)$$

Uygulanan bir gerilim V değerinin IR_s değeri kadarlık bir seri direnç üzerinde üşeceği için V ifadesi yerine $(V - IR_s)$ ifadesi yazıldığında aşağıdaki denklem edilmektedir:

$$I = AJ = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{e(V-IR_S)}{nkT} - 1\right) \quad (2.19)$$

Yukarıdaki eşitlikten aşağıdaki ifade elde edilmektedir:

$$V = \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{1}{AA^*T^2}\right) + n\Phi_B + IR_S \quad (2.20)$$

Yukarıdaki eşitliğin $\ln I$ 'ya göre türevi alınırsa aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_S \quad (2.21)$$

Φ_B , potansiyel engel yüksekliği ise, aşağıdaki ifade şeklinde yazılır:

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{1}{AA^*T^2}\right) \quad (2.22)$$

Yukarıdaki ifadeye göre, aşağıdaki $H(I)$ ifadesi yazılır:

$$H(I) = n\phi_B + IR_S \quad (2.23)$$

Yukarıdaki ifade Cheung fonksiyonları olarak bilinmektedir.

2.5.3.3. Missous Yöntemi

1985 yılında Missous & Rhoderick tarafından Schottky bir diyotun parametreleri değerlerinin hesaplamak için düz beslem ve ters beslem $I - V$ karakteristiklerinden faydalanarak yeni bir hesaplama yöntemi ortaya sürülmüştür. Termoyonik emisyon teorisinden bulunan akım ifadesi bir diyotun etkin alanıyla(A) çarpılırsa, diyottan hareket eden toplam akım, aşağıdaki ifade şeklinde yazılır:

$$I = AJ = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV}{nkT} - 1\right) \quad (2.24)$$

Genellikle uygulanan potansiyel tamamıyla arınma bölgesinde düşmemesinden dolayı idealden sapmalar olacaktır. Oluşacak bu sapmalar, boyutsuz bir sabit olan idealite faktörünü aşağıdaki gibi gösterilir:

$$I = AJ = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{eV}{kT}\right)\right] \quad (2.25)$$

Bu ifade de,

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_B}{kT}\right) \text{ olarak ele alınırsa;}$$

$$I = I_0 \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{eV}{kT}\right)\right] \quad (2.26)$$

Şeklinde yazılır, bu ifadeden de yola çıkarak;

$$I_0 \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) = \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{eV}{kT}\right)}$$

Bu ifadenin logaritması $(I/1 - \exp\left(-\frac{eV}{kT}\right) - V)$ alınarak çizilen doğrunun eğimi belirlenir ve grafiğin lineer kısmına fit edilen doğrunun $V = 0$ değerine denk gelen düşey eksenini kestiği yer doyma akımı (I_0) belirlenir.

Daha sonra sırasıyla n (idealite faktörü) ve ϕ_B (engel yüksekliği) değerleri hesaplanır.

2.6. Aygıt Karakterizasyonu

Schottky diyotları alçak katkı safsızlıklarına ve yüksek eklem engellerine sahip aygıtlardır. n -tipi bir yarıiletken için Schottky eklemının detaylı bir engel yapısı Şekil 2.16'da verilmiştir. Bir metal ile bir yarıiletkenin oluşturduğu bu eklem iki varsayıma dayanır [20].

beslem aşırı yüksek uygulanmadıkça akım hareket mekanizması termoiyonik emisyon teorisine uyar. Bu şekildeki yapının akım-voltaj ilişkisi,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qv}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.27)$$

şeklindedir. Burada I_0 , doyma akımı olup,

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left[\frac{-q(\Phi_{B0})}{kT}\right] \quad (2.28)$$

ifadesi ile verilir. Burada A , kontak alanı ve ϕ_{B0} , sıfır beslem engel yüksekliğidir. A^* , Richardson sabiti olarak adlandırılır. Bu sabit, yarıiletkendeki elektronların etkin kütlesi, engeli aşan elektronların kuantum mekaniksel bir yansımaları ve potansiyel engelin tepesi ile metal yüzeyi arasındaki elektronların fonon saçılması dikkate alınarak düzenlenmiş olup,

$$A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \quad (2.29)$$

ile ifade edilir.

Burada; h ve k sırasıyla Planck ve Boltzmann sabiti, m^* , taşıyıcının etkin kütlesidir. (2.30) ifadesi ideal bir diyodu tanımlar. (2.30) ifadesinin $\ln(I)$ - V grafiği bir doğruyu vermelidir. Aksi takdirde ideallikten sapma var demektir. Gerçekte, yapıya etki eden birçok faktörden dolayı her zaman ideallikten sapma vardır. Ara yüzey tabakasının varlığı veya tüketim bölgesindeki yeniden birleşme durumları ideallikten sapmanın birkaç örneğidir. Bu yüzden (2.28) ifadesi bir düzeltme faktörü ile yeniden ifade edildiğinde,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qv}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.30)$$

elde edilir. Buradan, sıcaklığa ve gerilime bağı olabilen ve $n>1$ olan ideallik faktörüdür. $n=1$ şartını sağlayan diyot İdeal bir diyot'dur.

2.7. Reaktif Boyar Maddeler

Bir cisme kalıcı şekilde renk veren organik yapıdaki maddeye Boyar madde denir. Bu maddeler doğal olarak hayvanlardan, bitkilerden, birçok maddenin karışımlarından veya sentetik yollardan elde edilebilmektedir ve bu boyar maddeler kâğıt, tekstil, gıda, plastik, deri, fotoğrafçılık ve kozmetik gibi birçok yerde kullanılmaktadır. Boyar madde içerisindeki renk veren yapıya kromofor denilmekte ve kromofor yapıların hepsi nitroso, nitro, azot ve karbonil grubu gibi çift bağ barındırmaktadır.

Boyar maddeler kimyasal yapılarına, boyama özelliklerine, çözünürlüklerine ve kullanım şekillerine göre birçok şekilde sınıflandırılabilir.

Boyar maddeler çözünürlüklerine göre;

- Suda Çözünen; Anyonik suda çözünen boyar maddeler, Katyonik suda çözünen boyar maddeler, Zwitter iyon karakterli boyar maddeler olarak ayrılır.
- Suda Çözünmeyen; Organik çözücülerde çözünen boyar maddeler, Polikondensasyon boyar maddeleri, Geçici çözünürlüğü olan boyar maddeler, Elyaf içinde oluşturulan boyar maddeler, Substratta çözünen boyar maddeler ve pigmentler şeklinde sınıflandırılır.

Boyama özelliklerine göre; Asit Boyar maddeler, bazik(katyonik) Boyar maddeler, Direkt Boyar maddeler(Substantif Boyar maddeler), Mordan Boyar maddeler, Reaktif Boyar maddeler, Küpe Boyar maddeler, İnkişaf Boyar maddeler, Dispersiyon Boyar maddeler olarak sınıflandırılır.

Kimyasal yapılarına göre; Nitro ve Nitrozo Boyar maddeleri, Azo Boyar maddeleri, Arilmetin Boyar maddeleri, Polimetin Boyar maddeleri, Karbonil Boyar maddeleri, Azo Annulen Boyar maddeleri ve Kükürt Boyar maddeleri olarak sınıflandırılır [25].

2.7.1. Coronene boyar maddenin yapısal özellikleri

Coronene boyar maddesi, yapısında altı tane kaynaşık benzen halkası içeren bir polisiklik aromatik hidrokarbondur (PAH) [26]. $C_{24}H_{12}$ süper benzene olarak da bilinir. Toluen, Diklorometan ve Benzen dahil yaygın solventlerde çözünebilen sarı renli bir maddedir. Solüsyonları UV ışığa maruz kaldığında mavi ışık floresansı çıkar. Pirene benzer bir çözücü sondası olarak kullanılmıştır. Bileşik, organik aromatikliği sebebiyle kimyagerler tarafından teorik olarak ilgi çekmektedir.

20 rezonans yapısı veya üç mobil Clar Sextets grubu ile tanımlanabilir. Clar sextet durumunda, coronene maddesinin en sağlam yapısı tamamen aromatik olarak izole edilmiş üç dış sextete sahip olmasına rağmen, bu sextet'ler bir sonraki halkaya geçebildiği zaman süper aromatiklik yine de mümkün olacaktır.

Coronene, sedimanter kayaya gömülü saf corone'nin pulları ile karakterize olan çok nadir mineral karpalit olarak doğal olarak oluşur. Bu mineral eski hidrotermal havalandırma faaliyetinden oluşturulabilir [27]. Daha önceki zamanlarda bu minerale karpalit ya da pendletonit de denirdi [28]. Coronene petrol rafine etme işleminde üretilir, burada triko olarak "dikoronilen" (formel olarak benzo phenanthro adı verilen on beş halkalı PAH'a dimerize edilebilir. Santimetre uzunluğunda kristaller, toluen içindeki moleküllerin aşırı doygun bir çözeltisinden (yaklaşık 2.5 mg/ml) büyütülebilir; bu, 12 saatlik bir süre boyunca 328 °K ile 298 °K arasında yavaşça soğutulur (yaklaşık 0.04 K/dakika) [29].

Coronene düzlemsel bir circulendir. Monoklinik, balıksırtı benzeri bir yapıya sahip iğne benzeri kristaller oluşturur. En yaygın polimorf γ 'dir, ancak β formu uygulanmış bir manyetik alanda da üretilebilir [29].

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

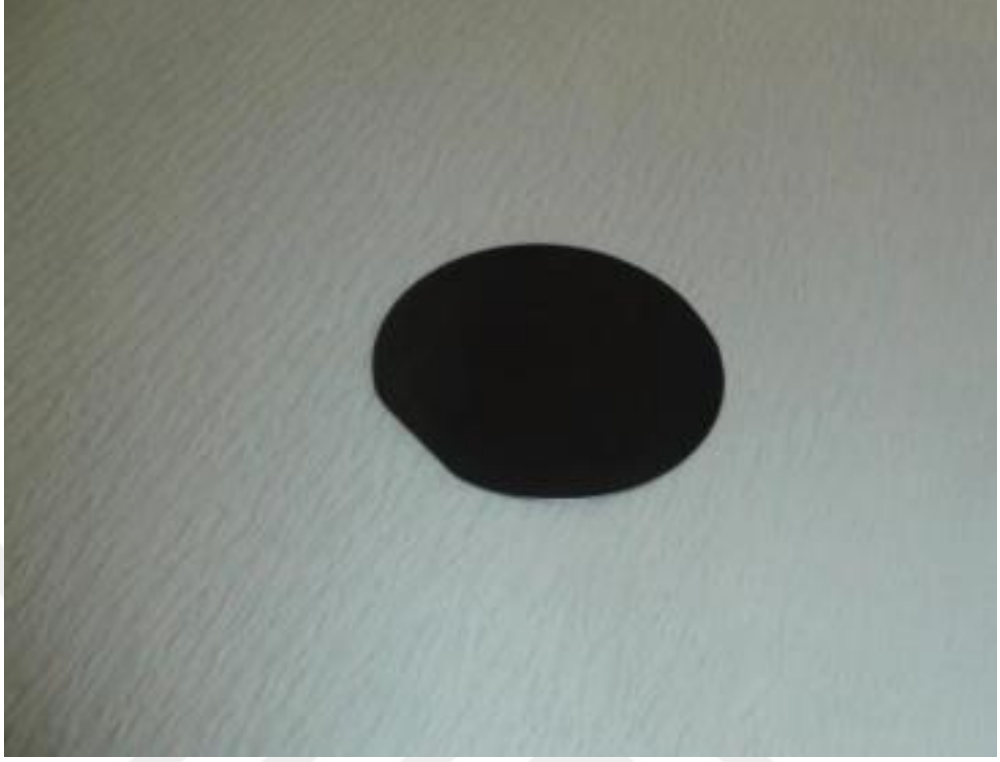
3.1. Yapıların Hazırlanması

Bu çalışmada diyot yapımında kullanılacak olan silisyum alt tabaka bir dizi kimyasal temizlik işlemlerinden geçirilmiştir. Bu işlemler, aygıt üretilmeden önce titizlikle yapılması gereken ve aygıtın elektriksel karakterizasyonuna etki edebilecek önemli bir aşamadır. Kimyasal temizlik aşamasının ardından sıra alt tabaka üzerinde kontak oluşumlarına gelir ki bu da Al/Coronene/*n*-Si metal/yarıiletken yapısını oluşturur. Son olarak oluşturulan yapılardan gerekli elektriksel bağlantılar alınarak ilgili ölçüm cihazlarıyla karakterizasyon işlemlerine başlanır.

3.1.1. Kristal Temizleme İşlemi

Kullanılan kristal, yurtdışından “Wacker-Siltronic” firmasından satın alınmış olup, yaklaşık 5 cm çapında, 250 mm kalınlığında, 5 Ω -cm öz dirençli, Boron katkılı ve (100) düzleminde kesilmiştir (Şekil 3.1).

Öncelikle kristal üzerindeki organik artıkları ve yağları temizlemek için bir beher içine trikloretilen konuldu ve silikon alt tabaka beher içine atıldı. Beher, Bandelin Sonorex marka bir ultrasonik banyo (Şekil 3.2) içerisinde 10 dakika kadar titreştirildi. Bir miktar aseton bir cam beher içerisine konuldu ve yaklaşık 55 dereceye kadar ısıtıldı. Silikon alt tabaka daha sonra bunun içine atılarak 10 dakika bekletildi. Buradan çıkarılan alt tabaka önceden beher içerisinde hazırlanmış metanol içerisine atıldı ve burada 5 dakika bekletildi. Sonrasında metanol içerisinden çıkartılan silikon alt tabaka, “Innovation Water Purification” sistemi (Şekil 3.3) ile üretilen 18 M Ω -cm öz dirençli deiyonize su ile bolca durulandı. Durulanan silikon kristali kuru azot ile kurutuldu. Buraya kadar yapılan tüm işlemler silikon alt tabaka üzerindeki olası yağları almak içindir.



Şekil 3.1 Coronene katkılı *n*-tipi Silisyum kristali.



Şekil 3.2 “Bandelin Sonorex” marka ultrasonik banyo.



Şekil 3.3 “Innovation Water Purification” marka deiyonize su sistemi.

Organik artıkları uzaklaştırmak için ise RCA işlemine geçildi. Bunun için bir beher içine 325 ml deiyonize su, 65 ml NH_4OH (27%)(amonyum hidroksit) konuldu ve 70 dereceye kadar ısıtıldı (Şekil 3.4). Daha sonra ısıtılan bu karışımın içerisine 65 ml H_2O_2 (30%)(hidrojen peroksit) eklendi ve solüsyon içinde kabarcıklar oluşana kadar beklenildi. Solüsyonda etkileşme başlamasından yani kabarcıkların oluşmasından hemen sonra silikon kristali bu karışımın içine atılarak 15 dakika beklenildi. İşlem sonunda silikon kristal yine 18 $\text{M}\Omega\text{-cm}$ dirençli deiyonize su ile bolca durulandı. Sonra sıra silikon üzerindeki oksit tabakasını uzaklaştırma işlemine geldi. Bunun için HF(hidroflorik asit) kullanıldı. Bir teflonbeher içerisine 480 ml deiyonize su konuldu ve üzerine 20 ml HF ilave edildi. Silisyum alt tabaka bu karışım içerisinde 2 dakika kadar bekletildi. Daha sonra kristal bolca deiyonize su ile çalkalanıp sonrasında azot gazı ile kurutuldu. Diğer taraftan diyot yapımında kullanılacak olan alüminyum metalleri de aynı temizlik aşamalarından geçirildi.



Şekil 3.4 Kristal temizliği aşamasında kullanılan ısıtıcı düzeneği.

3.1.2. Al/Coronene/n-Si Yapılarının Oluşturulması

Al/Coronene/n-Si yapılarını oluşturmak için “Edwards” marka evaporasyon sistemi kullanıldı (Şekil 3.5). Bu sistem, bir rotary(dönerek işleyen) ile difüzyon pompasından oluşmuş olup, evaporasyon işlemleri vakum altında bir cam fanus içerisinde gerçekleşir.

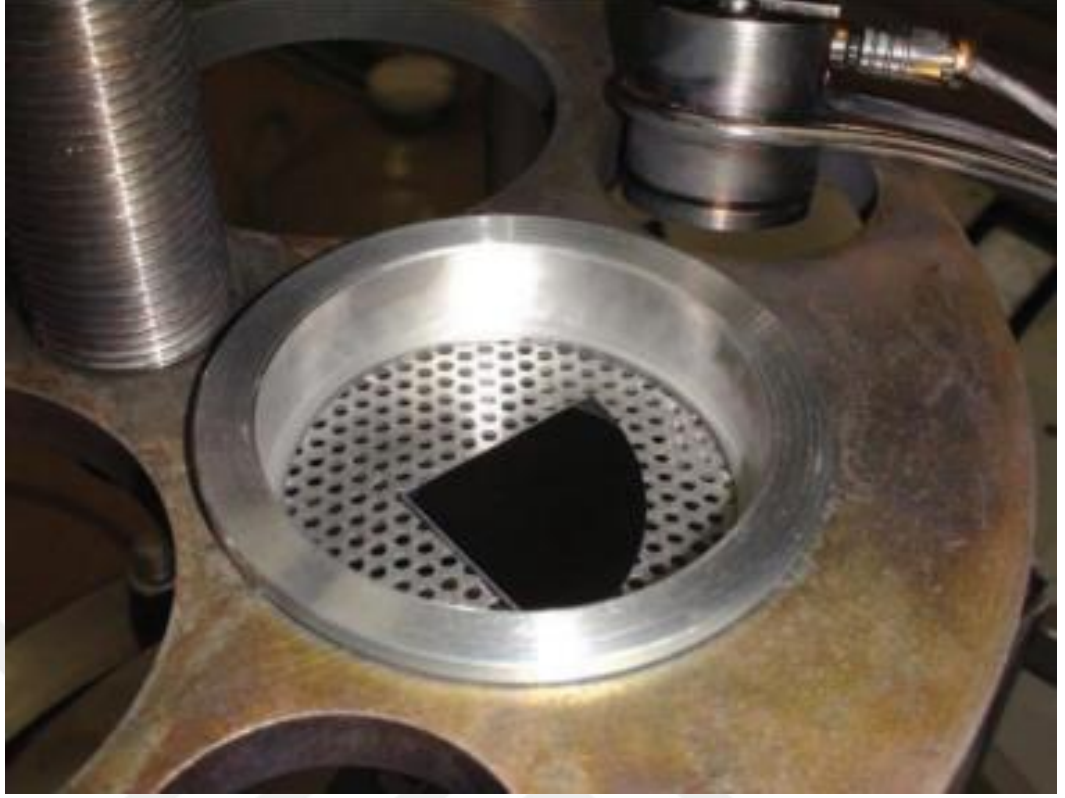


Şekil 3.5 Al/Coronene/n-Si yapılarının oluşturulması sırasında kullanılan “Edwards” marka evaporasyon sistemi.

Evaporasyon sisteminin hazır hale getirilebilmesi için kimyasal temizlik işlemi sırasında rotary(dönerek işleyen) ve difüzyon pompası çalıştırıldı. Doğrultucu ve omik kontaklar için uygun maskeler seçildi (Şekil 3.6). Kimyasal temizleme işlemi bitirilen silisyum alt tabaka atmosfer ortamında fazla bekletilmeden evaporasyon sistemine yerleştirildi. Bu işlem için evaporasyon sisteminin numune tutucularına önce omik kontak için kullanılacak olan maske daha sonra da silisyum alt tabaka, kaplanacak yüzeyi alt tarafa gelecek şekilde yerleştirildi (Şekil 3.7). Sistemin elektrotları arasına buharlaştırması yapılacak olan malzemeye uygun pota takıldı. Pota içerisine buharlaştırılacak olan alüminyum (%99.999'luk) metali yerleştirildi (Şekil 3.8) ve sistemin cam fanusu kapatıldı. Gerekli olan ön basınç değerine inildikten sonra bir yüksek vakum vanası yardımıyla difüzyon pompası devreye sokuldu. İstenilen basınç değerine gelindikten sonra (6×10^{-6} Torr) elektrotlara gerilim uygulanmaya başlandı. Gerilim artırılması ile potadan geçen akım da arttı ve metali buharlaştıracak sıcaklığa gelince evaporasyon işlemi başladı. İstenilen film kalınlığına gelince bir shutter(kesici kapak) yardımıyla evaporasyon işlemi sonlandırıldı. Potaya uygulanan gerilim kesildi. Böylece omik kontak için gerekli tabaka oluşturulmuş oldu. Evaporasyon sırasında oluşturulan film kalınlığı(2000 Å) ve biriktirme hızı 10-20 Å/sn "Edwards FTM6" marka (Şekil 3.9) bir kalınlık ölçer ile ölçüldü.



Şekil 3.6 Omik kontakın oluşturulması için kullanılan metal maske.



Şekil 3.7 Numune tutucu içerisinde maske ile yerleştirilmiş silisyum kristali.

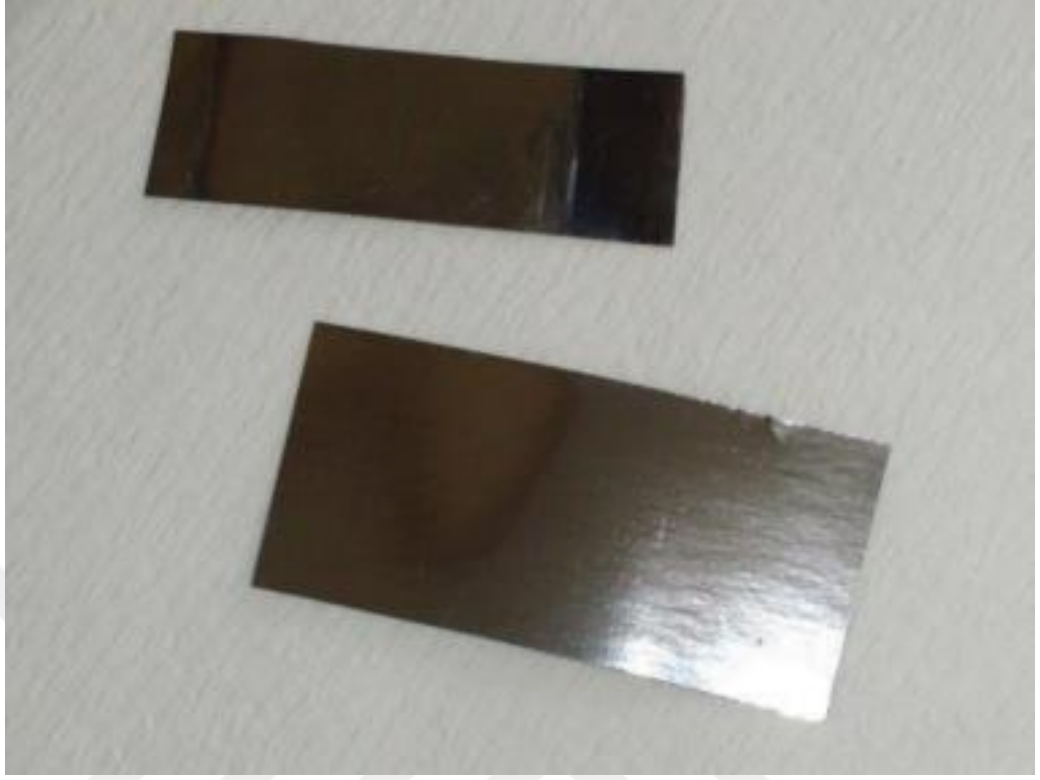


Şekil 3.8 Evaporasyon işleminde kullanılan tungsten pota.

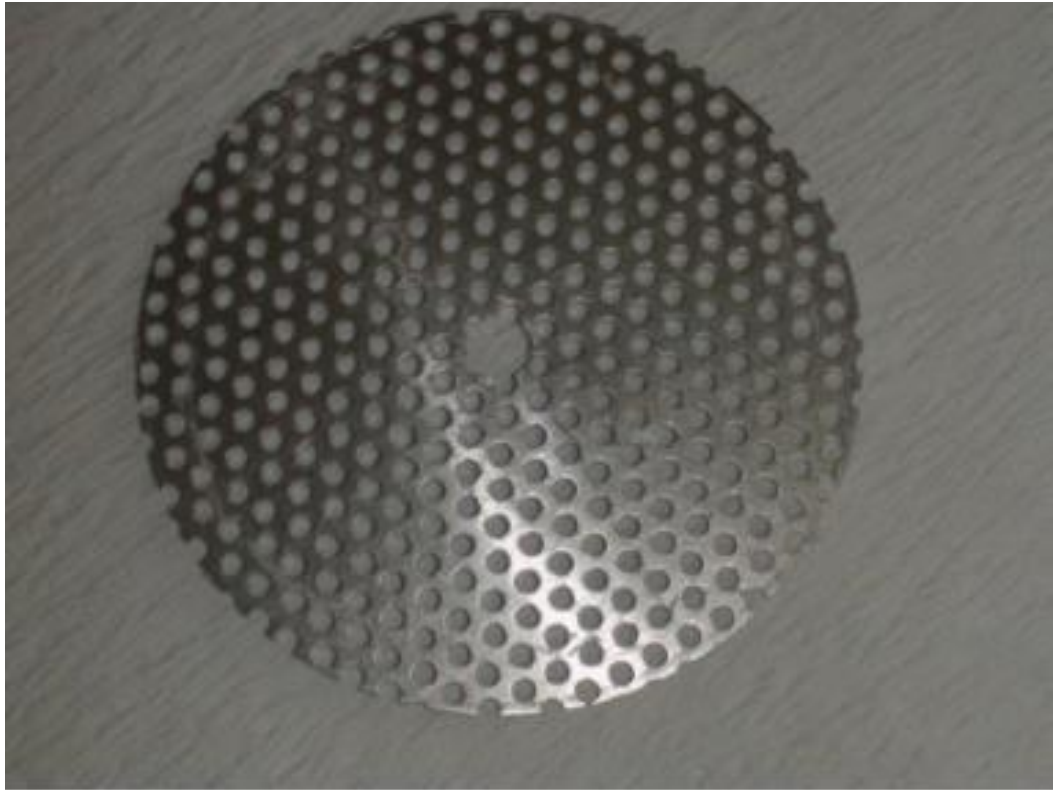


Şekil 3.9 “Edwards FTM6” marka kalınlık ölçer.

Evaporasyon ile film oluşturma işlemi tamamlandıktan sonra cam fanus içerisine yavaş yavaş hava verilmeye başlandı ve sistem atmosfer ortamına açıldı. Elektrotlar arasındaki pota çıkartılarak yerine tungsten bir levha takıldı. Bu levha üzerine silisyum alt tabaka, kaplanmış yüzeyi üste gelecek şekilde yerleştirildi (Şekil 3.10). Cam fanus tekrar yerine yerleştirilerek sistem vakum altına alındı. İstenilen vakum değerine erişildiğinde levhaya gerilim uygulanarak ısınması sağlandı. Bir süre sonra alüminyum kaplı yüzey silisyum içerisine çöktü ve böylece omik kontak oluşmuş oldu. Levhanın soğuması beklendikten sonra evaporasyon sistemi atmosfere açılarak önceki pota takıldı ve omik kontakın, ölçümler sırasında elektriksel iletkenliğinin sağlanabilmesi için çöktürülen tabaka üzerine tekrar alüminyum ($\approx 2000\text{\AA}$) kaplandı. Daha sonra doğrultucu kontak için gerekli olacak 1,7 mm çaplı delikleri olan metal maske (Şekil 3.11) numune tutucuya takıldı ve silisyum alt tabaka, kaplanmamış yüzeyi alta gelecek şekilde maske üzerine yerleştirildi. Sistem tekrar vakum altına alınarak kaplama gerçekleştirildi (1500\AA). Böylece bütün bu işlemler sonucunda 6 adet Al/Coronene/*n*-Si Schottky yapısı elde edilmiş oldu. Şekil 3.12 ve 3.13'te, çeyrek silisyum alt tabaka üzerinde oluşturulan Al/Coronene/*n*-Si Schottky diyotlarının görüntüsü ve şematik diyagramı görülmektedir.



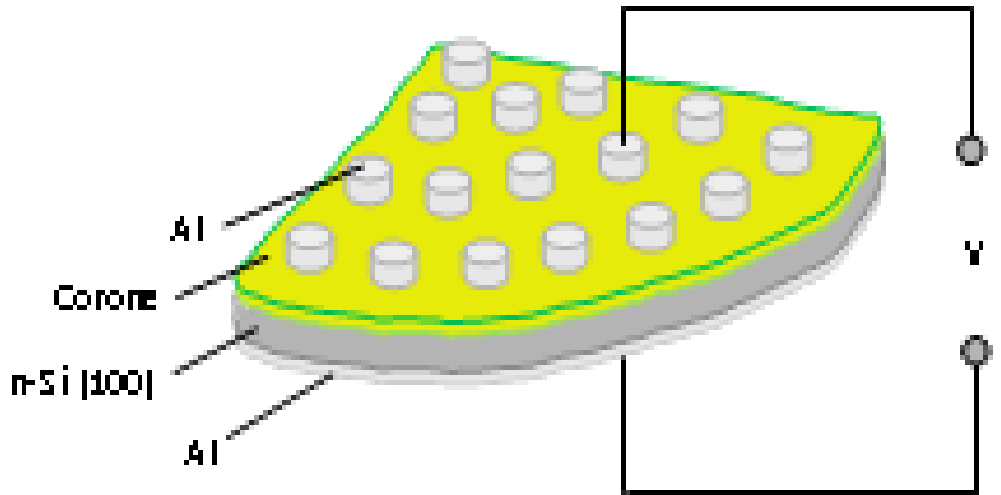
Şekil 3.10 Omik kontak oluşumunda kullanılan tungsten levhalar.



Şekil 3.11 Doğrultucu kontak yapımında değerlendirilen metal maske.



Şekil 3.12 Çeyrek Silisyum alttabaka üzerinde oluşturulan Al/Coronene/*n*-Si Schottky yapılarının görüntüsü.



Şekil 3.13 Oluşturulan Al/Coronene/*n*-Si Schottky yapılarının şematik diyagramı.

3.2. Kullanılan Ölçüm Cihazları ve Düzenekleri

Oluşturulan Al/Coronene/*n*-Si Schottky diyotlarının elektriksel karakterizasyonu için, IEEE-488 AC/DC arayüz kart ile bağlantılı bilgisayar kontrollü ölçüm cihazları kullanıldı. Keithley 2400 Source Meter cihazları kullanılarak Akım-voltaj (*I-V*) değerlerinin ölçümleri yapılmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 Bilgisayar kontrollü Keithley 2400 Source Meter ve Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer cihazları

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Giriş

Üretilen Al/Coronene/*n*-Si Schottky diyotlarının (6 adet) detaylı aygıt parametreleri akım-voltaj(*I-V*) eğrileri yardımıyla elde edilmiştir. Tüm elektriksel ölçümler karanlık ortamda ve oda sıcaklığında alınmıştır. *I-V* ölçümlerinden hareketle, başlıca diyot parametreleri olan idealite faktörü(*n*), doyma akımı(*I_o*), difüzyon potansiyeli(*V_d*) ve engel yüksekliği(*φ_B*)'nin yanında yine her bir diyot için seri direnç(*R_s*) gibi diyot parametreleri tayin edilmiştir. Diyotların seri direnç değerleri modifiye edilmiş. Norde yöntemi ve Cheung yöntemleri kullanılarak hesap edilmiş ve bu iki yöntemden elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Elde edilen farklı değerlerdeki engel yüksekliklerinden dolayı yapıların engel yüksekliği homojensizliği incelenmiş ve bazı parametrelerin istatistiksel(Gaussian) dağılımları elde edilmiştir.

4.2. Düz Beslem Akım-Voltaj (I-V) Karakteristikleri

Ölçümü yapılan (6 adet) Al/Coronene/*n*-Si Schottky diyotlarına ait yarı logaritmik düz beslem altında işlem görmüş *I-V* karakteristikleri Şekil 4.1.a ve 4.1.b'de gösterilmiştir. Şekil 4.1.a ve 4.1.b'den görüldüğü üzere diyot eğrileri iyi bir doğrultma vermiştir. Şekil 4.2 ise bu diyotlardan bir tanesinin yarı logaritmik düz beslem *I-V* karakteristiği verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere 0,08 – 0,2V aralığında bir lineer bölge mevcuttur. Termoyonik emisyon akımının etkin olduğunu kabul edilirse, bu modelde uygulanan voltaj ve akımın arasındaki bağıntı [30],

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (4.1)$$

ile verilir. Burada; T , Kelvin cinsinden sıcaklık, V , diyot gerilimi q , elektronik yükü, k , Boltzmann sabitidir. Çoğunluk taşıyıcıları için doyum akımı I_0 olup,

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

şeklinde ifade edilir. Burada Φ_{B0} , A , ve A^* ve sırasıyla etkin metal/yarıiletken engel yüksekliği, diyot alanı ve Richardson sabitidir. (4.1) ifadesindeki akım-gerilim denklemi ideal bir diyot için geçerlidir. Ancak gerçekte ideal bir diyot yoktur ve bu yüzden yukarıdaki ifadeye ideallikten sapmaya bağlı olarak bir düzeltme faktörü (n) eklenmelidir ki bunun adı ideallik faktörüdür. Böylece denklem 4.1,

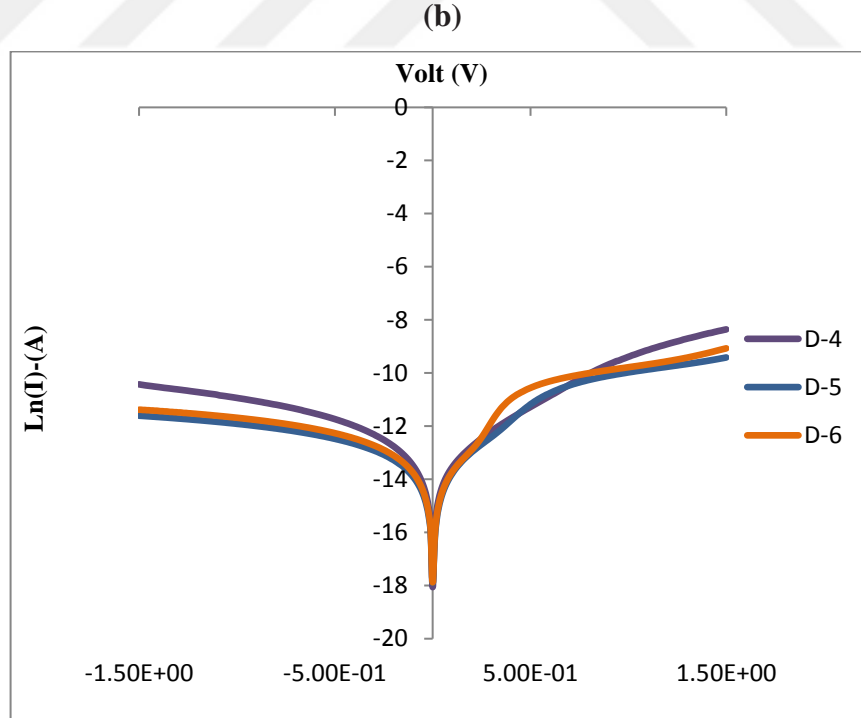
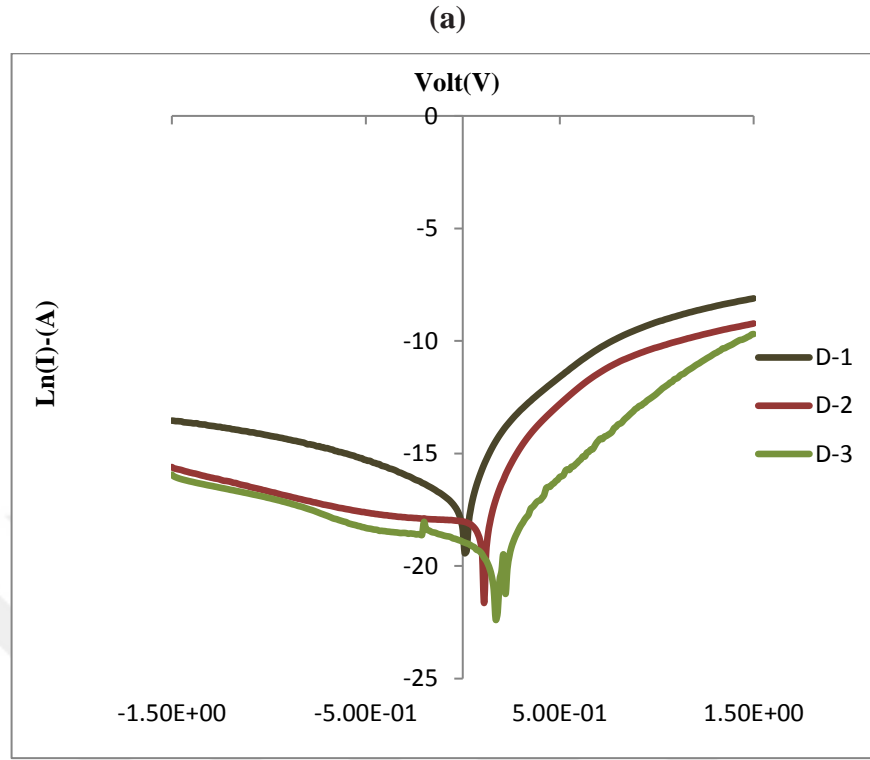
$$I = I_0 \exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) \quad (4.3)$$

şeklini alır. Burada ideallik faktörü sıcaklığa, ara yüzey durumlarına ve uygulanan gerilime bağlı olup, değeri 1'den büyüktür. Elde edilen yapıların ideallik faktörleri Şekil 4.2'deki yarı logaritmik I - V eğrisinin eğiminden hesaplanmıştır.

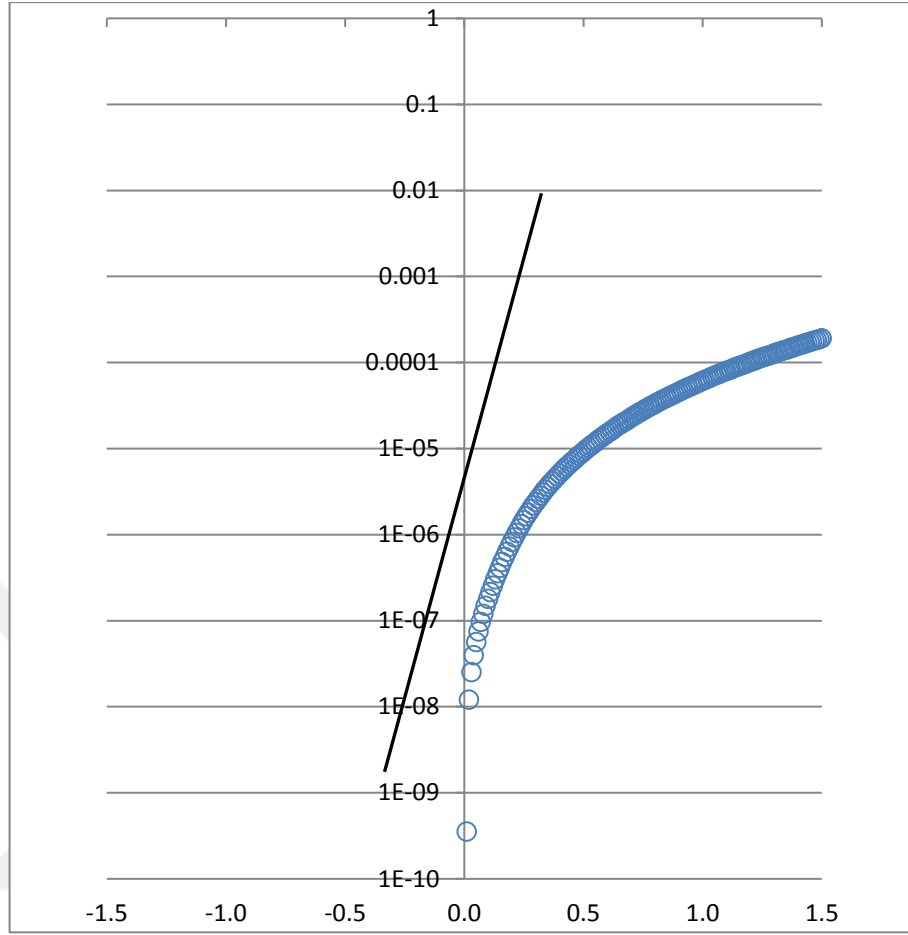
$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d \ln(I)} \right) \quad (4.4)$$

I_0 doyma akımının değeri, lineer eğrinin akım eksenini kestiği noktadan elde edilmiştir. Elde edilen diyotların engel yüksekliği 4.2 denkleminde elde edilmiştir. Şekil 4.2'de verilen diyot yapısı için (4.1), (4.2) ve (4.4) ifadeleri kullanılarak $I_0 = 1.37 \times 10^{-6} A$, $\Phi_B = 0.6223 eV$ ve $n = 1.374 \times 10^{-6}$ olarak elde edilmiştir. Çizelge 4.1'de tüm diyotlar için I - V grafik eğrilerinden elde edilen I_0 , Φ_B ve n değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.1'den görüldüğü üzere engel yükseklikleri değişik değerler almaktadır. Bu durum diyotların oluşturulduğu silisyum kristali üzerindeki homojensizliklere atfedilebilir.



Şekil 4.1 Tüm Al/Coronene/*n*-Si Schottky diyotlarına ait yarı logaritmik düz beslem altında işlem görmüş $\ln(I)$ - V karakteristikleri: a) 1'den 3'üncü numuneye kadar, (b) 3'üncü'den 6'ncü numuneye kadar.



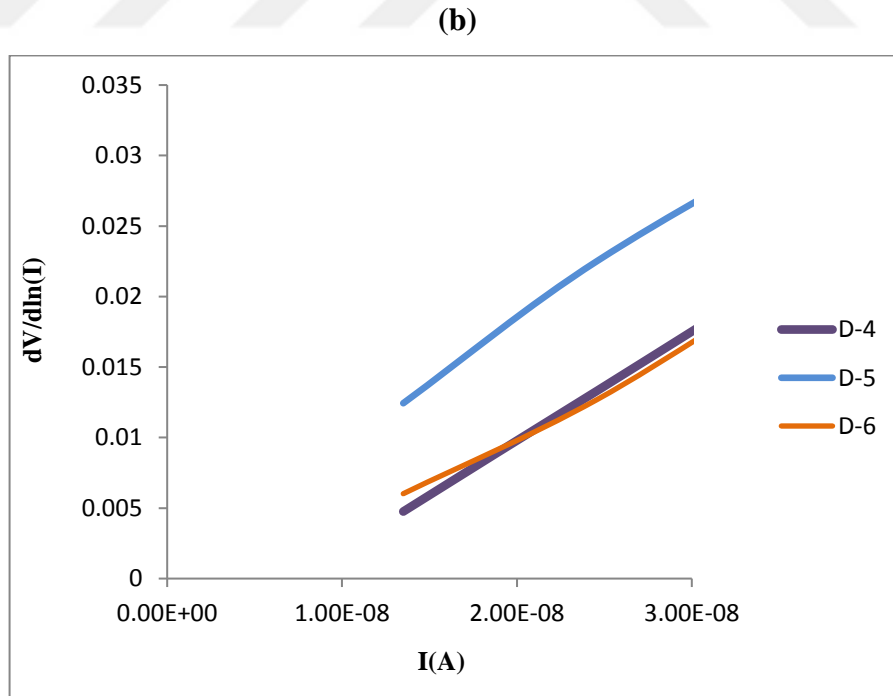
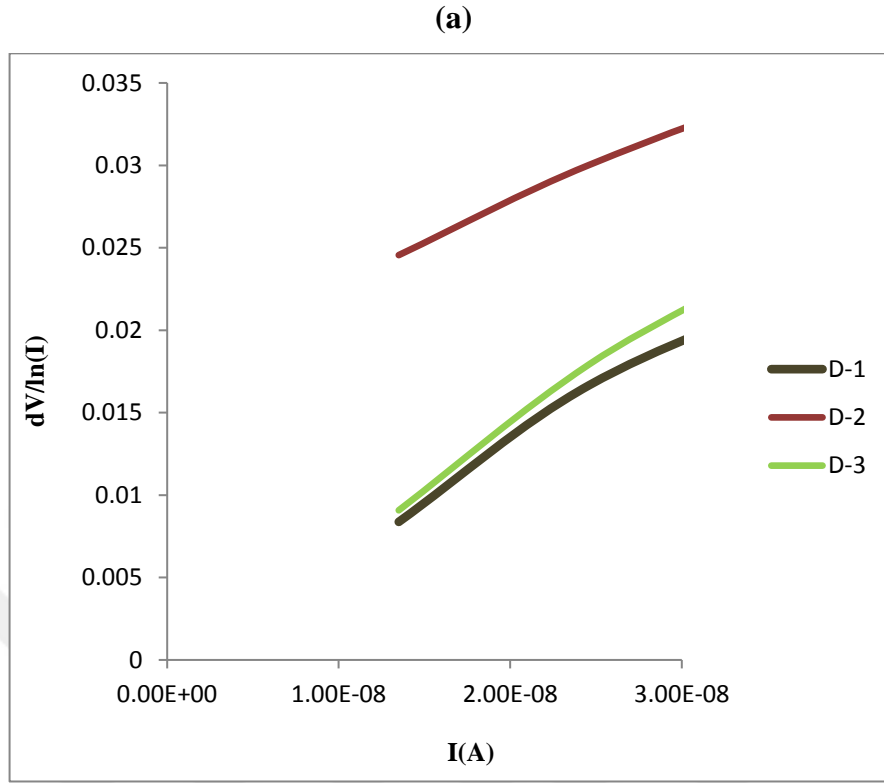
Şekil 4.2 Al/Coronen/*n*-Si Schottky diyotlarından bir tanesinin yarı logaritmik düz beslem altında işlem görmüş $\ln(I)$ - V karakteristiği.

Çizelge 4.1 Al/Coronene/*n*-Si Schottky diyotlarının I - V karakteristiğinden elde edilen R_s , n , I_o , ϕ_B değerleri.

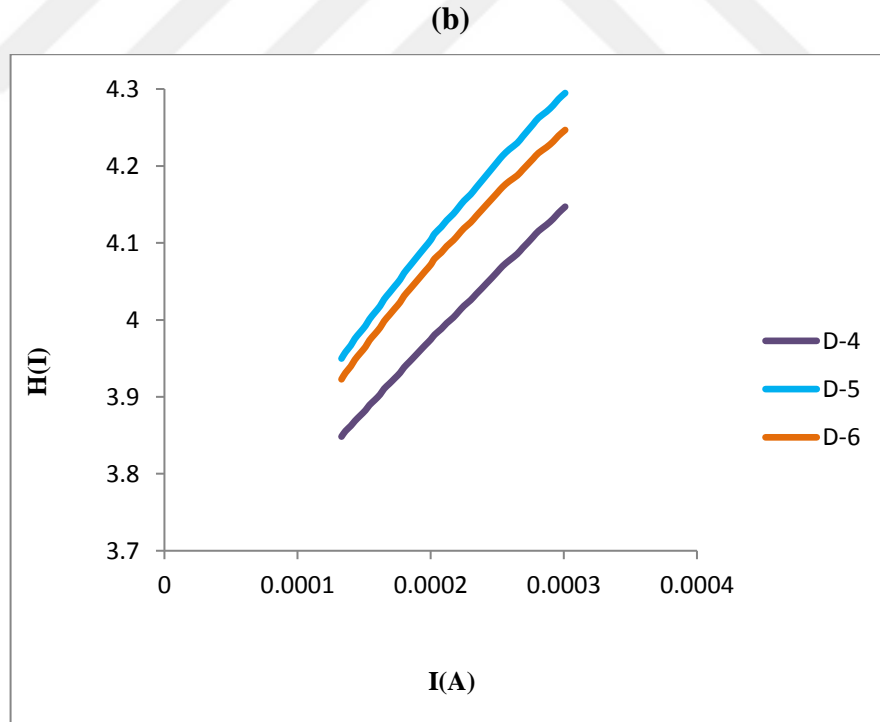
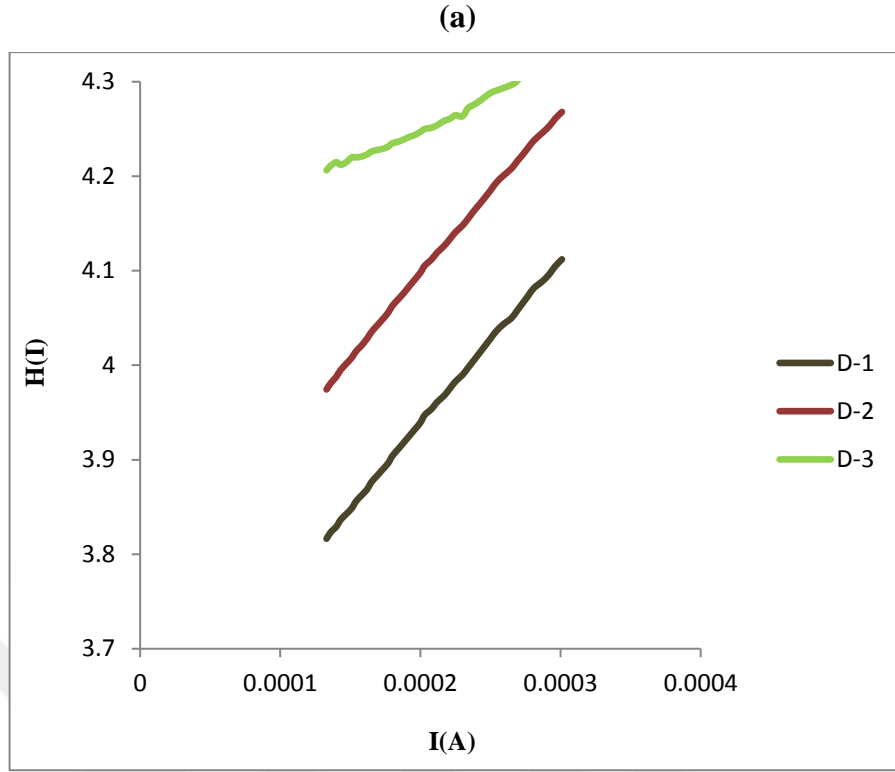
DİYOT	1	2	3	4	5	6
R_s	7,149167269	8,9977826	10,14823	4,4530346	6,132690743	5,531711279
I_o	$2,5917 \times 10^{-7}$	$3,118 \times 10^{-8}$	$6,845 \times 10^{-10}$	$1,374 \times 10^{-6}$	$6,47884 \times 10^{-7}$	$1,6952 \times 10^{-6}$
n	5,41	4,30	3,81	8,68	6,30	6,99
ϕ_B (eV)	0,665429356	0,7202239	0,8190384	0,6222758	0,64172196	0,616834318

Şekil 4.1 ve 4.2'ye bakıldığında yarı logaritmik düz beslem $I-V$ eğrilerinin uygulanan düz beslem arttırıldıkça büküldüğü görülmektedir. Bu durum bize yapıların seri dirençlerinin sıfırdan farklı olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada seri direnç tayininde ideallik faktörünün tüm diyotlarda 1'den büyük çıkmış olması sebebiyle modifiye Norde yöntemi ve yüksek voltaj bölgesinde de Cheung yöntemi kullanılmış olup, bu iki yöntemden elde edilen değerler karşılaştırılmıştır.

Yapıların Cheung yöntemine göre seri dirençleri, $I-V$ karakteristiklerinden faydalanmak suretiyle (2.20), (2.21) ve (2.22) ifadeleri kullanılarak hesaplanmıştır. Öncelikle diyotların her birinin $dV/d\ln(I) - I$ eğrileri çizilmiştir. Şekil 4.1.a ve 4.2.b'de tüm diyotların $dV/d\ln(I) - I$ eğrileri verilmiştir. Çizilen bu doğruların eğiminden elde edilen seri direnç değerleri ile düşey ekseni kestiği noktadan ideallik faktörleri elde edilmiştir. Daha sonra (2.22) ifadesinde tanımlanan bir $H(I)$ fonksiyonu yardımıyla diyotların $H(I)-I$ grafikleri çizilmiştir. Şekil 4.4.a ve 4.4.b'de tüm diyotların $H(I)-I$ grafikleri verilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen doğruların eğimlerinden seri direnç değeri, $H(I)-I$ grafiğinde düşey eksenini kestiği noktadan da engel yüksekliği değerleri elde edilmiştir.



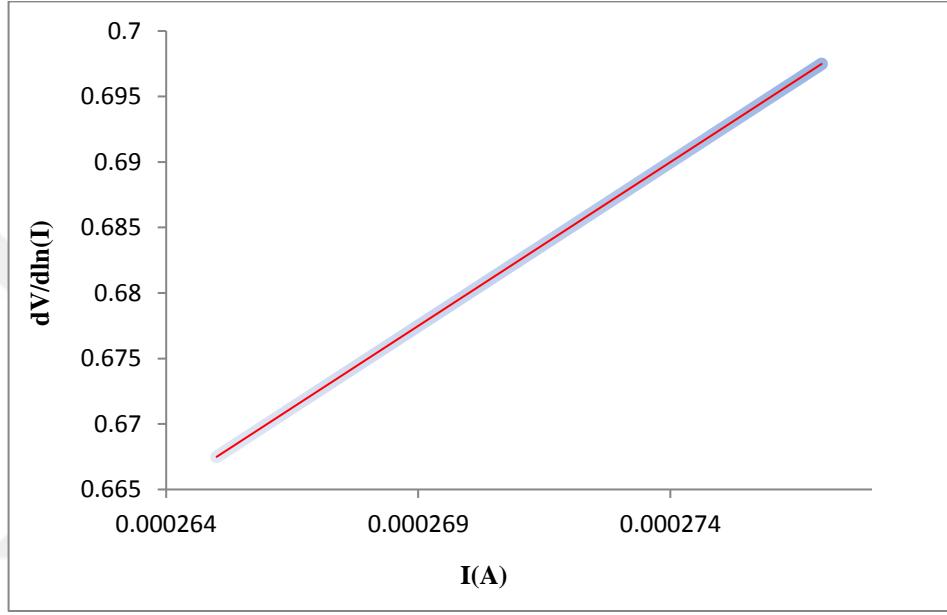
Şekil 4.3 Tüm Al/CORONENE/*n*-Si Schottky diyotlarının $dV/d\ln(I) - I$ eğrileri: a) 1'den 3 nolu numuneye kadar, (b) 4'den 6 nolu numuneye kadar.



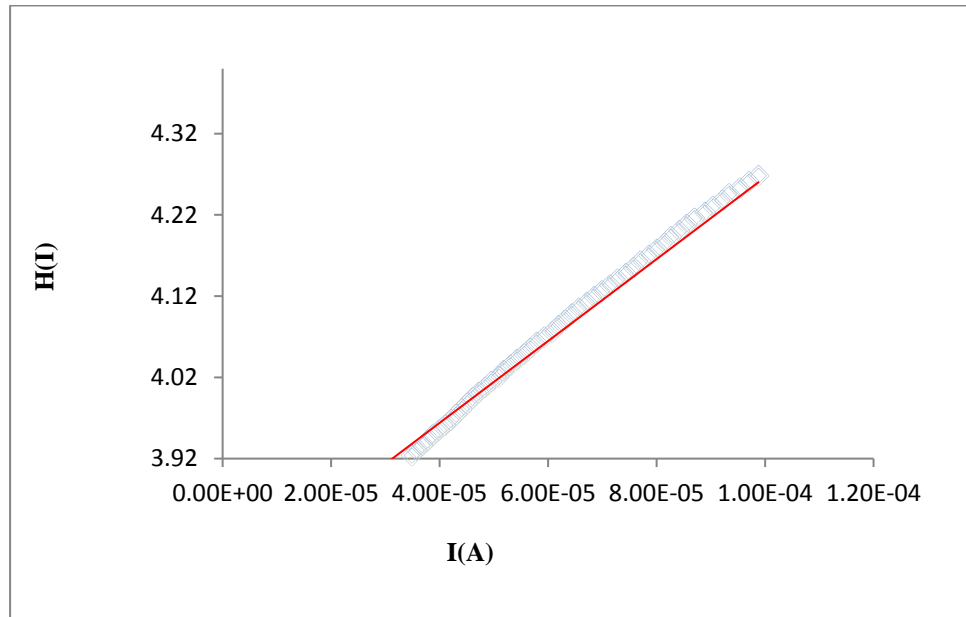
Şekil 4.4 Tüm Al/CORONENE/ n -Si Schottky diyotlarının $H(I)$ - I eğrileri: a) 1'den 3 nolu numuneye kadar, (b) 4'den 6 nolu numuneye kadar.

Şekil 4.5.a ve 4.5.b'de 3 nolu diyotun $H(I)-I$ ve $dV/d\ln(I) - I$ grafiği verilmiştir. Şekil 4.5.a'daki eğri yardımıyla 3 nolu diyot için ideallik faktörü $n = 1,69$ ve seri direnç $R_s = 11,29 \Omega$ olarak elde edilmiştir. Şekil 4.5.b'deki eğri yardımıyla 3 nolu diyot için engel yüksekliği $\phi_B = 0,171 eV$ ve seri direnç $R_s = 9,69 \Omega$ olarak elde edilmiştir. Çizelge 4.2'de Cheung yöntemiyle elde edilen R_s , n ve ϕ_B değerleri verilmiştir.

(a)



(b)

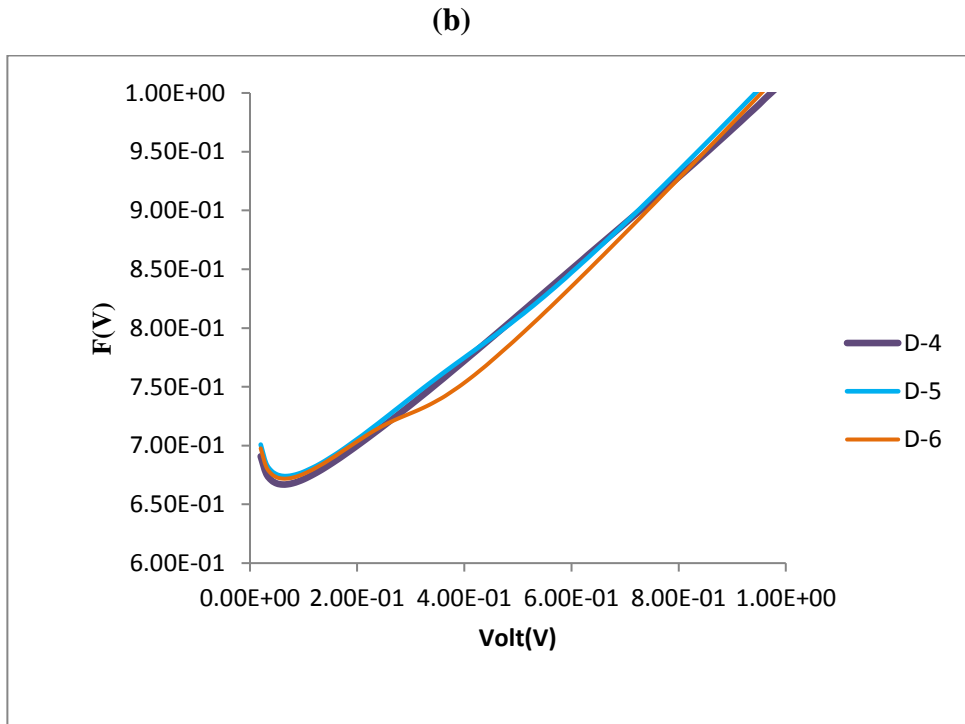
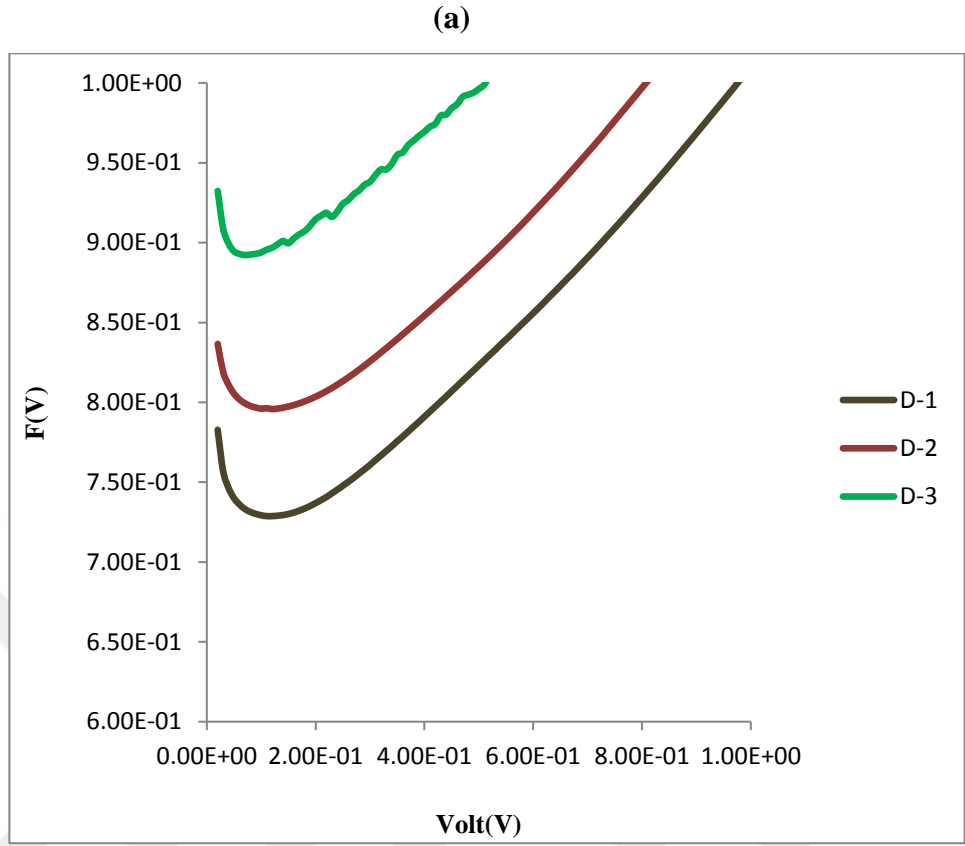


Şekil 4.5 (1) nolu diyot için: a) $dV/d\ln(I) - I$ eğrisi, b) $H(I)-I$ eğrisi.

Çizelge 4.2 Cheung yöntemiyle elde edilen R_s , n ve ϕ_B değerleri.

DİYOT	1	2	3	4	5	6
R_s	6,98	6,95	11,29	7,10	8,54	8,20
n	5,54	5,56	1,69	5,45	4,52	4,74
ϕ_B	0,194017	0,18982	0,170647	0,19348	0,19492	0,194476

Yapıların seri direnç değerleri farklı bir metot olan ve tanımlanan orijinal bir $F(V)$ fonksiyonunu kullanan Norde [31] metodu ile elde edilmiştir. Ancak yapıların idealite faktörleri 1'den büyük çıktıkları için Bohlin [32] tarafından yeniden düzenlenmiş Norde fonksiyonu kullanıldı. Bunun için diyotların (2.8) ifadesi kullanılarak $F(V)$ - V eğrileri çizildi. (2.8) ifadesinde bulunan keyfi sabit değeri, her bir diyot için o diyodun ideallik faktöründen büyük ve ilk tam sayı olacak şekilde alındı. Şekil 4.6a ve b'de tüm Al//Coronene/n-Si Schottky diyotlarının uygulanan besleme karşı $F(V)$ eğrileri görülmektedir.



Şekil 4.6 Tüm Al/CORONENE/*n*-Si Schottky diyotlarının $F(V)$ - V eğrileri: a) 1'den 20 nolu numuneye kadar, (b) 21'den 40 nolu numuneye kadar.

Şekil 4.6.a ve 4.6.b'den de anşaldığı üzere her diyoda ait $F(V)$ fonksiyonu için bir minimumdan seviyeden geçiş mevcuttur.

ϕ_B ile R_s değerleri, Şekil 4.6.a ve 4.6.b'deki eğrilerin minimum noktaları kullanılarak (2.8) ifadelerinden elde edilmiş ve Çizelge 4.3 ile verilmiştir. Şekil 4.6.a ve 4.6.b'deki eğrilerdeki 4 nolu diyottan elde edilen $F(V_0) = 0,44 V$, $V_0 = 0,15V$ ve $I_0 = 5,67 \times 10^{-4} A$ değerleri için, $R_s = 35,94 \Omega$ ve $\phi_B = 0,290 eV$ bulunmuştur. Elde edilen bu değerler, kullanılan bir diğer yöntem olan Cheung yöntemiyle uyum içerisindedir.

Çizelge 4.3 $F(V)$ fonksiyonu yardımıyla elde edilmiş ϕ_B ve R_s değerleri

DİYOT	1	2	3	4	5	6
R_s	44,5305	21,5341	44,4281	35,9405	44,6825	47,3201
ϕ_B	0,287883	0,286514	0,281197	0,287677	0,288119	0,287942

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu tezde, yüksek anahtarlama hızına sahip olmasından dolayı genelde alan etkili transistör ve varaktör olarak dedektörlerde, bilgisayarlarda ve modülatörlerde kullanılan ve son derece önemli devre elemanı olan Schottky diyotları üzerinde çalışılmıştır. Bunun için (100) düzleminde büyütülmüş, 5 Ω .cm öz dirençli, 250 μ m kalınlıklı, bir n -tipi silisyum kristali kullanılmıştır. Çeşitli kimyasal temizlik aşamalarından sonra evaporasyon sistemleri kullanılarak aynı kristal üzerinde 6 adet Al/Coronen/ n -Si Schottky diyotu oluşturulmuştur. Oluşturulan diyotların oda sıcaklığında ve karanlık ortamda bilgisayar kontrollü ölçüm cihazları yardımıyla akım-gerilim(I - V) ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümlerden elde edilen veriler yardımıyla çeşitli yöntemler kullanılarak her bir diyot için hesaplamalar yapılmış ve bu hesaplamalar grafiklere aktarılmıştır. Bu grafiklerden her bir diyot için başlıca diyot parametreleri olan idealite faktörü(n), doyma akımı(I_0), difüzyon potansiyeli(V_d) ve engel yüksekliği(ϕ_B)'nin yanında yine her bir diyot için seri direnç(R_s) gibi diyot parametreleri Cheung ve Norde yöntemleri kullanılarak tayin edilmiştir.

Schottky diyotlarının $\ln(I)$ - V eğrilerinden görüldüğü üzere düz beslem bölgesinde ideallikten sapmalar, ters beslem bölgesinde ise bir doyuma sahip oldukları tespit edilmiştir. Düz beslem bölgesinde üç bölge mevcuttur. Bunlar; yeniden birleşme adı verilen ve eksenden bir kaç kT/q kadar uzaklığa kadar uzanan birinci bölge, termiyonik emisyon akımının geçerli ve lineer olduğu ikinci bölge ve son olarak da seri direncin etkisini göstererek eğriyi aşağı doğru büküdüğü üçüncü bölgedir. Diyotların idealite faktörleri ikinci bölgede bulunan doğrunun eğiminden, doyma akımları ise bu doğrunun akım eksenini kestiği noktadan elde edilmiştir. Diyotların idealite faktörleri 1'den büyük bulunmuştur. I - V ölçümlerinden elde edilen ideallik

faktörü deşerleri 3,8 – 8,7, doyma akımı $6,7 \times 10^{-10} - 2,6 \times 10^{-7} A$ ve engel yüksekliği 0,616 – 0,819 eV arasında bulunmuştur.

İdeallik faktörü değerlerinin 1'den büyük çıkması arayüzey durumlarının ve arayüzey tabakasının varlığından kaynaklanmaktadır.

Yapıların arayüzey durum yoğunlukları her bir diyot için enerjinin bir fonksiyonu olarak *I-V* ölçümlerinden elde edilmiştir.

I-V eğrilerinin yüksek voltaj bölgesinde aşığı doğru bükülmesine ve dolayısıyla ideallikten sapmasına neden olan seri direnç değerleri modifiye Norde yöntemi ve Cheung yöntemi kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmıştır. Seri direnç, yarıiletken içerisindeki düzensiz katkıların yüksek özdirençli bölgeler meydana getirmesinin yanı sıra, yarıiletkenle kontak arasındaki kirli film tabakalarının veya parçacıkların oluşturduğu istenmeyen bir durumdur. Bu durum yavaş taşıyıcı yoğunluğunu oluşturur. Yapıların seri direnç tayininde kullanılan Norde yönteminde, *I-V* eğrilerinin düz beslem bölgesi temel alınmak suretiyle voltaja bağlı olarak tanımlanmış ve yüksek idealite faktörlü yapılar için modifiye edilmiş bir fonksiyon kullanılmıştır. Bu fonksiyon yardımıyla yapıların seri direnç ve engel yükseklikleri belirlenmiştir. Norde tekniği hesaplamalarından elde edilen seri direnç değerleri 6 adet diyottan birkaç tanesi hariç genelde 6,9 Ω ile 8,2 Ω arasındadır. *I-V* ölçümleri kullanılarak seri direnç tayin edilen bir diğer yöntem de Cheung yöntemi olup, bu yöntemde iki adet fonksiyon tanımlanmıştır. Bu yöntem engel yüksekliği ile seri direnç yanında bir de idealite faktörünün belirlenmesine imkân kılar. Cheung tekniği hesaplamalarından elde edilen seri direnç değerleri 6 adet diyottan birkaç tanesi hariç $dV/d(\ln I)-I$ ve $H(I)-I$ fonksiyonları için genel olarak sırasıyla 6,9 Ω ile 8,2 Ω ve 5,6 Ω ile 7,7 Ω arasındadır. Bu sonuçlar, Norde yönteminden elde edilen seri direnç değerleri ile uyumludur. Diğer taraftan hesaplanan idealite faktörü değerleri de 1,69 ile 5,54 arasındadır.

Aynı şartlarda ve aynı kristal üzerinde oluşturulmalarına rağmen, Schottky yapılarından elde edilen parametrelerin ve özellikle engel yüksekliklerinin her bir diyot için farklı çıkması metal/yarıiletken arayüzeyindeki yüzey kusurlarından meydana gelen atomik homojensizliğe atfedilebilir [33,34].

Bu durum metal/yarıiletken arayüzeyinde engel yüksekliği homojensizliklerine sebep olur. Bu tip yapıların arayüzeyi yüzey hazırlama işlemlerine karşı oldukça hassastır. Durum böyle olunca da idealite faktörüne ve düşük engel yüksekliğine sahip diyotlar elde etmek zorlaşır. Yüzey alanı mikro ya da nano mertebesinde olan metal/yarıiletken diyotlar üretildiğinde bu olumsuz durum büyük ölçüde giderilebilecektir. Öte yandan $I-V$ ölçümleri sonucunda ortaya çıkan Schottky engel yükseklikleri arasında da bazı farklılıklar gözlenmiştir. Si/SiO₂ ara yüzeyinde sınırlandırılmış ara yüzey durumları veya ara yüzey durumlarının metal/yarıiletken ara yüzeyinde ve yasak enerji bant aralığındaki dağılımları da bu farklılığa sebep olabilir. Böyle durumlarda elde edilen çok sayıda parametrenin ortalama değerleri alınarak deneysel dağılımları bir Gaussian fonksiyonuna fit edilir. Bu tez çalışmasında 6 adet diyot için birçok parametrenin istatistiksel dağılımları elde edilmiştir. $I-V$ ölçümleri kullanılarak elde edilen ortalama değerler doyma akımı için $6,68 \times 10^{-7}$ A, idealite faktörü için 5,916 ve engel yüksekliği için 0,559 eV'dur. Norde ve Cheung yöntemlerinden elde edilen ortalama değerler sırasıyla, engel yükseklikleri ve idealite faktörü için, 0,189 eV ve 4,583'dür. Cheung yönteminde kullanılan $H(I)-I$ ve $dV/d\ln(I)-I$ fonksiyonlarından temin edilen ortalama seri direnç değerleri sırasıyla 7,07 Ω ve 8,13 Ω 'dur.

KAYNAKLAR

- [1] Türköz, M., S., Elektronik Devreleri I, İstanbul, Birsen Yayınevi, 1999.
- [2] Okur, İ., Optoelektronik, Adapazarı, Değişim Yayınları, 2000.
- [3] Erol, A., Düşük boyutlu yarıiletken yapılarda optik olaylar (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1997.
- [4] www.bing.com, Erişim Tarihi:10.04.2019.
- [5] Türüt, A., Batı, B., Kökçe, A., Sağlam, M. and Yalçın, N., The bias-dependence change of barrier height of Schottky diodes under forward bias by including the series resistance effect, Physics Scripta 53 (1), 118-122, 1996.
- [6] Bardeen, J., Surface states and rectification at a metal semi-conductor contact, Physics Rev., 71, 717-727, 1947.
- [7] Sze, S.M., Physics of Semiconductor Devices, 2nd Ed. John Wiley & Sons, 1981.
- [8] Ziel, A. V., Solid State Physical Electronics, 2nd Ed. Prentice-Hall, Inc., 1968.
- [9] Aboelfotoh, M.O., Temperature dependence of the Schottky-barrier height of tungsten on n-type and p-type silicon, Solid State Electronics, 34(1), 51-55, 1991.
- [10] Quat, V.T. & Nicolet M.A., Electron Trapping in Neutron-Irradiated Silicon Studied by Space-Charge-Limited Current, Journal of Applied Physics, 43(6) 2755, 1972.
- [11] Rideout, V.L., A review of the theory, technology and applications of metal-semiconductor rectifiers, Thin Solid Films, 48(3), 261-291, 1978.
- [12] Chandra, M. M., Parsad, M., Realizing linear voltage temperature characteristics for forward biased diodes, Journal of Physics D-Applied

- Physics, 19(1), 89-93, 1986.
- [13] Batı, B., Al-Sb/n-Si/Cu Schottky Diyotlarında Seri Direncin I-V ve C -V Karakteristiklerine Etkileri. Y.Y.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Van, 1993.
- [14] Korkut, H., Yıldırım, N., Turut, A., Temperature-dependent current-voltage characteristics of Cr/n-GaAs Schottky diodes, *Microelectronic Engineering*, 86 (1), 111-116, 2009.
- [15] Morita, M., Ohmi, T., Hasegawa, M., Kawakami, M., Ohwada, M., Growth of native oxide on a silicon surface, *Journal of Applied Physics*, 68 (3), 1272, 1990.
- [16] Çetinkara, H.A., Sağlam, M., Türüt, A., Yalçın, N., The effects of the time-dependent and exposure time to air on Au/epilayer n-Si Schottky diodes, *The European Physical Journal Applied Physics*, 6(1), 89-94, 1999.
- [17] Ayyıldız, E., Temirci, C., Batı, B., Türüt, A., The effect of series resistance on calculation of the interface state density distribution in Schottky diodes, *International Journal of Electronics*, 88 (6), 625-633, 2001.
- [18] Raychaudhuri, R., and Chattopadhyay, P., Energy distribution of interface state charge density in Cu-nSi Schottky diode with thin interfacial oxide layer, *Applied Surface Science*, 78 (3), 233-238, 1994.
- [19] Türüt, A., Tüzemen, S., Yıldırım, M., Abay, B. and Sağlam, M., Barrier height enhancement by annealing CrNi Co alloy Schottky contacts on LECG aAs, *Solid-state electronics*, 35 (10); 1423-1426, 1992.
- [20] Nuhoglu, Ç., Gülen, Y., The effect of high temperature annealing on Schottky diode characteristics of Au/n-Si contacts, *Vacuum*, 84 (6), 812-816, 2010.
- [21] Mönch, W., *Semiconductor Surfaces and Interfaces*, Springer Series on Surface Science, Springer, Berlin, 348, 26, 2001.
- [22] Crowell C. R., Sze, S. M., Current transport in metal-semiconductor barriers, *Solid-St. Electron.*, 9, 1305-1048, 1966.
- [23] Şahin, B., Ti/p-Si schottky diyotlarının karakteristik parametrelerinin belirlenmesi (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi), Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2004.
- [24] Cheung, S. K., Cheung, N. W. 1986. Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics, Lett.*, 49: 85-87.
- [25] Küni, G., Reaktif Kırmızı 195 Azo Boyar Maddesinin İleri Oksidasyon Yöntemleri ile Parçalanması Çukurova Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Adana, 2009.

- [26] Fetzer, J.C., The Chemistry and Analysis of the Large Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, New York:Wiley, 2000.
- [27] www.archive.gov, Erişim Tarihi:12.05.2019.
- [28] www.mitad.org, Erişim Tarihi:12.05.2019.
- [29] www.ncbi.nlm.nih.gov, Erişim Tarihi:14.05.2019.
- [30] Card, H. C. 1976. "Aluminum-Silicon Schottky Barriers and Ohmic Contacts in Integrated Circuits". IEEE Trans. On Electron Devices, 23; 538-544.
- [31] Norde, H., "A Modified Forward I-V Plot for Schottky Diodes with High Series Resistance", J. Applied Physics, 50: 5052-5053, 1979.
- [32] Bohlin, K. E., Generalized Norde Plot Including Determination of the Ideality Factor. J. Applied Physics, 60; 1223-1224, 1986.
- [33] Werner, J. H. and Güttler, H. H., "Barrier Inhomogeneities At Schottky Contacts", J. Applied Physics, 69: 1522-1533, 1991.
- [34] Sullivan, J. P., Tung, R. T., Pinto, M. R. and Graham, W. R. J. Applied Physics, 70, 7403, 1991.

ÖZGEÇMİŞ

Cemalettin KAYGUSUZ, 1987 yılında Ordu ilinin Ünye ilçesinde doğdu. İlk Okul, Orta Okul ve Lise öğrenimini Ünye’de tamamladı. 2004 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünden Haziran 2008 yılında mezun oldu. Aynı yıl Ordu ili Ünye ilçesi Milli Eğitim Müdürlüğü’ne bağlı olan Özel Eğitim kurumlarında Fizik Öğretmeni olarak çalışmaya başladı ve yedi yıl görev yaptı. 2015 yılında Merzifon POMEM(Polis Eğitim Merkezi)’den mezun olarak Giresun İl Emniyet Müdürlüğü’ne Polis Memuru olarak atandı ve halen görevine devam etmekte. 2015 yılında Giresun Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans programında eğitimine başladı.