



GİRESUN  
ÜNİVERSİTESİ



# FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ORGANİK BİLEŞENLİ SCHOTTKY  
DİYOTLARINDA ARAYÜZEY DURUMLARININ  
ELEKTRİKSEL İLETKENLİĞE ETKİSİ**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ  
ANA BİLİM DALI**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Sitem ÇELİK**

**20152108010**

**Haziran 2019**

GİRESUN

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

**ORGANİK BİLEŞENLİ SCHOTTKY  
DİYOTLARINDA ARAYÜZEY DURUMLARININ  
ELEKTRİKSEL İLETKENLİĞE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Sitem ÇELİK**

**Enstitü Anabilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Serdar KARADENİZ**

**Haziran 2019**

T.C.  
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ORGANİK BİLEŞENLİ SCHOTTKY  
DİYOTLARINDA ARAYÜZEY DURUMLARININ  
ELEKTRİKSEL İLETKENLİĞE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Sitem ÇELİK**

**Enstitü Anabilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği**

**Bu tez 24/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.**



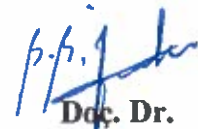
**Prof. Dr.  
Akil Birkan SELÇUK**

**Jüri Başkanı**



**Prof. Dr.  
Serdar KARADENİZ**

**Üye**



**Doç. Dr.  
Behzat BARIŞ**

**Üye**

**Doç. Dr.  
Bahadır KOZ  
Enstitü Müdürü**

## BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Sitem ÇELİK

24/06/2019



1

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana güvenerek desteğini esirgemeyen, emellerimi gerçekleştirmemde bana yardımcı olan, bu çalışmamı yürütürken karşılaştığım zorlukları aşmam için bilgi birikiminden faydalandığım değerli hocam Prof. Dr. Serdar KARADENİZ 'e teşekkür ederim ve saygılarımı sunarım.

Hayatımın her döneminde maddi manevi beni destekleyen ve tez hazırlama sürecinde de beni yalnız bırakmayan sevgili babam, annem ve kardeşlerime ilgileri ve sabırları için sonsuz minnetlerimi sunarım.

Yoğun çalışmalarımız sırasında benimle birlikte sabır gösteren ve emek harcayan arkadaşım Tuba ÖZTÜRK'e teşekkür ederim.

Bu çalışmaların sonuca varabilmesi için bana karşı ilgilerini esirgemeyen ve destek sağlayan dostum Ayşegül ve Ertan ALPAY ailesine sevgilerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR .....	I
İÇİNDEKİLER .....	II
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	IX
TABLolar LİSTESİ .....	XI
ÖZET .....	XII
SUMMARY .....	XIII
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....	3
2.1. Yarıiletkenler.....	3
2.2. Katıların Bant Teorisi.....	5
2.3. Deşik Kavramı .....	6
2.4. Gerçek Yarıiletkenler .....	7
2.5. Katkılı Yarıiletkenler.....	8
2.6. Temel Yarıiletken Denklemleri.....	9
2.7. Metal/Yarıiletken (Schottky) Kontaklar.....	11
2.7.1. Metal/p-tipi yarıiletken kontak.....	13
2.8. Metal/yarıiletken Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları.....	17
2.8.1. Termoyonik emisyon (TE) teorisi.....	18
2.8.2. Difüzyon teorisi.....	20
2.8.3. Termoyonik emisyon difüzyon (TED) teorisi.....	21
2.8.4. Engel boyunca tünelleme.....	22
2.9. İdealite Faktörü.....	23
2.10. Seri Direnç. ....	24

2.10.1. Seri direnç belirleme yöntemleri.....	24
2.10.1.1. Norde Yöntemi.....	25
2.10.1.2. Cheung yöntemi.....	28
2.11. Akım-gerilim Karakteristikleri.....	29
2.12. Kapasitans-Gerilim Karakteristikleri.....	30
2.13. Arayüzey Durumları.....	31
2.13.1. Arayüzey durumlarını belirleme yöntemleri.....	32
2.13.1.1. Akım yöntemi.....	32
2.13.1.2. Kapasitans yöntemi.....	33
BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	35
3.1. Alttabaka Temizliği ve Yapıların Hazırlanması.....	35
3.2. Organik Bileşenli Schottky Yapılarının Hazırlanması.....	37
3.2.1. Organik Bileşenin Hazırlanması.....	40
3.2.2. Doğrultucu kontağın oluşturulması.....	41
3.3. Yapıların Elektriksel Ölçümlerinde Kullanılan Cihaz ve Düzenekler.....	41
BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI .....	43
4.1. Giriş.....	43
4.2. Arayüzey Tabakanın Yüzey Morfolojisi.....	43
4.3. Yapıların Akım-gerilim ( $I-V$ ) Karakteristikleri.....	44
4.4. Yapıların Kapasitans-Gerilim ( $C-V$ ) ve İletkenlik-Gerilim ( $G-V$ ) Karakteristikleri.....	52
BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....	65
KAYNAKLAR .....	68
ÖZGEÇMİŞ .....	

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$Al$	: Alüminyum
$A$	: Diyot kontakt alanı
$A^*$	: Richardson sabiti
$A^{**}$	: Modifiye Richardson sabiti
$B$	: İndüksiyon alanı
$C_{HF}$	: Yüksek frekans kapasitesi
$C_{LF}$	: Düşük frekans kapasitesi
$C_2$	: Taşıyıcı yoğunluğuna bağlı parametre
$C_m$	: Maksimum iletkenlik değerine karşılık gelen kapasite
$C_{m,acc}$	: Biriktirme bölgesinde ölçülen kapasite
$C_i$	: Arayüzey tabakasının kapasitesi
$D_{it}$	: Arayüzey tuzak yoğunluğu
$D$	: Yer değiştirme vektörü
$dn$	: Küçük bir enerji aralığındaki elektron yoğunluğu
$\Delta\Phi_B$	: Schottky alçalması
$\delta$	: Arayüzey tabakasının kalınlığı
$E_c$	: İletkenlik bantının enerji seviyesi
$E_v$	: Değerlik bantının enerji seviyesi
$E_{ss}$	: Arayüzey durumlarının enerjisi
$E_F$	: Fermi enerji seviyesi
$E_c$	: İletkenli bant enerjisi
$E_{Fn}$	: n tipi yarıiletkenin Fermi enerjisi

$E_{Fp}$	: p tipi yarıiletkenin Fermi enerjisi
$E_m$	: Maksimum elektrik alan
$E$	: Elektrik alan
$\epsilon_s$	: Yarıiletkenin dielektrik sabiti
$\epsilon_o$	: Boşluğun elektriksel geçirgenliği
$\epsilon_i$	: Arayüzey tabakasının dielektrik sabiti
$E(x)$	: Schottky bölgesindeki elektrik alanı
$E_g$	: Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
$\Phi_m$	: Metalin iş fonksiyonu
$\Phi_s$	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
$\Phi_B$	: Engel yüksekliği
$\varphi_{Bn}$	: Engel yüksekliği
$\Phi_{ms}$	: Metal ve yarıiletken arasındaki iş fonksiyonlarının farkı
$\Phi_F$	: Gerçek Fermi enerji seviyesi ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkı
$\Phi_e$	: Etkin engel yüksekliği
$\Phi_{Bo}$	: Sıfır beslem engel yüksekliği
$\Phi_{wf}$	: Metalle yarıiletken arasındaki iş fonksiyonu farkı
$G_{m,maks}$	: Biriktirme bölgesinde ölçülen maksimum iletkenlik
$G_{m,acc}$	: Biriktirme bölgesinde ölçülen iletkenlik
$\Gamma$	: Engel yüksekliğinin gerilim katsayısı
$H$	: Manyetik alan
$H_2O_2$	: Hidrojen peroksit
$h$	: Planck sabiti
$HF$	: Hidroflorik asit
$I$	: Diyot akımı
$I_o$	: Doyma akımı
$J$	: İletim akımı yoğunluğu

$J_n$	: Elektronların oluşturduğu akım
$J_p$	: Deşiklerin oluşturduğu akım
$J_{sm}$	: Yarıiletkenden metale doğru geçen elektronların akımı
$J_{ms}$	: Metalden yarıiletkene doğru geçen elektron akımı
$J_o$	: Doyma akımı yoğunluğu
$k$	: Boltzmann sabiti
$m^*$	: Deşiklerin etkin kütlesi
$m_o$	: Serbest elektron kütlesi
$\mu_p$	: Deşik mobilitesi
$\mu$	: Geçirgenlik tensörü
$n$	: İletkenlik bandındaki elektron sayısı
$n(x)$	: Elektron yoğunluğu
$n_i$	: Gerçek taşıyıcı yoğunluğu
$N_{ss}$	: Arayüzey durum yoğunluğu
$N_v$	: Değerlik bandındaki etkin durum yoğunluğu
$N_a$	: Alıcı atomlarının yoğunluğu
$N_m$	: Metal ile dengede olan arayüzey durumlarının yoğunluğu
$N_y$	: Yarıiletken ile dengede olan durumların yoğunluğu
$N_D$	: Verici yoğunluğu
$N_c$	: İletkenlik bandındaki etkin taşıyıcı yoğunluğu
$N_D^+$	: İyonize verici konsantrasyonu
$N_A$	: İyonize alıcı konsantrasyonu
$NH_4OH$	: Amonyum hidroksit
$p$	: Değerlik bandındaki deşik sayısı
$Q$	: Yarıiletkende oluşan yük yoğunluğu
$q$	: Elektronik yük
$q\Psi_{(x)}$	: Elektron potansiyel enerjisi

$q\phi_{B(x)}$	: Yarım Fermi seviyesi
$R_s$	: Seri direnç
$\rho$	: Özdirenç
Si	: Silisyum
T	: Kelvin cinsinden sıcaklık
$V_o$	: Kesme voltajı
$V_{bi}$	: Difüzyon potansiyeli
V	: Uygulanan harici beslem
$V_x$	: Elektron hızı
$V_d$	: Difüzyon potansiyeli
$V_i$	: Arayüzey tabaka üzerinde düşen gerilim
w	: Açısal frekans
$W_D$	: Tüketme bölgesinin genişliği
X	: Yarıiletken elektron yatkınlığı
C-V	: Kapasite-gerilim
$C^{-2}$ -V	: Ters kapasite-gerilim
G-V	: İletkenlik-gerilim
Hz	: Hertz
kHz	: Kiloherertz
MS	: Metal/yarıiletken
MHz	: Megahertz
n-Si	: N tipi silisyum
p-Si	: P tipi silisyum
AE	: Alan Emisyonu
RCA	: Amonyum hidroksit ve hidrojen peroksitten oluşan çözelti
TAE	: Termiyonik Alan Emisyonu
TE	: Termiyonik Emisyon

TED : Difüzyon Teorisi

THF : Tetrahidrofüran



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Bir yarıiletkenin enerji bant diyagramı.....	4
Şekil 2.2. Metal, yarıiletken ve yalıtkanın enerji bant diagramları.....	6
Şekil 2.3. Deşiklerin Hareketi (Pozitif Yük Hareketi) [5].....	6
Şekil 2.4. Bor atomu eklenerek elde edilmiş $p$ tipi bir silisyum kristali [8].....	9
Şekil 2.5. Bir metal ve yarıiletkenin enerji bant diyagramları: a) kontakt yapılmadan önce, b) kontakt yapıldıktan sonra [10].....	12
Şekil 2.6. $P$ -tipi bir yarıiletken ile metal malzemenin kontakt öncesi enerji bant diyagramları [8].....	14
Şekil 2.7. Bir metal/ $p$ -tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji bant diyagramı [10].....	15
Şekil 2.8. Metal ile $p$ tipi kontağın düz ve ters beslem altındaki enerji bant diyagramı: a) $V>0$ olması durumunda, b) $V<0$ olması durumunda [10]	16
Şekil 2.9. $P$ tipi bir yarıiletken ile yapılmış omik kontağın enerji bant diyagramı: a) kontakt yapılmadan önce, b) kontakt yapıldıktan sonra [12].....	16
Şekil 2.10. Metal/yarıiletken kontaklarda akım iletim mekanizmalarının şematik gösterimi [10].....	18
Şekil 3.1. (111) düzleminde kesilmiş $p$ -tipi silisyum kristali.....	36
Şekil 3.2. Ultrasonik temizleme cihazı.....	36
Şekil 3.3. Deiyonize su sistemi.....	37
Şekil 3.4. Termal buharlaştırma sistemi. ....	38
Şekil 3.5. Numune tutucu.....	38
Şekil 3.6. Tungsten metal levha .....	39
Şekil 3.7. Döndürme ile kaplama cihazı .....	40
Şekil 3.8. Şekil 3.8. Schottky yapıları: a) Silisyum wafer üzerinde ve b) şematik diagram .....	41
Şekil 3.9. Elektriksel ölçümler için kullanılan cihazlar: a) Keithley 2400	

SourceMeter ve b) Keysight E4990A Impedance Analyzer .....	42
Şekil 4.1. Coronene arayüzey tabakanın yüzey morfolojisi: a) İki boyutlu, b) Üç boyutlu .....	44
Şekil 4.2. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının yarı-logaritmik düz beslem $I-V$ karakteristiği.....	46
Şekil 4.3. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının $dV/(d(\ln I)) - I$ eğrileri .....	48
Şekil 4.4. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının $H(I)-I$ eğrileri .....	48
Şekil 4.5. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının $F(V) - V$ eğrileri....	49
Şekil 4.6. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının arayüzey durum yoğunluğunun enerji dağılım profilleri .....	52
Şekil 4.7. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının $C-V$ eğrileri .....	53
Şekil 4.8. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının $G-V$ eğrileri.....	54
Şekil 4.9 Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının uygulanan voltaja bağlı seri direnç eğrileri.....	55
Şekil 4.10. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının $C^{-2}-V$ eğrileri.....	57
Şekil 4.11. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının arayüzey durumları yoğunluğunun enerjiye bağlı dağılımları.....	62
Şekil 4.12. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının düşük-yüksek frekans kapasite tekniği ile elde edilmiş enerjiye bağlı arayüzey durum yoğunluğu dağılımı .....	64

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 4.1. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarına ait $I$ - $V$ eğrilerinden tayin edilen $n$ , $\Phi_{B0}$ , ve $I_o$ değerleri.....	46
Tablo 4.2. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının Cheung ve modifiye Norde yöntemi kullanılarak elde edilmiş engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç değerleri .....	50
Tablo 4.3. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının $C^2$ - $V$ eğrisi yardımıyla tayin edilen $N_A$ , $V_{bi}$ , $\Phi_B$ , $W_D$ , $E_m$ ve $R_s$ parametreleri.....	60
Tablo 4.4. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının farklı metotlarla elde edilen arayüzey durum yoğunlukları.....	64

# ORGANİK BİLEŞENLİ SCHOTTKY DİYOTLARINDA ARAYÜZEY DURUMLARININ ELEKTRİKSEL İLETKENLİĞE ETKİSİ

## ÖZET

Bu tez çalışmasında, organik bileşenli ve bileşensiz Schottky diyotları üretilmiş ve bu iki yapının karşılaştırmalı olarak temel elektriksel parametrelerindeki değişiklikler incelenmiştir. Bunun için  $p$  tipi bir silisyum alttabaka üzerine ince bir organik arayüzey tabakası kaplanarak metal/organik/inorganik yapılar oluşturulmuştur. Arayüzey tabaka olarak coronenen organik bileşiği kullanılmış olup, bu malzeme silisyum alttabaka üzerine döndürerek kaplama tekniğiyle oluşturulmuştur. Termal buharlaştırma yöntemiyle omik ve doğrultucu kontaklar oluşturulmuş, yapıların oda sıcaklığında ve karanlık ortamda gerilime bağlı akım, kapasite ve iletkenlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerden elde edilen veriler yardımıyla her iki yapı türünün temel diyot parametreleri farklı teknikler kullanılarak incelenmiştir.

Her iki yapı da Schottky tipi davranış göstermiştir. Organik bileşikli arayüzey tabaka, yapıların akımını, ve kapasite değerlerini önemli ölçüde azaltmış, seri direnç değerlerinde ise artma meydana getirmiştir. Her iki yapı türünün de enerjiye bağlı arayüzey dağılım profilleri bant aralığının orta kısmından başlayarak değerlik bandı seviyesine doğru üstel bir şekilde artmıştır. Organik bileşikli yapıdaki tuzak yoğunluklarının organik bileşiksiz yapıdakinden daha az olduğu tespit edilmiş olup, bu durumun oluşturulan organik arayüzey tabakasının silisyum yüzeyini başarılı bir şekilde pasifize ettiğini sonucuna varılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Arayüzey durumları, Schottky diyot, organik yarıiletken

# THE EFFECT OF INTERFACE STATES ON ELECTRICAL CONDUCTION OF ORGANIC COMPOSITED SCHOTTKY DIODES

## SUMMARY

In this thesis work, Schottky diodes were produced with and without organic compound and examined the electrical variations of basic parameters comparatively. For this, a metal/organic/inorganic structures were formed by coating a thin organic interface layer on *p* type silicon substrate. Coronene organic compound was used as an interface layer and this material was formed on *p* type silicon substrate as a thin film by using spin coating technique.

The ohmic and rectifier contacts were performed by thermal evaporation method and the voltage dependent capacitance and conductance measurements of structures were realized at room temperature and in a dark environment. By means of obtained data from the measurements the basic diode parameters of both structures were examined using different techniques.

Both structures were showed the Schottky type behaviour. The organic compound interface layer has decreased the current and capacitance values but increased the series resistance of the structures. The dispersion profiles of energy dependent interface states were exponential increased from midgap band to the edge of valance band level. The trap densities of the structures with organic compound were detected as low level than the structures without organic compound. It was concluded that the organic interface layer was successfully pasivated the silicon surface.

**Keywords:** Interface states, Schottky diode, organic semiconductor

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Schottky tipi kontaklar teknolojik öneme sahip devre elemanlarıdır. *Pn* eklemlere göre daha hızlı anahtarlama yapabilmelerinin yanında düşük gerilimli ve kayıplı olmaları elektronik alanında onları vazgeçilmez kılmıştır. Bu özelliklerinden dolayı yüksek frekanslı işaretlerin doğrultulması yada biçimlendirilmesi şeklinde farklı kullanım alanları bulmuşlardır.

Schottky aygıtları bir metal ve yarıiletkenin birbiriyle teması sonucunda elde edilir. Bu tip yapılarda en çok kullanılan yarıiletkenler silisyum ve germanyumdur. Bu tip aygıtların akım iletimin mekanizmaları çoğunluk taşıyıcı yardımıyla gerçekleşir. Düşük kontak dirençlerinden dolayı doğru beslem uygulandığında çok küçük voltajlarda iletme geçerler. Çoğunluk taşıyıcılarının yanında azınlık taşıyıcılarının az olması aygıttaki gürültü seviyelerini azaltır.

Bir Schottky yapısının elektriksel karakteristiklerini bir arayüzey tabaka ile kontrol etmek mümkündür [1]. Yapıdaki arayüzey tabakaları aygıt parametrelerini etkileyip performansı üzerinde önemli rol oynar [2,3].

Organik arayüzeyli Schottky diyotları son zamanlarda büyük ilgi görmüş ve bu konuda çalışmalar yoğunlaşmıştır. Organik malzemelerin düşük maliyetliliği ve kolay üretimi onları avantajlı hale getirmiştir. Schottky aygıtlarının elektriksel özellikleri büyük ölçüde arayüzey tabakasının varlığına bağlı olup, bu durum malzeme uygulamalarında önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında, Schottky aygıtlarının organik arayüzeyli olan ve olmayanları üretilmiş elektriksel özellikleri araştırılmıştır. Organik arayüzey olarak coronene bileşiği kullanılmış ve Al/coronene/*p*-Si/Al yapıları elde edilmiştir. Yapımı

tamamlanan arayüzeyle ve arayüzeysiz aygıtların gerilime bağı akım ve kapasite ölçümleri oda sıcaklığında ve karanlık ortam altında yapılmıştır. Temel aygıt parametreleri değışik teknikler yardımıyla incelenmiş elde edilen sonuçlar karşılaştırılmalı olarak yorumlanmıştır.



## **BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI**

Günlük hayatta karşılaştığımız her malzeme iletkenlik özelliklerine göre üç şekilde sınıflandırılır: İletkenler, yalıtkanlar ve yarıiletkenler. İletkenlik özelliği bir maddenin öz direncine bağlı olmasının yanısıra, örgü yapısındaki yoğunluk bunların katı içerisindeki parçacıkların hareketi maddenin iletkenlik özelliğinde büyük rol oynar. Metallerde (iletkenler) ise elektrik akımının geçiş şekli farklı olup, elektronik ve iyonik şeklindedir. Elektronlarının akım taşıyıcısı olduğu iletkenlere elektronik geçişli iletken, iyonlarının akım taşıyıcısı olduğu iletkenlere ise iyonik geçişli iletken denir.

Yarıiletken malzemelerde yukarıda bahsedilen geçişlerin her ikisinde mevcut olup, genelde elektronik iletkenliğe sahiptirler. Tüm maddelerin elektriksel iletkenlik özelliklerinin bilinebilmesi için enerji bant diyagramlarının araştırılması gerekmektedir.

### **2.1. Yarıiletkenler**

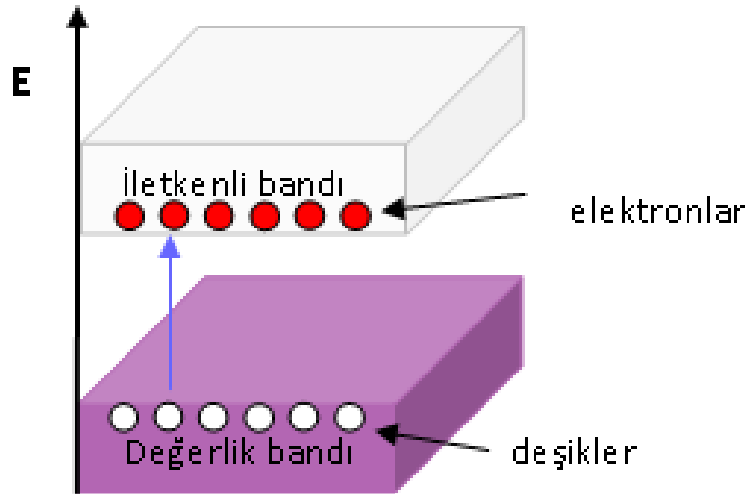
Yarıiletken teknolojiler, elektronik devreleri kullanan hemen hemen tüm cihazlar için çok büyük önem arz etmektedir. Silisyumun yarıiletken karakteristiğinin keşfedilmesinden bu yana, bu alandaki gelişmeler önemli ölçüde hızlanmıştır çünkü silikon dünyadaki en bol bulunan element olarak bilinmektedir.

Bir iletken ile bir yalıtkanın arasında elektrik iletkenliğine sahip olan malzeme yarıiletken olarak adlandırılmaktadır. Yarıiletken malzemelerin özelliklerinden bazıları, 20. yüzyılın ortası ve 19. yüzyıllarında gözlenmiştir. Elektronikte yarı iletkenlerin ilk pratik uygulaması, ilk radyo alıcılarında kullanılan ilkel bir yarıiletken diyodun 1904 yılında geliştirilmesiyle olmuştur. Bazı saf elementler ve birçok bileşik yarıiletken özellikler gösterse de, silikon, germanyum ve galyum

bileşikleri elektronik cihazlarda en yaygın kullanılanlar olarak bilinmektedir. Metaloidlerin periyodik cetvelde bulunduğu “metaloid merdiven” yakınındaki elemanlar genellikle yarıiletkenolarak kullanılmaktadır. Yarı iletkenler, transistörler, ışık yayan diyotlar, güneş hücreleri vb. gibi modern elektroniğin temelini oluşturmaktadır.

Doğal hallerinde yarı iletkenler zayıf iletkenlerdir. Çünkü değerlik bandındaki deşiklerin ve iletkenlik bandındaki elektronların sayısı sınırlıdır. Yarıiletken malzemelerin katkılama (doping) iletken malzemeler gibi davranmasına izin veren birkaç gelişmiş teknik bulunmaktadır. Bunlar n tipi ve p tipi katkılama tekniği olup, sırasıyla elektronların fazlalığı veya yetersizliğini ifade etmektedir. Dengesiz bir elektron sayısı, akımın malzemeden akmasına neden olmaktadır [4].

Yarıiletken aygıtlar akımı bir uçtan diğerine geçirme, değişken direnç ve ışığa veya ısıya duyarlılık gösterme gibi çeşitli faydalı özellikler gösterebilir. Bir yarıiletkenmalzemenin elektriksel özellikleri katkılama ile veya elektriksel alanların veya ışığın uygulanmasıyla modifiye edilebildiğinden, yarı iletkenlerden yapılan cihazlar amplifikasyon, anahtarlama ve enerji dönüşümü için kullanılabilir. Şekil 2.1.'de bir yarıiletkenin enerji bant diyagramı görülmektedir.



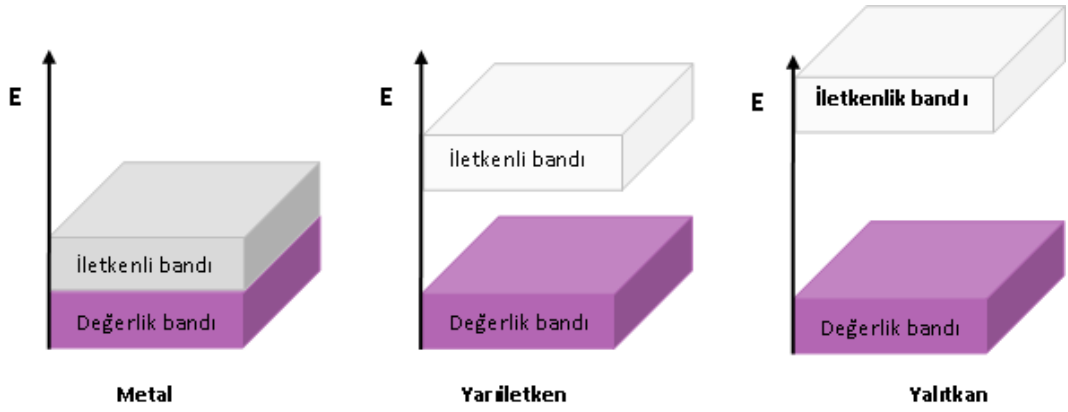
Şekil 2.1. Bir yarıiletkenin enerji bant diyagramı

Yarıiletkenlerde, değerlik bandı ile iletim bandı arasındaki yasak bölge çok fazla büyük değildir. Düşük sıcaklıkta değerlik bandı tamamen elektronlarla doludur ve iletkenlik bandı boştur. Çünkü değerlik bandındaki elektronlar iletkenlik bandına taşınacak kadar enerjiye sahip değildir. Bu nedenle, yarıiletken düşük sıcaklıkta bir yalıtkan olarak davranır.

Bununla birlikte, oda sıcaklığında, değerlik bandındaki elektronların bazıları, ısı sayesinde yeterli miktarda enerji kazanarak iletim bandına geçer. Değerlik elektronları iletim bandına girdiğinde serbest elektron haline gelmektedir. Bu elektronlar bir atomun çekirdeğine bağlı olmayıp serbestçe hareket etmektedirler. Elektronlar iletim bandındaki elektriksel iletkenlikten sorumludurlar. Elektrik akımındaki iletim yeteneğinin ölçüsü elektriksel iletkenlik olarak adlandırılmaktadır. Sıcaklık arttıkça, iletim bandına geçen değerlik grubu elektronlarının sayısı da artmaktadır. Bu durum, yarıiletkenin elektrik iletkenliğinin sıcaklık artışıyla arttığını göstermektedir. Yarı iletkenin direnci sıcaklıktaki artışla azalmaktadır.

## **2.2. Katıların Bant Teorisi**

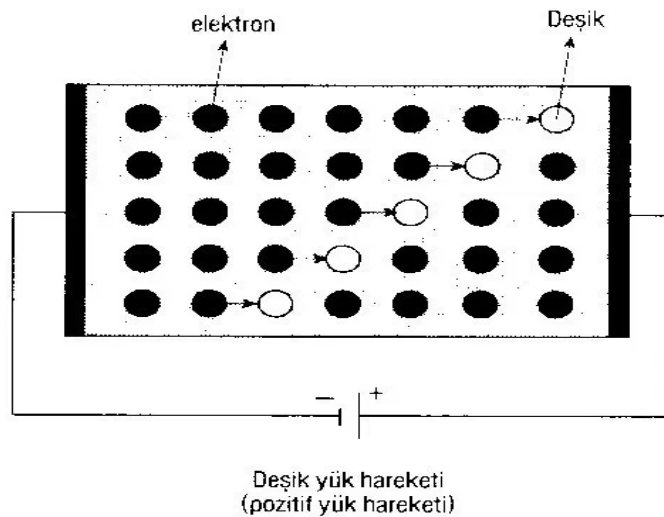
Katıların enerji seviyeleri bantları cinsinden ifade edilmektedir. Bu teoriye göre, bir malzemenin iletken olması için değerlik bandından gelen elektronların iletim bandına kadar hareket edebilmesi gerekmektedir. Yukarı hareket etmekten kasıt, fiziksel olarak yukarı hareket eden bir elektron değil, bir miktar elektron kazanması anlamına geldiğidir. Metaller (iletkenler), değerlik bandının iletim bandıyla üst üste geldiği bir bant yapısına sahip olmaktadır. Sonuç olarak, metaller kolayca elektriği iletir. İzolatörlerde, bant aralığı değerlik bandı ile iletim bandı arasında oldukça büyük olduğundan elektronların iletken bant içine girmesi oldukça zorlaşmaktadır. Buna karşılık, yarı iletkenler değerlik ve iletim bantları arasında küçük bir boşluğa sahiptir. Örneğin, sıcaklığı arttırarak elektronlara değerlik bandından iletim bandına geçmelerine izin verecek kadar enerji vermek mümkündür. Daha sonra elektronlar iletim bandında hareket edebilir ve yarıiletken elektriği iletir. Şekil 2.2.'de bir metal, yarıiletken ve yalıtkanın enerji bant diagramları gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Metal, yarıiletken ve yalıtkanın enerji bant diagramları

### 2.3. Deşik Kavramı

Yarıiletkenlerde, elektrik akımı, elektronlar ve deşikler olan iki tür yük taşıyıcısı tarafından taşınmaktadır. Yarı iletkenlerde yasak enerji aralığı çok dardır. Elektronlar oda sıcaklığında bile, bu dar yasak bandı aşım iletkenlik bandına geçebilmektedir. İletkenlik bandına atlayan elektronlar iletimi sağlar ve serbest elektron durumuna geçerler. İletkenlik bandına geçen elektronlar valans bandında boşluklar bırakır. Bu boşluklara deşik (hole) adı verilir. Şekil 2.3.'de deşiklerin bir katı içerisinde hareketi gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Deşiklerin Hareketi (Pozitif Yük Hareketi) [5]

Deşikler, sürekli olarak komşu elektronlar tarafından doldurulacağı için valans bandı boyunca gezinirler. Saf bir yarı iletken deşik ve elektron sayısı eşittir. Yarıiletkenkristalin iki ucu arasında bir potansiyel farkı uygulanınca, serbest elektronlarla deşikler zıt yönlerde hareket ederler.

#### 2.4. Gerçek Yarıiletkenler

Çoğunluk taşıyıcılarının serbest elektronlar ve deşikler olduğu yarıiletkenlere gerçek yarıiletken adı verilir. Yeterli termal enerjiyi kazanan elektron değerlik bandından iletkenlik bandına geçerse geride bir elektron boşluğu (deşik) bırakacaktır. Değerlik bandındaki her b irakılan boşluğa karşı iletkenlik bandında bir elektron vardır. Sonuçta iletkenlik bandındaki elektronların sayısıyla değerlik bandındaki deşiklerin sayısı birbirine eşit olur. Bu durum (2.1) denklemi ile verilmiştir.

$$p = n = n_i \quad (2.1)$$

$p$  = Değerlik bandındaki deşik sayısı,  $n$  = İletkenlik bandındaki elektron sayısı,  
 $n_i$  = Gerçek taşıyıcı yoğunluğu

Termodinamik denge altında deşik ve elektronlar ile gerçek taşıyıcı sayısı arasındaki ilişki (2.2) denklemi ile verilir.

$$pn = n_i^2 \quad (2.2)$$

Oda sıcaklığındaki bir silisyum içerisinde gerçek taşıyıcı yoğunluğu  $1,45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  mertebesindedir. Sıcaklık artarsa elektronlar enerji kazanarak atomlardan ayrılacak ve iletkenlik bandında serbest hareket edeceklerdir. Böylece akım iletimine katkıda bulunacaklardır. Çok sayıda element ve bileşik yarıiletkenlik özelliklere sahiptir [6]. Bazı saf elementler periyodik tablonun 14. grubunda bulunmaktadır. Ticari olarak bu elementlerin en önemlisi silikon ve germanyumdur. Silisyum ve germanyum etkin bir şekilde kullanılır, çünkü en dış kabuklarında 4 değerlik elektronu bulunur. Bu durum onlara aynı anda eşit miktarda elektron kazanma veya kaybetme yeteneği

vermektedir. Özellikle galyum arsenit gibi 13'üncü ve 15'inci grup elementleri 12'inci ve 16'ıncı grup elementleri, 14'üncü ve 16'ıncı elementler arasındaki ikili bileşik oluşturarak yarıiletkeni meydana getirirler. Diğer taraftan bazı üçlü bileşikler, oksitler ve alaşımların oluşturduğu yarıiletkenler olduğu gibi organik bileşiklerden üretilmiş yarıiletkenler de mevcuttur.

Yaygın olarak kullanılan yarıiletken malzemeler katı kristal yapıdadır. Ancak şekilsiz ve sıvı yarıiletkenler de mevcuttur. Bunlar arasında hidrojenleştirilmiş amorf silikon ve çeşitli oranlarda arsenik, selenyum ve tellür karışımları da bulunmaktadır. Bu tür düzensiz malzemeler, silikon gibi geleneksel yarı iletkenlerin sert kristal yapısından yoksun olmaktadır. Genellikle ince filmlerde kullanılmaktadırlar. Daha yüksek elektronik kalitede malzeme gerektirmeyen yapılarda kullanılmakta, kirlilik ve radyasyon hasarına karşı nispeten duyarsız olmaktadır.

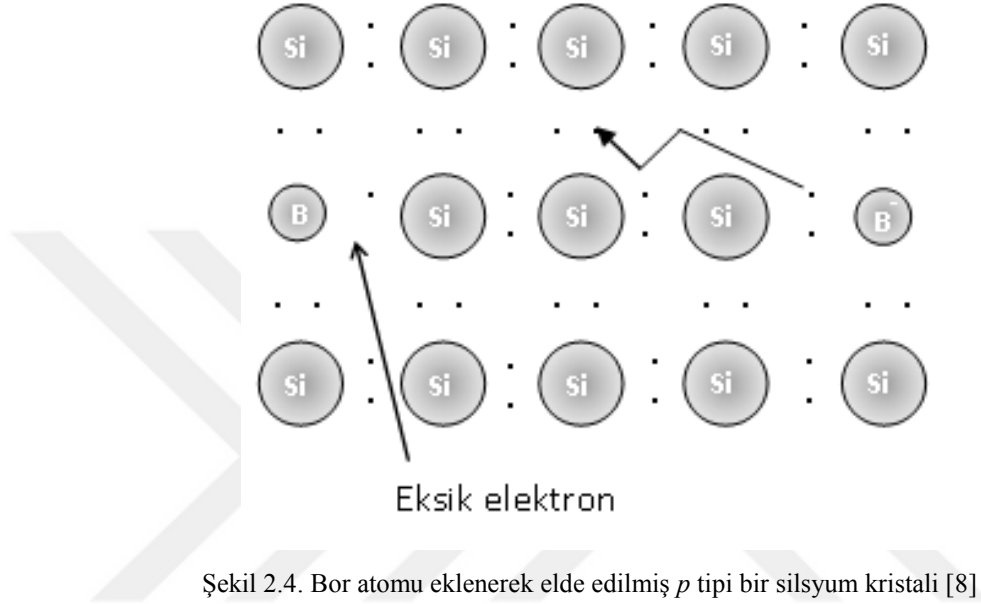
## 2.5. Katkılı Yarıiletkenler

Bir yarıiletken içerisindeki elektronlarla deşiklerin sayılarının eşit olmadığı durumda meydana gelen yarıiletken malzemeye katkı yarıiletken adı verilir. Katkılama ile yarıiletken içerisindeki elektron veya deşik yoğunluğu artırılarak elektriksel özellikler değiştirilebilir. Katkılama işlemi, kristali oluşturan atomların bir kısmının yerine farklı atomların (safsızlıkların) eklenmesidir [7]. Bu işlem ile iletkenlik kontrollü yapmak mümkündür.

$P$  tipi ve  $n$  tipi yarı iletkenler, modern elektronik aletlerin yapımında çok önemli malzemelerdir. İletim yetenekleri kolayca kontrol edilebildiğinden kullanışlı olmaktadır. Her türlü modern elektroniğin içerisinde yer alan diyotlar ve transistörler,  $p$  tipi ve  $n$  tipi yarı iletkenlere ihtiyaç duyarlar.  $P$  tipi ve  $n$  tipi yarıiletken arasındaki temel fark,  $p$  tipi yarıiletkenler Grup III elemanlarına yabancı katkı atomlarının eklenmesiyle elde edilmektedir.

Şekil 2.4.'de Bor atomu eklenerek elde edilmiş  $p$  tipi bir silisyum kristalinin şemetik diyagramı gösterilmektedir. Yarıietkene eklenen bu üç elektronlu atom, silisyum

atomuyla dördüncü bağıny yapmak için bir elektron yakalayıp, bir elektron boşluğuna (deşik) neden olacaktır. Bu deşik kristalin içinde hareket edecek ve yarıiletkenin elektriksel iletkenliğine katkıda bulunacaktır Katıldığı ortamdan elektron alan böyle safsızlık atomlarına alıcı (acceptor), bu tip yarıiletkenlere de *p* tipi yarıiletken adı verilir.



## 2.6. Temel Yarıiletken Denklemleri

Maxwell denklemlerinden elde edilen temel yarıiletken denklemleri, elektrik ve manyetik alan, alan yük yoğunluğu ve akım yoğunluğu cinsinden ( 2.3),( 2.4), (2.5) ve (2.6) denklemleri ile verilir.

$$\text{rot}E = -\partial_t B \quad (2.3)$$

$$\text{div} B = 0 \quad (2.4)$$

$$\text{rot} H = J + \partial_t D \quad (2.5)$$

$$\text{div} D = \rho \quad (2.6)$$

$E$  = Elektrik alan,  $B$  = İndüksiyon alanı,  $H$  = Manyetik alan,

$D$  = Yer değiştirme vektörü,  $J$  = İletim akımı yoğunluğu,  $\rho$  = Yoğunluk

$D$  ile  $E$  ve  $B$  ile  $H$  arasındaki ilişki denklemleri (2.7) ve (2.8) ile verilir.

$$D = \varepsilon \cdot E \quad (2.7)$$

$$B = \mu \cdot H \quad (2.8)$$

$\varepsilon =$  İletkenlik tensörleri,  $\mu =$  Geçirgenlik tensörü

(2.7) ve (2.8) denklemleri yalnızca piezoelektrik veya ferroelektrik olayların oluşmadığı malzemeler için geçerli olup,  $\varepsilon$  ve  $\mu$ ' nin frekans bağımlılığı ihmal edilebilir. Uzay yükü yoğunluğunu  $\rho$ , yük taşıyıcı yoğunluklarının ve iyonize safsızlık konsantrasyonlarının arasındaki ilişki (2.9) denklemi ile verilir.

$$\rho = q \cdot (n - p + N_D^+ - N_A) \quad (2.9)$$

$\rho =$  Uzay yükü yoğunluğunu,  $n =$  elektron yoğunluğu,  $p =$  deşik yoğunluğu,  
 $N_D^+ =$  İyonize verici konsantrasyonu,  $N_A =$  İyonize alıcı konsantrasyonu

Elektrostatik potansiyeli belirleyen, anizotropik malzemeler için Poisson denklemi (2.10) ile verilmiştir.

$$\text{div} (\varepsilon \cdot \text{grad } \psi) = q \cdot (n - p + N_D^+ - N_A) \quad (2.10)$$

$q =$  Elektronik yük,  $n =$  Elektronların yoğunluğu,  $p =$  Deşiklerin yoğunluğu,  
 $N_D^+ =$  İyonize verici konsantrasyonu,  $N_A =$  İyonize alıcı konsantrasyonu

Elektron ve deşiklerin akımları (2.11) ve (2.12) denklemleri ile verilmiştir.

$$\text{div } J_n = q \left( R + \frac{\partial n}{\partial t} \right) \quad (2.11)$$

$$\text{div } J_p = -q \left( R + \frac{\partial p}{\partial t} \right) \quad (2.12)$$

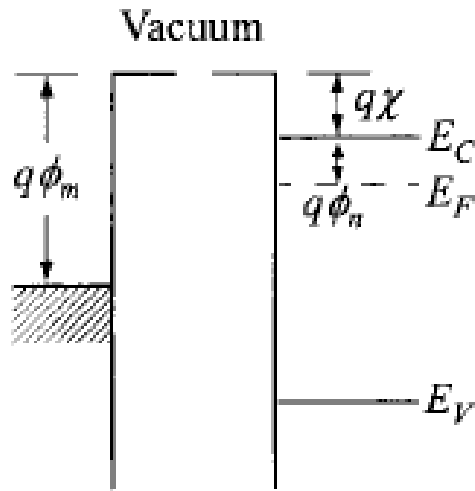
$J_n$  = Elektronların oluşturduğu akım,  $J_p$  = Deşiklerin oluşturduğu akım

$R$  = Elektron ve deşiklerin rekombinasyon hızı

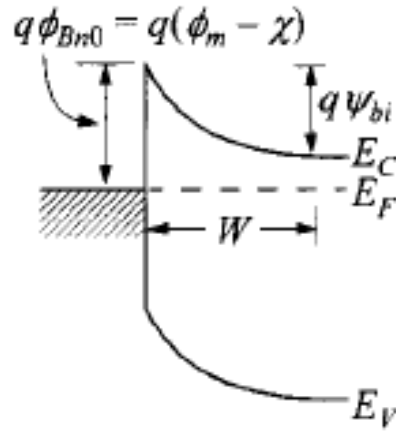
## 2.7. Metal/Yarıiletken (Schottky) Kontaklar

Bir yarıiletken ile metal arasında meydana gelen doğrultucu bir kontak türüdür. Metal ile yarıiletken arasındaki bu doğrultucu etki ilk defa 1874 yılında F. Braun [9] tarafından keşfedilmiş olup, daha sonra 1938 yılında Schottky [3] ve Mott [2] tarafından da açıklanmıştır.

Bir Schottky bariyeri, büyük bir engele sahip iletken bir bant veya değerlik bandındaki durumların yoğunluğundan daha düşük katkılı yoğunluğuna sahip olan bir metal/yarıiletken kontak anlamına gelmektedir. Metal ve yarıiletken arasındaki potansiyel bariyer bir enerji bandı şeması olarak tanımlanabilir. Bu tür bir şema oluşturmak için önce metal ve yarıiletkenin enerji bandı şemasını göz önünde bulundurmanız gerekmektedir. Şekil 2.5.'de bir metal ve yarıiletkenin kontak yapılmadan önce ve sonraki enerji bant diyagramları gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.5. Bir metal ve yarıiletkenin enerji bant diyagramları: a) kontakt yapılmadan önce, b) kontakt yapıldıktan sonra [10]

Engel yüksekliği ( $\phi_{Bn}$ ), metalin Fermi enerjisi ile çoğunluk taşıyıcısının bulunduğu bant kenarı arasındaki potansiyel fark olarak tanımlanır. Şekil 2.5.'den,  $n$  tipi yarı iletkenler için engel yüksekliği (2.13) denkleminde verilmektedir.

$$\phi_{Bn} = \phi_m - X \quad (2.13)$$

$\phi_m$  = Metalin iş fonksiyonunu,  $X$  = Elektron yakınlığı,

$\phi_{Bn}$  = Metalin Fermi enerjisi ile çoğunluk taşıyıcısının bulunduğu bant kenarı arasındaki potansiyel fark

Metalin Fermi enerjisi, iletim ve değerlik bandı kenarı arasına yerleşmişse, metal/yarıiletken kontakt elektronlar ve deşikler için bir engel oluşturur. (2.13) denkleminde ek olarak iş fonksiyonu farkını metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonu arasındaki fark olarak tanımlayabiliriz.  $N$  tipi bir malzeme için iş fonksiyonu (2.14) denkleminde verilmiştir.

$$\phi_{wf} = \phi_m - X - \frac{E_C - E_{F,n}}{q} \quad (2.14)$$

$\phi_{wf}$  = Metalle yarıiletken arasındaki iş fonksiyonu farkı,  
 $\phi_m$  = metalin iş fonksiyonu,  
 $X$  = Elektron yakınlığı,  $E_c$  = İletkenli bant enerjisi,  
 $E_{F,n}$  = n tipi yarıiletkenin Fermi enerjisi,  $q$  = Elektronik yük

$P$  tipi yarıiletkenler için ise (2.14) denklemini (2.15) şeklini alır.

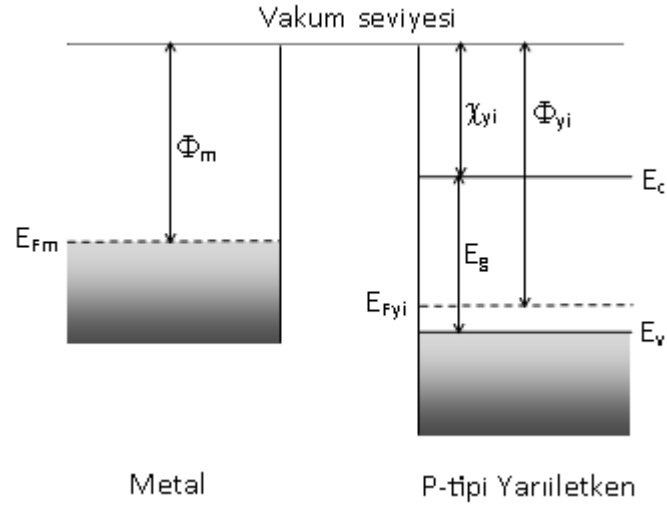
$$\phi_{wf} = X + \frac{E_c - E_{F,p}}{q} - \phi_m \quad (2.15)$$

$E_{F,p}$  =  $p$  tipi yarıiletkenin Fermi enerjisi

Schottky kontaktlar omik ve doğrultucu olmak üzere iki çeşittir. Omik veya doğrultucu olma durumlarını metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları belirler. İdeal bir metal/yarıiletken teorisi, her iki malzemenin de saf olduğunu ve iki malzeme ile herhangi bir arayüzey katmanı arasında bir etkileşim olmadığını varsayar. Metal ve yarıiletken arasındaki kimyasal reaksiyonlar, yarıiletken yüzeyinde ve arayüzey katmanlarının yüzeyinde engel yüksekliğini değiştirmektedir. Ayrıca, literatürde bildirilen engel yüksekliklerinin farklı yüzey temizleme aşamaları nedeniyle geniş ölçüde değiştiği tespit edilmiştir.

### 2.7.1. Metal/ $p$ -tipi yarıiletken kontak

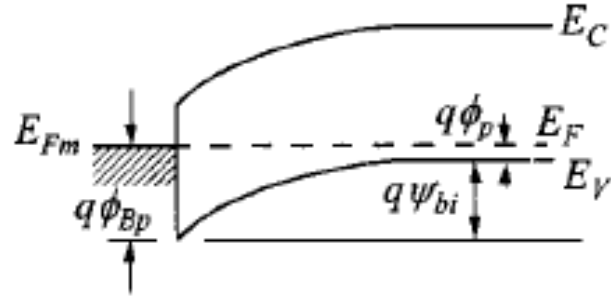
Şekil 2.6.'da  $p$ -tipi bir yarıiletken ile bir metalin kontakt öncesi enerji band diyagramları verilmiştir. Kontakt yapılmadan önce yarıiletken Fermi seviyesi, metaldeki Fermi seviyesinin altındadır. Kontakt sonrası yük alış verişi olabilmesi için taşıyıcı parçacıkların enerjilerinin metalin iş fonksiyonuna eşit olması gerekir. İş fonksiyonu, bir elektronu metalden çıkarmak için elektrona verilmesi gerekli enerji olarak da tanımlanabilir.



Şekil 2.6. *P*-tipi bir yarıiletken ile metal malzemenin kontakt öncesi enerji band diyagramları [8]

Bir yarıiletken ile metalin kontakt sonrası iki malzeme arasında yük geçişleri başlar ve bu iki malzemenin Fermi enerji seviyeleri eşit olana kadar devam eder. Maddeler arasındaki yük geçişlerini deşikler yapıyorsa bu tür kontaklara doğrultucu kontakt adı verilir. Bu durum yarıiletkenin iş fonksiyonunun metalde daha büyük olması şartını sağlar ( $\phi_s > \phi_m$ ) [11].

Kontakt yapıldıktan sonra Fermi seviyeleri arasındaki fark iki malzemenin iş fonksiyonlarının farkına ( $\phi_s - \phi_m$ ) eşit olur. Şekil 2.7.'de bir metal/*p*-tipi yarıiletken doğrultucu kantağın enerji band diyagramı verilmiştir [12]. Kontakt yapıldıktan sonra metalle yarıiletken arasında Fermi seviyeleri eşit oluncaya kadar yük akışı oluşur ve bantlar bükülür. Yarıiletken malzeme içerisinde eksi yüklerin çoğunlukta olduğu belirli kalınlığa sahip bir bölge oluşur. Bu bölgeye tüketme tabakası, tabakada bulunan yüklere de uzay yükleri adı verilir. Termal denge durumuna gelindiğinde engeli aşan elektronların sayısı ile engeli ters yönde aşan elektronların sayısı birbirine eşittir ve diyottan geçen net akım sıfırdır. Metal tarafındaki artı yüklerle eksi uzay yükleri eklem bölgesinde bir kapasite meydana getirir. Bu kapasiteye Schottky kapasitesi adı verilir. İyonize olmuş alıcı safsızlıkları ile dolmuş eklem bölgesinin yarıiletken tarafında  $W_D$  kalınlığında bir tüketme tabakası oluşur.



Şekil 2.7. Bir metal/*p*-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji bant diyagramı [10]

Yarıiletken içerisinde bulunandeşikler için difüzyon potansiyeli (2.16) denklemi ile verilmiştir.

$$V_d = \frac{1}{q} (\Phi_s - \Phi_m) \quad (2.16)$$

$V_d$  = Difüzyon potansiyeli,  $\Phi_s$  = Yarıiletkenin iş fonksiyonu,  
 $\Phi_m$  = Metali iş fonksiyonu

Metal tarafındaki engel yüksekliği (2.17) denklemi ile verilir.

$$\Phi_B = X_s + E_g - \Phi_m \quad (2.17)$$

$\Phi_B$  = Engel yüksekliği,  $X_s$  = elektron yakınlığı,  
 $E_g$  = Yarıiletkenin yasak enerji band aralığı

Şekil 2.8.'de bir metal ile *p* tipi kontağın düz ve ters beslem altındaki enerji band diyagramı verilmiştir [12]. Şekil 2.8a'da görüldüğü üzere, diyoda harici bir düz beslem uygulanırsa tüketim bölgesi genişliği azalır ve difüzyon potansiyeli uygulanan harici beslemin değeri kadar düşer. yarıiletken tarafındaki engel azaldığı için metale doğrudeşikler daha fazla akar. Şekil 2.8b'de görüldüğü üzere, diyoda harici bir ters beslem uygulanırsa tüketim bölgesi genişliği artar difüzyon potansiyeli

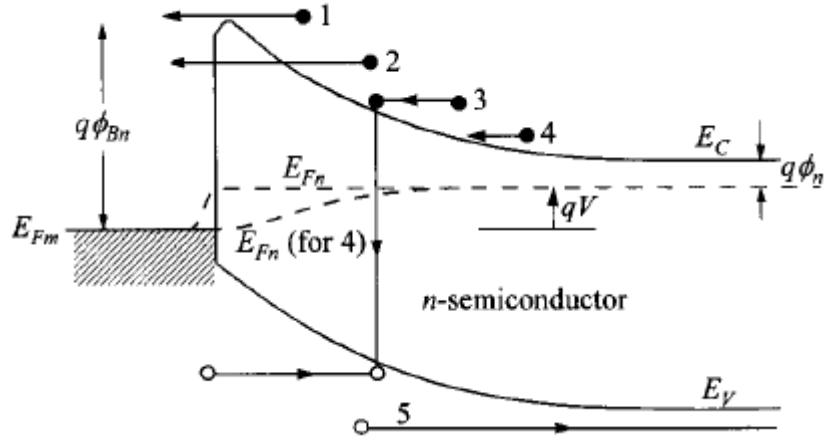


## 2.8. Metal/yarıiletken Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları

Schottky kontaklarda akım iletim mekanizmaları Rhoderick [14] tarafından incelenmiştir. Metal/yarıiletken kontaklarda akım iletimi elektron veya deşikler ile sağlanmaktadır [12]. Metal/yarıiletken kontaklardaki akım iletim mekanizmalarına sıcaklık, seri direnç, yarıiletkenin tipi, metal ile yarıiletken arasındaki oksit tabakası, arayüzey durumları ve gerilimin yönü gibi birçok faktör etki edebilir. Schotky yapılarında hangi akım iletim mekanizmasının oluştuğunu bilmek yapının performansını belirlemek açısından önemlidir. Metal/yarıiletken kontaklardaki başlıca akım iletim mekanizmaları aşağıdaki şekildedir [15, 16]:

- Termiyonik Emisyon (TE)
- Difüzyon Teorisi (TED)
- Termiyonik Alan Emisyonu (TAE)
- Alan Emisyonu (AE), Çok katlı tünelleme
- Uzay yük bölgesinde yeniden birleşme
- Yüksüz bölgede yeniden birleşme
- Deşik enjeksiyonu

Şekil 2.10.'da düz beslem altında bir metal/n-tipi yarıiletkenin akım iletim mekanizmaları şematik olarak verilmiştir. Burada, 1 gösterimi potansiyel engelini aşan elektronların iletimi, 2 gösterimi elektronların kuantum mekaniksel tünellemesini, 3 gösterimi uzay yük bölgesinde yeniden birleşme mekanizmasını, 4 gösterimi tüketme bölgesindeki elektronların difüzyonunu ve 5 gösterimi ise metalden yarıiletkene deşik enjeksiyonunu ifade eder.



Şekil 2.10. Metal/yarıiletken kontaklarda akım iletim mekanizmalarının şematik gösterimi [10]

### 2.8.1. Termiyonik emisyon (TE) teorisi

Bu teori metal/yarıiletken kontaklarda yeterli termal enerjiye sahip taşıyıcıların metal tarafından yarıiletkene ve yarıiletken tarafından da metale doğru geçerek oluşturduğu bir akımı tarif eder [12]. Sıcak bir yüzeyden elektron yada deşik salınımı termiyonik emisyon olarak bilinir [13, 11]. Bu akım mekanizmasının kabul ettiği bazı varsayımlar vardır. Bunlar aşağıdaki gibi olup, bölgesel alan ve yoğunluk farkına bağlı olarak tanımlanmıştır:

- Engel yüksekliği  $kT$  enerjisinden çok büyüktür.
- Akım sıcaklıkla uyarılmış çoğunluk taşıyıcılarıyla sağlanır.
- Yarıiletken aşırı katkılandırılmamış olup, safsızlık yoğunluğu dejenere değildir.
- Görüntü kuvvet etkisi ihmal edilir, engelin şekli önemsizdir ve akım engel yüksekliğine zayıfça bağlıdır.
- Metal taraf hareket eden serbest deşiklerin tüketme bölgesindeki çarpışmaları ihmal edilir.

Tüketme bölgesindeki akım yoğunluğunu (2.18) denklemi ile verir.

$$J_{sm} = \int_{E_F + q\phi_B}^{\infty} qV_x dn \quad (2.18)$$

$V_x$  = Elektron hızı,  $dn$  = Küçük bir enerji aralığındaki elektron yoğunluğu,  
 $E_F + q\phi_B$  = Termoiyonik emisyon için gerekli minimum enerji

(2.18) denklemi yardımıyla yarıiletken den metale doğru geçen elektronlar için akım ifadesi denklem (2.19) ile verilir.

$$J_{sm} = \left( \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp\left[ \frac{-q(\phi_B)}{kT} \right] \exp\left( \frac{qV}{kT} \right) \quad (2.19)$$

$J_{sm}$  = Yarıiletken den metale doğru geçen elektronların akımı

$m^*$  = Taşıyıcının etkin kütlesi,  $k$  = Boltzmann sabiti,  $h$  = Planck sabiti,

$q$  = Elektronik yük,  $T$  = Kelvin cinsinden sıcaklık,  $\phi_B$  = Engel yüksekliği,

$m^*$  = Taşıyıcıların etkin kütlesi

Gerekli düzenlemelerden sonra (2.19) denklemi (2.20) şeklini alır.

$$J_{sm} = A^* T^2 \exp\left( \frac{-q\phi_B}{kT} \right) \exp\left( \frac{qV}{kT} \right) \quad (2.20)$$

$A^*$  = Richardson sabiti

Richardson sabiti (2.19) denklemindeki ilk terime karşılık gelir. Yarıiletkene geçen elektronların meydana getirdiği akım yoğunluğu ise metal tarafında bulunan engel yüksekliği sabit kaldığından dolayı (2.21) denklemi ile verilir.

$$J_{ms} = -A^* T^2 \exp\left( \frac{-q\phi_B}{kT} \right) \quad (2.21)$$

$J_{ms}$  = Metalden yarıiletkene doğru geçen elektron akımı

Toplam net akım yoğunluğu (2.20) ile (2.21) denklemlerindeki akımların toplamıdır ve (2.22) denklemi ile verilir.

$$J = \left[ A^* T^2 \exp\left( \frac{-q\phi_B}{kT} \right) \right] \left[ \exp\left( \frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.22)$$

(2.22) denklemindeki ilk terim doyma akımı yoğunluğunu ifade eder.

### 2.8.2. Difüzyon teorisi

Difüzyon teorisi, yoğunlukları farklı olan iki bölge arasındaki yoğunluğu çok olan bölgeden az olan bölgeye doğru taşıyıcı geçişini tanımlar [12]. Bu akım mekanizmasının kabul ettiği varsayımlar aşağıdaki şekildedir:

- Engel yüksekliği  $kT$  termal enerjisinden çok büyüktür ( $q\phi_{bn} \gg kT$ )
- Yarıiletken aşırı katkılandırılmamış olup, saflık konsantrasyonu dejenere değildir.
- Tüketme bölgesindeki deşikler çarpışmalara uğrar ve ortalama serbest yolları tüketme bölgesi genişliğinden küçüktür.
- Tüketme tabakası boyunca taşıyıcı yoğunlukları dengede olup, termal dengeden dolayı akan akımdan etkilenmez.

Bu mekanizma için bölgesel alan ve yoğunluk farkına bağlı olacak şekilde (2.23) denklemini yardımıyla bir akım yoğunluğu tanımlanmıştır.

$$J = q \left[ n(x)E(x)\mu + D_n \frac{\partial n}{\partial x} \right] = qD_n \left[ \left( \frac{-qn(x)}{kT} \right) \left( \frac{\partial V(x)}{\partial x} \right) + \left( \frac{\partial n}{\partial x} \right) \right] \quad (2.23)$$

$n(x)$  = Elektron yoğunluğu,  $\mu$  = Elektron mobilitesi,  $D_n$  = Elektron difüzyon sabiti,

$E(x)$  = Metal/yarıiletken bölgesindeki elektrik alanı

Gerekli düzenlemeler sonucunda (2.24) denklemini elde edilir.

$$J = J_n \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.24)$$

$J_n$  = Doyma akımı yoğunluğu,

$J_n$  ifadesi (2.25) ile verilir.

$$J_n = \left( \frac{q^2 N_c D_n}{kT} \right) \left[ \frac{q(V_d - V)}{\epsilon_s} \right]^{1/2} \exp\left( \frac{-q\Phi_B}{kT} \right) \quad (2.25)$$

$N_c$  = İletkenlik bandındaki etkin taşıyıcı yoğunluğu,  $N_D$  = Verici yoğunluğu,

$\epsilon_s$  = Yarıiletkenin dielektrik sabiti

(2.22) ile (2.25) denklemlerini karşılaştırsak, difüzyon akımının uygulanan harici gerilimle değiştiğini ancak termiyonik emisyon akımı gibi sıcaklığa çok fazla bağımlılığı olmadığı görülür.

### 2.8.3. Termiyonik emisyon difüzyon (TED) teorisi

Bu akım mekanizması termiyonik emisyon ve difüzyon mekanizmalarının birleşmiş şeklidir. Bu teori metal/yarıiletken arayüzeyinde varsayılan yeni bir birleşme hızını esas alır. Metalle yarıiletken gövde arasına uygulanan bir voltaj eklemde elektron akışına sebep olur. Buna göre yeni elektron akımı (2.26) denklemi ile verilir.

$$J = -qn\mu \left( \frac{d\Phi_B}{dx} \right) \quad (2.26)$$

Aşağıda (2.27) denklemi elektron yoğunluğunu verir.

$$n = N_c \exp\left( \frac{-q(\Phi_B - \Psi)}{kT} \right) \quad (2.27)$$

$q\Psi_{(x)}$  = Elektron potansiyel enerjisi,  $q\Phi_{B(x)}$  = Yarı Fermi seviyesi

Bu teori kapsamında akımı oluşturacak taşıyıcıların bir bölümü optik foton geri saçılmasına uğrar. Diğer bölümü ise kuantum yansımaya uğrayarak taşıyıcıların yeniden birleşme hızında bir azalmaya neden olur [12].

Metal/yarıiletken kontağın arayüzeyinden elektronların optik fotonlarla etkileşmeden geçmesi Richardson sabitini değiştirir. Bunun sonucunda oluşan yeni akım yoğunluğu (2.28) denklemi ile verilir.

$$J=J_0 \left( \exp \left( \frac{qV}{kT} \right) - 1 \right) \quad (2.28)$$

$J_0$  = Doyma akımı yoğunluğu

Doyma akımı yoğunluğu (2.29) denklemi ile verilmektedir.

$$J_0 = A^{**} T^2 \exp \left( \frac{-q\phi_B}{kT} \right) \quad (2.29)$$

$A^{**}$  = Modifiye Richardson sabiti

#### 2.8.4. Engel boyunca tünelleme

Engel boyunca tünelleme teorisi, aşırı katkılanmış fakat dejenere olmamış yarıiletkenlerde elektronların kuantum-mekaniksel olarak engel boyunca tünelleme yaparak eklemın öbür tarafına geçmelerini tanımlar. Bu geçiş iki şekildedir:

- Alan emisyonu (AE)
- Termoyonik alan emisyonu (TAE)

Yarıiletken aşırı katkılanırsa tüketim bölgesi ince bir hal alır. Böylece Fermi seviyesine yakında olan elektronlar düşük sıcaklıkta bile metale doğru tünelleme yapabilir. Bu durumda alan emisyonu adı verilen bir mekanizma meydana gelir. Sıcaklık yükselirse elektronların çoğu Fermi seviyesinin üzerine yükselerek engele ulaşmadan tünellemeyle metal tarafa doğru geçerler. Termal elektronların meydana getirdiği bu şekildeki bir mekanizmaya termoyonik alan emisyonu adı verilir. Bunun sonucunda Fermi seviyesi üzerindeki elektronların sayısı azalarak yeni bir enerji oluşur. Sıcaklığın yükselmesiyle elektronların karşılaşıcağı engel daha

küçüleceğinden tünelleme ihtimali artar. Sıcaklık çok daha artarsa bütün elektronlar engelin üstüne ulaşarak aşacak diğer tarafa geçecek ve böylece termoiyonik emisyon mekanizması etkin olacaktır. Metal/yarıiletken kontaklarda tünelleme mekanizmasını teorik olarak Crowell ve Rideout (1969) [17] ile Padovani ve Stratton (1966) [18] incelemiştir. Yüksek katkılandırılmış yarıiletkenlerde tünelleme işlemi düz beslemde, düşük katkılandırılmış yarıiletkenlerde ise ters beslemde ortaya çıkar [18].

## 2.9. İdealite Faktörü

Aygıtın yapımı aşamalarında çeşitli nedenlerden dolayı ideal olan durumdan sapmalar meydana gelmektedir. İdeallik faktörü ideal olan yapıdan ne kadar sapıldığını belirlemek için tanımlanmış olan bir parametre olup, arayüzey durum yoğunluğuna ve kalınlığına bağlı olarak (2.30) denklemi ile verilir.

$$n=1+\frac{\left(\frac{\delta}{\epsilon_i}\right)\left(\frac{\epsilon_s}{W_D+qN_y}\right)}{1+\left(\frac{\delta}{\epsilon_i}\right)qN_m} \quad (2.30)$$

$\delta$  = arayüzey tabakasının kalınlığı,  $\epsilon_i$  = Arayüzey tabakasının dielektrik sabiti,

$N_m$  = Metal ile dengede olan arayüzey durumlarının yoğunluğu,

$N_y$  = Yarıiletken ile dengede olan durumların yoğunluğu,

$\epsilon_s$  = Yarıiletkenin dielektrik sabiti

$W_D$  = Tüketme bölgesinin genişliği

(2.30) denklemi değişik şekiller alabilir. Örneğin düşük arayüzey yoğunluklu durumlar için denklem (2.31) şeklini alır.

$$n=1+\frac{\delta\epsilon_s}{W_D\epsilon_i} \quad (2.31)$$

İdeallik faktörü, arayüzey durumları metalle dengede olduğu zaman (2.32) denklemi ile verilir.

$$n=1+\frac{\delta\epsilon_s}{W_D(\epsilon_i+qN_m)} \quad (2.32)$$

Bu durumda arayüzey durum yoğunluklarının ve arayüzey tabakasının idealite faktörüne katkısı az olup, aygıt ideal bir davranış gösterir. Arayüzey durumları yarıiletkenle denge durumundaysa (2.30) denklemi (2.33) denklemine dönüşür.

$$n=1+\left(\frac{\delta}{\epsilon_i}\right)\left(\frac{\epsilon_s}{W_D+qN_y}\right) \quad (2.33)$$

Arayüzey tabakasının kalınlığı ve arayüzey durumlarının yoğunluğu artarsa idealite faktörü de artar [19].

## 2.10. Seri Direnç

Seri direnç bir diyodun kötü performans sergilemesinin sebeplerinden biri olarak görülmektedir. Ters beslem göz önüne alındığında ideal bir diyodun gösterdiği direnç oldukça yüksek olur. Düz beslem göz önüne alındığında ise seri direnç çok küçük olmalıdır. Seri direnç, Schottky tabanlı aygıtlar için önemli bir parametredir. Küçük bir anot alanına sahip olan bir Schottky diyotun akım-gerilim ( $I-V$ ) özellikleri üzerindeki etkileri büyüktür.

Bir yapıda seri direnç çeşitli nedenlerle oluşabilir. Yarıiletkenin gövde içinde düzensiz dağılmış safsızlıklar, yarıiletkenin tüketim tabakası ile omik kontağı arasındaki gövdenin direnci, yarıiletkenin gövdesiyle kontak arasında yerleşmiş kirli yüzey tabakaları, omik kontağa elektriksel ölçüm için bağlanmış teller bu nedenler arasında sayılabilir.

### 2.10.1. Seri direnç belirleme yöntemleri

Seri direnç arayüzey durum yoğunluğu hesaplarında ve diğer diyot parametrelerinin belirlenmesinde ciddi hatalara neden olabilir. Seri direnç etkisini numunenin üretim aşamasında ve ölçüm sonrasındaki aşamalarda değişik teknikler kullanılarak azaltmak mümkündür.

Bir metal/yarıiletken aygıtın seri direncini belirlemek için gerilime bağlı akım ölçümlerinin kullanıldığı değişik yöntemler vardır. Bunlardan en çok kullanılanları

Norde yöntemidir [20]. Norde yöntemi ideallik faktörü 1 olan yapılar için doğru sonuçlar verir. İdeallik faktörünün 1'den büyük olduğu durumlar için ise modifiye Norde yöntemi geliştirilmiştir [21].

Diğer taraftan değişik sıcaklıkların kullanıldığı seri direnç belirleme yöntemi ile (McLean) [22] seri direncin etkin olduğu yüksek voltaj bölgesinde hesaplama yapan diğer yöntemler de mevcuttur [23].

### 2.10.1.1. Norde Yöntemi

Bu yöntem ideallik faktörü 1 olan aygıtlar için geçerli olup, orijinal bir  $F(V)$  fonksiyonunu kullanır. Bu yöntemde diyot parametrelerini tayin etmek için  $F(V)$  fonksiyonunun minimum noktasından yararlanılır. Tek bir sıcaklıkta elde edilmiş akım-gerilim ölçümleri kullanılarak ki  $I-V$  eğrisini kullanmak engel yüksekliği ve seri direnç parametreleri elde edilir.

(2.22) denklemi daha genel olarak yazılırsa (2.34) denklemi elde edilir.

$$I = AA^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \left\{ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right\} \quad (2.34)$$

$I$  = Diyot akımı,  $\phi_B$  = Engel yüksekliği,  $k$  = Boltzmann sabiti,

$q$  = Elektronik yük,  $T$  = Kelvin cinsinden sıcaklık,  $A$  = Diyodun kontakt alanı,

$n$  = İdeallik faktörü,

Aygıta uygulanan harici beslemin bir bölümü diyodun seri direncinin üzerine düşeceğinden dolayı (2.34) denklemi (2.35) şeklini alır.

$$I = AA^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \left\{ \exp\left(\frac{q(V-IR)}{nkT}\right) - 1 \right\} \quad (2.35)$$

$V$  = Harici beslem,  $R$  = Seri direnç,

$(V-IR)$  = Diyot üzerine düşen gerilim

Seri direncin yüksek olduğu durumlarda akım-gerilim eğrisinin lineer bölgesi oldukça küçülür. Bu durumda Norde, seri direnç hesaplamaları için (2.36) denklemini tanımlamıştır.

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (2.36)$$

(2.35) denkleminin her iki tarafının  $\ln$ 'i alınıp (2.36) denkleminde yerine konursa (2.37) denklemi elde edilir.

$$F(V) = \left(\frac{n-2}{2n}\right)V - \frac{IR}{n} + \Phi_B \quad (2.37)$$

$n$  = İdelite faktörü

Seri direnç sıfır olduğunda  $F(V)$ - $V$  eğrisinin eğimi (2.38) denklemini verir ve eğrinin voltaj eksenini kestiği nokta yapının engel yüksekliğine karşılık gelir.

$$\frac{n-2}{2n} \quad (2.38)$$

Seri direnç sıfırdan farklıysa eğri bir minimumdan geçer ve (2.39) denklemi geçerli olur.

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{V}{AA^*T^2R}\right) \quad (2.39)$$

(2.34) denkleminin  $V$ 'ye göre türevi alınıp (2.39) denkleminde yerine konursa (2.40) denklemi elde edilir.

$$\frac{\partial F(V)}{\partial V} = \frac{n-2+\beta IR}{2(n+\beta IR)} \quad (2.40)$$

$$\beta = q/kT \quad (2.41)$$

(2.40) denkleminin sifira eşit olması durumunda (2.42) denklemini elde edilir.

$$n - 2 + \beta IR = 0 \quad (2.42)$$

Buradan seri direncin ve engel yüksekliğinin belirlenmesinde kullanılacak denklemler (2.43) ve (2.44) ile verilmiştir.

$$R_s = \frac{(2-n)kT}{qI} \quad (2.43)$$

$$\Phi_B = F(V)_{\min} + \left(\frac{2-n}{2n}\right) \frac{V_0}{2} - \frac{kT}{q} \quad (2.44)$$

$V_0 = F(V)$  eğrisinin minimumdaki gerilim değeri

İdealite faktörünün 1'den büyük olması durumlarında bir modifiye Norde fonksiyonu geliştirilmiştir [24]. Bu yöntemde  $F(V)$  fonksiyonun  $V/2$  olan ilk teriminin yerine  $V/\gamma$  terimini kullanılmıştır.  $\gamma$  parametresi idealite faktöründen büyük bir tam sayıdır. Bu yöntem idealite faktörü birden çok büyük olan aygıtlar için belirlenecek olan parametrelerin daha doğru olmasını sağlar. Modifiye edilmiş Norde fonksiyonu (2.45) denklemi ile verilir.

$$F(V, \gamma) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \ln \left( \frac{I}{AA^* T^2} \right) \quad (2.45)$$

(2.35) denkleminin iki tarafının  $\ln$ 'i alınarak ve (2.45) denklemi kullanılarak, yukarıda bahsedilen düzenlemeler yapıldığında, seri direnç ve engel yüksekliğini belirlemede kullanılacak yeni denklemler (2.46) ve (2.47) ile verilir.

$$\Phi_B = F(V_0, \gamma) - \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n}\right) V_0 - \frac{(\gamma-n)}{\beta n} \quad (2.46)$$

$F(V_0, \gamma) = \gamma$  parametresine bağlı yeni  $F(V)$  eğrisinin minimumu

$V_0 =$  Yeni  $F(V)$  eğrisinin minimumdaki gerilim değeri

$$R_s = \left( \frac{\gamma-n}{\beta I_0} \right) \quad (2.47)$$

### 2.10.1.2. Cheung yöntemi

Bu yöntem metal/yarıiletken aygıtlardaki seri direncin akım-gerilim eğrilerinin yüksek voltaj bölgesini kullanarak belirlenmesini mümkün kılar [23]. Bunun için (2.34) denkleminin her iki tarafının  $\ln$ 'i alınarak düzenlendiğinde (2.48) denklemi elde edilir.

$$V = \left( \frac{nkT}{q} \right) \ln \left( \frac{I}{AA^* T^2} \right) + n\Phi_B + IR_s \quad (2.48)$$

(2.48) denkleminin her iki tarafının  $\ln I$ 'ya göre türevi alındığında (2.49) denklemi elde edilir.

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (2.49)$$

(2.49) denklemi akıma karşı çizildiğinde bir doğru elde edilir. Bu doğrunun eğimi aygıtın seri direncini, düşey eksen kestiği noktası ise aygıtın ideallik faktörünü verir. Engel yüksekliğini belirlemek için (2.50) denklemi kullanılır.

$$H(I) = V - \left( \frac{nkT}{q} \right) \ln \left( \frac{I}{AA^* T^2} \right) \quad (2.50)$$

$H(I) =$  Cheung fonksiyonu,  $V =$  Uygulanan voltaj

(2.48) ve (2.49) denklemleri kullanılmak suretiyle aygıtın engel yüksekliği (2.51) denklemi ile belirlenir.

$$H(I) = n\Phi_B + IR_s \quad (2.51)$$

$n$  = İdeallik faktörü,

(2.51) denklemi akıma karşı çizildiğinde lineer bir doğru olması beklenir. Bu lineer doğrunun eğimi seri direnç değerini, düşüyük ekseni kestiği nokta ise engel yüksekliği verecektir.

## 2.11. Akım-gerilim Karakteristikleri

Schottky yapılarında akımın iletilmesi çoğunluk taşıyıcılarıyla olup, azınlık taşıyıcılarının akıma katkısı ihmal edilir. Bu aygıtlarda yük taşıyıcılarının termal uyarımayla engeli aşması özelliği onun diğer aygıtlara göre daha hızlı olmasını sağlar. Aşırı katkılanmış aygıtlarda ise meydana gelebilecek tünelleme akımları aygıtın elektriksel performansına katkı sağlar.

Schottky aygıtlarının akım iletim mekanizmasında düz beslem yüksek olmadıkça termoiyonik emisyon teorisi geçerli olur. (2.52) denklemiyle aygıtın akım-gerilim ilişkisi verilmiştir.

$$I=I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.52)$$

$I_0$  = Doyma akımı

Doyma akımı (2.53) denklemiyle verilir.

$$I_0=AA^* T^2 \exp\left[\frac{-q(\Phi_{B0})}{kT}\right] \quad (2.53)$$

$A$  = Diyot kontakt alanı,  $\Phi_{B0}$  = Sıfır beslem engel yüksekliği,

$A^*$  = Richardson sabiti

Richardson sabiti, yarıiletken içerisinde bulunan elektronların etkin kütlesi, engeli aşan elektronların kuantum-mekanik yansımaları ve elektronların fonon saçılmasına bağlı olup (2.54) denklemi ile verilir.

$$A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \quad (2.54)$$

$q$  = Elektronik yük,  $m^*$  = Taşıyıcıların etkin kütlesi,  $k$  = Boltzmann sabiti,  
 $h$  = Planck sabiti

(2.52) denklemi ideal bir Schottky eklemeni tanımlar. Ancak arayüzey tabakasından yada tüketme bölgesindeki meydana gelen yeniden birleşmeler ideallikte sapma meydana getirir. (2.52) denkleminde bir düzeltme faktörü eklenmesiyle oluşan yeni akım-gerilim ilişkisi (2.55) denklemiyle verilir.

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.55)$$

$n$  = İdealite faktörü

İdealite faktörü gerilime ve sıcaklığa bağlı olup, ideal aygıtlar için 1'dir.

## 2.12. Kapasitans-Gerilim Karakteristikleri

Schottky kontakların metal tarafında bulunan eksi yüklerle yarıiletkenin tarafında bulunan iyonize olmuş alıcıların oluşturduğu tüketim bölgesi bir kondansatör gibi davranır. Yapıya ters beslem uygulandığında yapının engel bölgesi genişler ve bölgede yük değişimleri meydana gelir. Bu durum kapasitans değerlerine değişim meydana getirir. Değişime uğrayan Schottky kapasitesinden temel aygıt parametreleri elde edilir. Bir yarıiletkende yük yoğunluğu (2.56) denklemiyle verilir.

$$Q = qN_a W_D = \sqrt{2\epsilon_s q N_a (V_d + \bar{V})} \quad (2.56)$$

$Q$  = yarıiletkende oluşan yük yoğunluğu,  $q$  = Elektronik yük,

$\epsilon_s$  = Yarıiletkenin dielektrik sabiti,  $V$  = Uygulanan harici beslem

$N_a$  = Taşıyıcı yük yoğunluğu,  $W_D$  = Tükenme bölgesi genişliği,

$V_d$  = Difüzyon potansiyeli,

Aygıta harici bir beslem uygulandığında yüklerin değişimi sonucu küçük bir sinyal kapasitesi oluşur. Bu kapasite, tüketim bölgesi kapasitesi olup (2.57) denklemi ile verilir.

$$c = \frac{dQ}{dV} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_a}{2(V_d + V)}} \quad (2.57)$$

(2.57) denkleminde görüldüğü üzere eklem kapasitesi taşıyıcı yoğunluğuyla doğru, uygulanan gerilimle ters orantılıdır. Taşıyıcı yoğunluğunun oranı arttığında eklem kapasitesi de artar. (2.57) denkleminin tersinin karesi alınırsa (2.58) denklemi elde edilir.

$$\frac{1}{c^2} = \frac{2(V_d + V)}{q\epsilon_s N_a} \quad (2.58)$$

$N_a$  = Taşıyıcı yoğunluğu

Bu denklem bize  $C^{-2}-V$  eğrisinin lineer bir doğru olacağını söyler. Bu lineer doğrunun eğimi taşıyıcı yoğunluğunu verir.  $C^{-2}-V$  eğrisinin voltaj eksenini kestiği nokta yardımıyla yapının difüzyon potansiyeli elde edilir. Voltaj ekseninin kesme noktasıyla difüzyon potansiyeli arasındaki ilişki (2.59) denklemiyle verilmiştir. bulunur.

$$V_o = V_d - \frac{kT}{q} \quad (2.59)$$

$V_o$  = Kesme noktası,  $T$  = Kelvin cinsinden sıcaklık,  $q$  = Elektronik yük,  
 $k$  = Boltzman sabiti

### 2.13. Arayüzey Durumları

Arayüzey durumlarının ortaya çıkmasının önemli sebeplerinden birisi yüzeydeki periyodik örgü yapısının kesintiye uğramasıdır [25]. Bu eklem oluşmadan önceki bir yüzey durumudur. Kesintiye uğrayan bir örgü kolayca bağ yapabilir. Bu da metal/yarıiletken Schottky yapısının arayüzeyinde belirli bir kalınlığa sahip arayüzey tabakasının oluşması demektir. Bu tabaka, aygıtın temel parametrelerini olumsuz olarak etkiler. Kontak oluştuktan sonra meydana gelen yüzey durumları vardır ki bunlar yarıiletkenin yüzeyinde dağılmış safsızlıklardır [12]. Yarıiletkenin yüzeyinde ve gövde içerisinde var olan kusurlar yüzünden meydana gelen yüzey durumları mevcuttur. Arayüzey durumlarının ortaya çıkmasının önemli sebeplerinden biri de kimyasal reaksiyonların meydana getirdiği yüzey durumlarıdır. Bir yarıiletken üzerine buharlaştırmayla metal kaplandığında kimyasal bir reaksiyon oluşur. Bu reaksiyon sonucunda yeni bir bileşik yani arayüzey durumları meydana gelmiş olur [26].

### 2.13.1. Arayüzey durumlarını belirleme yöntemleri

Bir yarıiletken aygıtın arayüzey durum yoğunluklarını belirleyebilmek için değişik metodlar mevcuttur. Bu metodlardan en çok kullanılanları kapasite ve iletkenlik yöntemleridir. Yapıların akım-gerilim ölçümlerinden de hareketle arayüzey durumları belirlenebilir.

#### 2.13.1.1. Akım yöntemi

Bu yöntemde yapıların elde edilmiş akım-gerilim verilerinden faydalanılır. Daha önce de bahsedildiği gibibir yapının idealite faktörü arayüzey durumlarına ve arayüzey tabakanın kalınlığına bağlıdır [19, 27]. İdealite faktörü ile arayüzey durumları arasındaki ilişki (2.60) ve (2.61) denklemleriyle verilmiştir.

$$N_{ss} = \frac{\epsilon_s}{qW_D} \left( \frac{1}{n-1} \right) - \frac{\epsilon_i}{\delta q} \quad (2.60)$$

$\epsilon_s$  = Yarıiletkenin dielektrik sabiti,  $W_D$  = Tükenme bölgesi genişliği ,

$q$  = Elektronik yük,  $n$  = İdealite faktörü,

$\epsilon_i$  = Arayüzey tabakanın dielektrik sabiti,  $\delta$  = Arayüzey tabaka kalınlığı

$$N_{ss} = \frac{\delta \epsilon_s}{q \epsilon_i} \left( \frac{1}{n-1} \right) - \frac{W_D}{q} \quad (2.61)$$

Arayüzey tabakası ince olduğunda (2.60) denklemi, kalın olduğunda ise (2.61) denklemi kullanılır [19].

### 2.13.1.2. Kapasitans yöntemi

Kapasitans ölçüm verileri kullanılarak arayüzey durumlarını belirleme tekniklerinden biri iki frekans yaklaşımının kullanıldığı yüksek frekans-düşük frekans kapasitans yöntemi olup, (2.62) denklemi ile verilmiştir [28].

$$N_{ss} = \frac{C_i}{qA} \left( \frac{C_{LF}}{C_i - C_{HF}} - \frac{C_{HF}}{C_i - C_{LF}} \right) \quad (2.62)$$

$C_{LF}$  = Düşük frekansta alınmış kapasite ölçümleri,  $A$  = Diyot kontakt alanı,

$C_{HF}$  = Yüksek frekansta alınmış kapasite ölçümleri,

$C_i$  = Arayüzey tabakası kapasitesi

Arayüzey tabakasının kapasitesi, yüksek frekanslı gerilim altında ve kuvvetli biriktirme bölgesinde sabit olup, yapının maksimum kapasitesine (geometrik kapasite) eşittir ve (2.63) denklemi ile verilir.

$$C_i = \frac{\epsilon_0 \epsilon_i}{d_i} \quad (2.63)$$

$\epsilon_0$  = Boşluğun dielektrik sabiti,  $d_i$  = arayüzey tabakası kalınlığı,

Kapasitans ölçüm verileri kullanılarak arayüzey durumlarını belirleme tekniklerinden biri de tek frekans yaklaşımının kullanıldığı Hill-Coleman metodudur [29]. Bu

metodun kullandığı yüzey durumları ile kapasite ve iletkenliğin ilişkisini veren denklem (2.64)'de görülmektedir.

$$D_{it} = \left( \frac{2}{qA} \right) \left[ \frac{\frac{G_{m,maks}}{w}}{\left( \frac{G_{m,maks}}{wC_i} \right)^2 + \left( 1 - \frac{C_m}{C_i} \right)^2} \right] \quad (2.64)$$

$A$  = diyot kontakt alanı,  $q$  = elektronik yük,  $D_{it}$  = Arayüzey durumları,

$C_{ox}$  = Arayüzey tabakanın kapasitesi,  $w$  = Açısal frekans,

$G_{m,maks}$  = Biriktirme bölgesinde ölçülen maksimum iletkenlik,

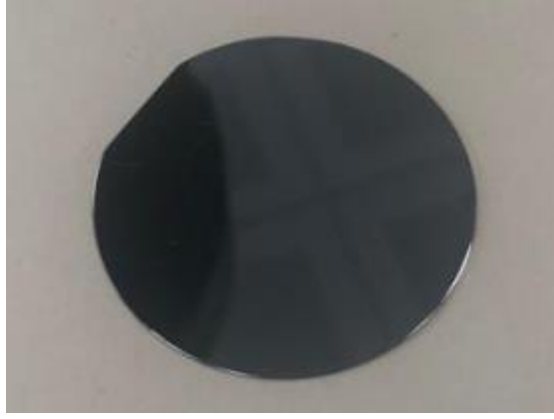
$C_m$  = Maksimum iletkenlik değerine karşılık gelen kapasite,

## BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

### 3.1. Alttabaka Temizliği ve Tabakaların Hazırlanması

Bu tez çalışmasında 5 cm çapında, 380µm kalınlığında, 2,5 Ω.cm özdirençli, (111) düzleminde kesilmiş *p*-tipi kristaller kullanılmıştır (Şekil 3.1.). Organik bileşenli Schottky yapılarının üretiminde kullanılmış olan silisyum kristali ve metal malzemelerin temizliği için 3 aşamalı kimyasal temizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak kristal üzerinde oluşabilecek yağ tabakalarının temizliği işlemine başlandı. Kristal wafer dört eşit parçaya kesilerek bunlardan bir tanesi trikloretilen dolu bir beher içine atıldı ve daha etkin bir temizlik için bir ultrasonik temizleme cihazı ile 15 dakika titreştirildi (Şekil 3.2.). Titreştirme işleminin ardından kristal, içerisinde yaklaşık 55 derece sıcaklığa kadar ısıtılmış olan aseton bulunan ve bir beher içerisine atılarak 10 dakika beklendi. Beklemenin ardından aseton içerisinden çıkarılan kristal, yine içerisinde bir miktar metanol bulunan başka bir beher içine atılarak 10 dakika kadar bekletildi. Beher içerisinden çıkarılan kristaller bir deiyonize su üreten sistemden (Şekil 3.3.) alınmış 18,3 MΩ.cm özdirençli deiyonize su ile yıkanma sonrasında kuru azot gazı ile kurutuldu.

İkinci aşama olarak kristal üzerindeki muhtemel organik tabakaların yok edilebilmesi için amonyum hidroksit (NH<sub>4</sub>OH), hidrojen peroksit (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) ve sudan oluşan RCA temizlik yöntemi uygulandı. Bunun için 27%'lik NH<sub>4</sub>OH'dan 80 ml, 30%'luk H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>'dan 80 ml ve deiyonize sudan da 400ml kullanıldı. Önce 400ml deiyonize su içerisine 80 ml NH<sub>4</sub>OH konularak bu karışım yaklaşık 70 derece sıcaklığa kadar ısıtıldıktan sonra üzerine 80 ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> eklendi. Oluşan bu yeni karışım reaksiyona başlayıp etkin bir hale gelince silisyum kristali karışım içerisine atılarak 15 dakika bekletildi. Sonrasında karışım içinden çıkarılan kristaller bolca deiyonize su ile durulandı.



Şekil 3.1. (111) düzleminde kesilmiş *p*-tipi silisyum kristali



Şekil 3.2. Ultrasonik temizleme cihazı

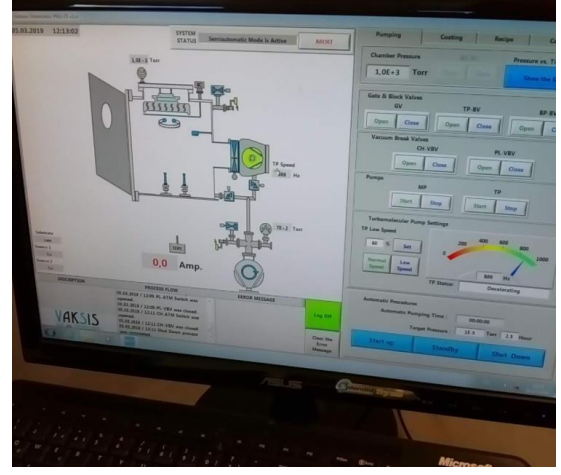


Şekil 3.3. Deiyonize su sistemi

Üçüncü aşama olarak silisyum kristali üzerinde oluşabilecek oksit tabakasını yok etmek için hidroflorik asit (HF) çözeltisinden faydalanıldı. Bunun için 240 ml deiyonize su içerisinde 10ml %38'lik HF eklendi. Hazırlanan karışım içine silisyum kristalleri atıldı ve 2 dakika beklendi. Beherden alınan kristaller hemen deiyonize su ile bolca çalkalanarak azot gazı yardımıyla kurutuldu.

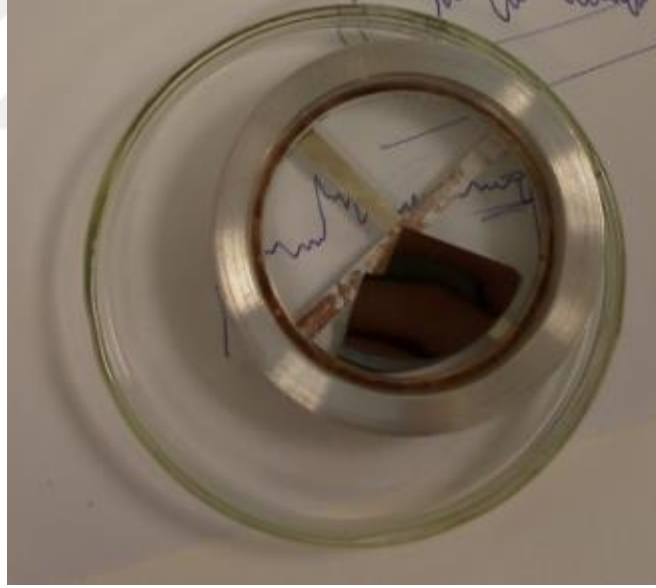
### **3.2. Organik Bileşenli Schottky Yapılarının Hazırlanması**

Organik bileşenli Schottky yapılarının hazırlanmasında ilk aşama omik kontakın oluşturulması olmuş ve bunun için de uygun maske belirlenmiştir. Metal malzemelerin silisyum kristali üzerine kaplama işlemleri için bilgisayar kontrollü bir termal buharlaştırma sistemi kullanılmıştır (Şekil 3.4.).



Şekil 3.4. Termal buharlaştırma sistemi

Omik kontak işlemi için, seçilmiş bir maske ile kaplanacak yüzeyi alt tarafa gelecek şekilde silisyum kristali bir numune tutucu yardımıyla termal buharlaştırma sisteminin içine yerleştirildi (Şekil 3.5.).

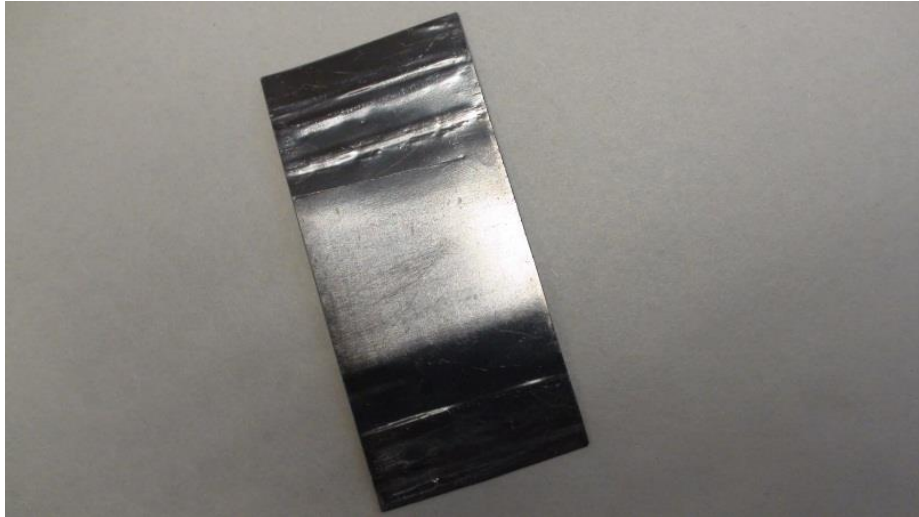


Şekil 3.5. Numune tutucu

Diğer taraftan organik bileşenli Schottky yapılarının hazırlanmasında kullanılacak metallerin buharlaştırılabilmesi için termal buharlaştırma sisteminin elektrotları arasına uygun bir tungsten flaman yerleştirildi. Flamanın üzerlerine, kimyasal temizliği yapılmış %99.999'luk alüminyum metalleri yerleştirildikten sonra vakum odası atmosfer ortamına kapatılarak sistem vakum altına alınmaya başlanmıştır. Önce

dönerek işleyen mekanik bir pompa yardımıyla ön vakum ( $\sim 10^{-3}$  Torr) sağlanmış, daha sonra devreye turbo moleküler pompa alınarak daha düşük basınçlara doğru ulaşılmıştır. Uygun bir basınç ( $3,3 \times 10^{-6}$  Torr) seviyesine ulaşıldıktan sonra flama akım vermek suretiyle  $0,5 \text{ Å/sn}$ 'lik bir biriktirme hızı ile termal buharlaştırma işlemi başlatıldı. Bu işlem, sisteme daha önceden girilmiş kalınlık bilgisi değerine ( $1000 \text{ Å}$ ) ulaşılana kadar devam etti ve bir kesici kapak yardımıyla otomatik olarak buharlaştırma işlemine son verildi.

Daha sonra vakum odasına hava vermek suretiyle sistem atmosfer ortamına açılarak numune çıkarıldı. Kaplanan metalin çöktürülerek omik kontak oluşturulabilmesi için elektrotların arasına tungsten'den yapılmış bir levha (Şekil 3.6.) takıldı ve üzerine de alüminyum ile kaplı taraf üste gelecek şekilde silisyum kristali yerleştirildi. Cam pencere kapak kapatılarak vakum odası tekrar vakum altına alındı. Uygun bir vakum seviyesine erişildiğinde elektrolara akım verilerek silisyum kristali ısıtıldı. Alüminyum kaplı yüzey kristal içerisine çöktürülerek omik kontak oluşturuldu. Metal levhanın ve silisyum kristalinin oksitlenmemesi için bir süre sistemin soğuması beklenildi ve daha sonra sistem atmosfer ortamına açıldı. İyi bir elektriksel iletkenlik elde etmek için oluşturulan omik kontak üzerine tekrar  $1000 \text{ Å}$  kalınlığında alüminyum kaplandı.



Şekil 3.6. Tungsten metal levha

### 3.2.1. Organik Bileşenin Hazırlanması

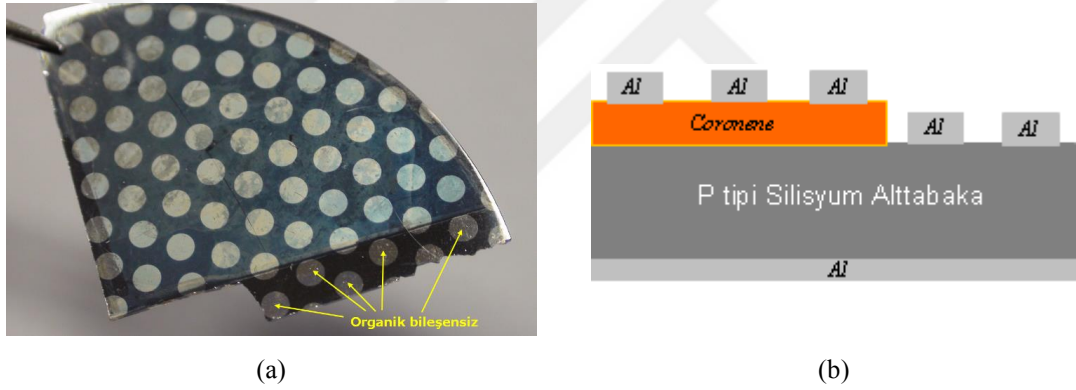
Organik bileşen olarak coronene malzemesi kullanılmıştır. Coronene ince filmleri oluşturmak için kolay ve ucuz bir yöntem olan döndürme ile kaplama (spin coater) yapan bir cihaz kullanılmıştır (Şekil 3.7.). Bunun için önce 1 ml tetrahidrofur (THF) içerisinde 0,2 mg toz coronene olacak şekilde bir çözelti hazırlanmıştır. Daha sonra silisyum kristali doğrultucu kantağın yapılacağı yüzeyi üstte olacak şekilde kaplama cihazına yerleştirildi. Cihaz, önce 30 saniye süreyle 500 dev/dk, sonrasında ise yine 30 saniye süreyle 1200 dev/dk olmak üzere iki kademede çalıştırıldı. Hazırlanan coronene çözeltisi bir mikro pipet yardımı ile 25µl'lik miktarlarla dönen kristal üzerine dört kez damlatıldı. Organik bileşenin oluşturma işlemi sona erdikten sonra kristal, çözücü malzemenin tümüyle yüzey üzerinden uzaklaştırılması için oda sıcaklığında ve vakum altında bir müddet bekletildi.



Şekil 3.7. Döndürme ile kaplama cihazı

### 3.2.2. Doğrultucu kontakın oluşturulması

Doğrultucu kontak oluşturmak için üzerinde 1,65 mm çaplı delikler olan maskelerden yararlanıldı. Bu metal maske, organik arayüzey kaplı tarafı alta gelecek şekilde üzerine konulmuş bir kristal ile birlikte termal buharlaştırma sistemine yerleştirildi. Sistem vakum ortamına alındı ve uygun vakum değerine erişildikten sonra organik arayüzey üzerinde 1000Å kalınlığında alüminyum kontaklar oluşturuldu. Şekil 3.8.'de bu tez çalışmasında elde edilen organik arayüzeyli ve arayüzeysiz Schottky yapılarının şematik diyagramı görülmektedir. Üretilen tüm bu Schottky kontakların ölçümleri alınmış ve analizleri yapılmıştır. Bu Schottky kontaklar arasında en iyi özellik gösteren yapılar seçilmiş ve diğer karakterizasyon işlemleri seçilen bu yapılar üzerinde yapılmıştır.



Şekil 3.8. Schottky yapıları: a) Silisyum wafer üzerinde ve b) şematik diagram

### 3.3. Yapıların Elektriksel Ölçümlerinde Kullanılan Cihaz ve Düzenekler

Hazırlanan organik arayüzeyli ve arayüzeysiz Schottky yapılarının elektriksel ölçümleri ve karakterizasyonları için bilgisayar kontrollü cihazlar kullanılmıştır. Akım-gerilim ( $I-V$ ) ölçümleri için Keithley 2400 SourceMeter cihazı (Şekil 3.9a), kapasite-gerilim ( $C-V$ ) ve iletkenlik-gerilim ( $G-V$ ) ölçümleri Keysight E4990A marka Impedance Analyzer cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.9b).



(a)



(b)

Şekil 3.9. Elektriksel ölçümler için kullanılan cihazlar: a) Keithley 2400 SourceMeter ve b) Keysight E4990A Impedance Analyzer

## BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

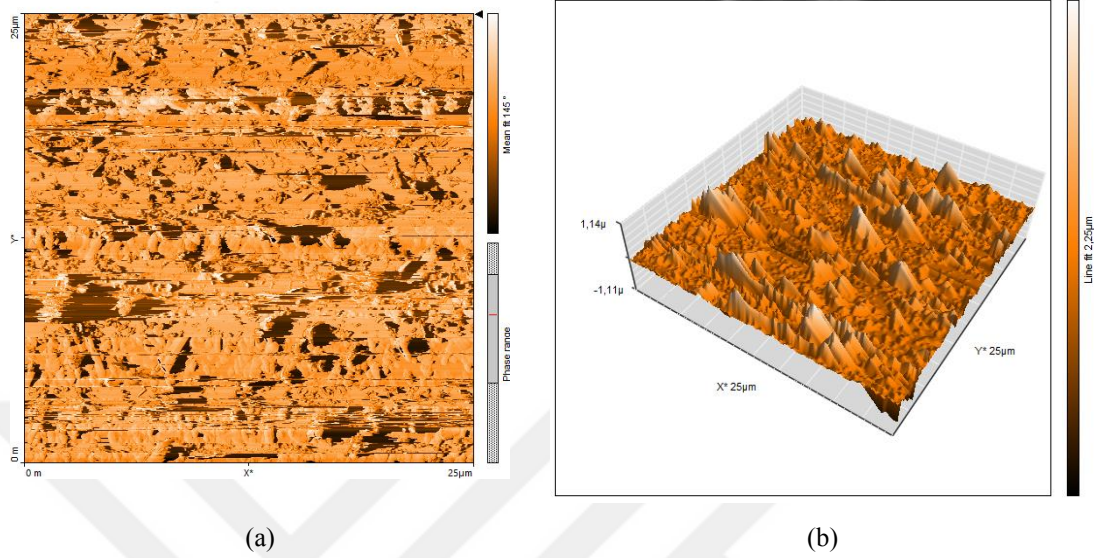
### 4.1. Giriş

Silisyum alttabaka üzerine büyütülmüş coronene arayüzey tabakanın yüzey morfolojisi görüntüleri Nanosurf FlexAFM marka atomik kuvvet mikroskobu (AKM) ile iki ve üç boyutlu olarak elde edilmiştir. Hazırlanan organik arayüzeyli ve arayüzeysiz Schottky yapılarının karakterizasyonları detaylı bir şekilde akım-gerilim ( $I-V$ ), kapasitans-gerilim ( $C-V$ ) ve iletkenlik-gerilim ( $G-V$ ) eğrileri kullanılarak elde edilmiştir. Elektriksel ölçümlerin tümü oda sıcaklığında ve karanlık ortamda yapılmıştır.  $I-V$  ölçümleri 20 mV'luk adımlarla -2 ile +2 volt doğru gerilim aralığında alınmıştır.  $C-V$  ve  $G-V$  ölçümleri 30 mV'luk adımlarla -1 ile +2 volt doğru gerilim aralığında sırasıyla 1MHz ve 1kHz frekanslarında alınmış olup, ölçüm sırasında yapılara efektif değeri 50mV olan bir küçük sinüzoidal gerilim uygulanmıştır. Elde edilen  $I-V$ ,  $C-V$  ve  $G-V$  eğrileri yardımıyla, yapıların temel aygıt parametreleri olan engel yüksekliği ( $\Phi_B$ ), doyma akımı ( $I_0$ ), ideallik faktörü ( $n$ ), yüzey durumları ( $N_{ss}$ ) ve seri direnç ( $R_s$ )'in yanısıra, difüzyon potansiyeli ( $V_d$ ) değerlik bandıyla Fermi enerji seviyesi arasındaki enerji ( $E_f$ ), tüketim tabakası genişliği ( $W_D$ ), Schottky alçalması ( $\Delta\Phi_B$ ), maksimum elektrik alan ( $E_m$ ) gibi diğer parametreler de hesaplanmıştır. Diyotların seri direnç değerleri modifiye edilmiş Norde yöntemi ve Cheung yöntemi kullanılarak hesap edilmiş olup, her iki yöntemden elde edilen seri direnç değerleri karşılaştırılmıştır.

### 4.2. Arayüzey Tabakanın Yüzey Morfolojisi

Şekil 4.1a ve b'de silisyum alttabaka üzerine büyütülmüş coronene arayüzey tabakasının iki boyutlu ve üç boyutlu yüzey morfolojisi görülmektedir. Şekil 4.1a ve

b'ye bakıldığında 83,6 nm pürüzlülükle birkaç keskin tepe dışında genelde homojen bir film oluştuğu görülmektedir.



Şekil 4.1. Coronene arayüzey tabakanın yüzey morfolojisi: a) İki boyutlu, b) Üç boyutlu

### 4.3. Yapıların Akım-gerilim ( $I-V$ ) Karakteristikleri

Hazırlanan organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarına ait yarı logaritmik düz beslem  $I-V$  karakteristikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.2.'de verilmiştir. Şekil 4.2.'den görüldüğü üzere yapılar iyi bir doğrultma özelliği göstermiş olup, 0,11 – 0,271 volt aralığında bir lineer bölge mevcuttur. Arayüzey tabakası beklenildiği gibi yapıda oluşan akımı önemli ölçüde azaltmış olup, +2 voltta düz beslem akımının değeri 21 kat düşmüştür. Yapının iletim mekanizmasına termiyonik emisyon akımının etkin olduğunu kabul edildiğinde, ideal bir diyot için akım ile gerilim arasındaki ilişki (4.1) denklemi ile verilir [11].

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

$I$  = Diyot akımı,  $I_0$  = Ters doyma akımı,  $q$  = Elektronik yük

$V$  = Diyot gerilimi,  $k$  = Boltzmann sabiti,  $T$  = Kelvin cinsinden sıcaklık

Çoğunluk taşıyıcılarının oluşturduğu  $I_0$  akımı (4.2) denklemi ile verilir.

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

$A$  = Diyot alanı,  $A^*$  = Richardson sabiti,  $\Phi_B$  = Engel yüksekli

Genelde diyot gibi doğrultucu aygıtlarda ideallikten sapma olduğu için (4.1) denklemi, idealite faktörü ( $n$ ) olarak adlandırılan bir düzeltme faktörü eklenmesi ile (4.3) denklemindeki şeklini alır.

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

$n$  = İdealite faktörü

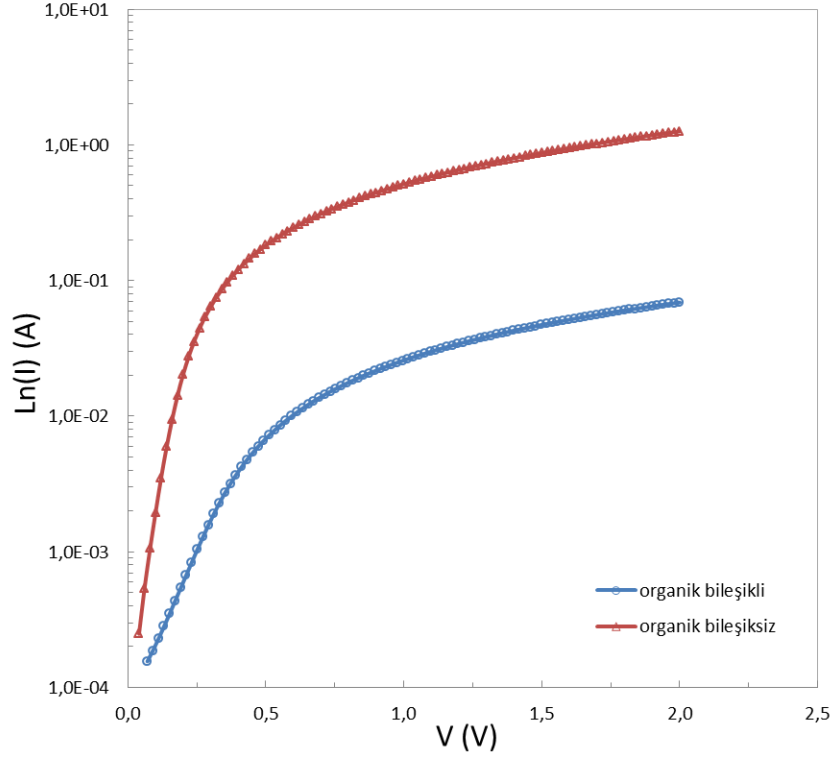
İdealite faktörü sıcaklık, harici beslem ve arayüzey durumları gibi bazı parametrelere bağlı olup 1'den büyük değerler alabilir. Organik arayüzeyli Schottky yapılarının ideallik faktörü Şekil 4.2.'de verilen yarı-logaritmik akım-gerilim eğrisinin eğimi yardımıyla (4.4) denklemi kullanılarak 3,61 olarak elde edilmiştir.

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

Çoğunluk taşıyıcılarının oluşturduğu  $I_0$  doyma akımı değeri organik arayüzeyli yapı için, Şekil 4.2.'de verilen yarı-logaritmik eğrinin akım eksenini kestiği nokta yardımıyla  $I_0 = 6,96 \times 10^{-5}$  A olarak elde edilmiştir. Aygıtın engel yüksekliği denklem 4.2'de verilen doyma akımı ifadesinden  $\Phi_B = 0,533$  eV olarak bulunmuştur. Tablo 4.1.'de üretilen Schottky yapılarının  $I-V$  eğrilerinden tayin edilen  $n$ ,  $\Phi_{B0}$ , ve  $I_0$  değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 4.1. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarına ait  $I-V$  eğrilerinden tayin edilen  $n$ ,  $\Phi_{B0}$ , ve  $I_0$  değerleri.

Yöntem	$n$	$I_0$ ( $\times 10^{-5}A$ )	$\Phi_B$ (eV)
Organik bileşiksiz	1,29	9,33	0,520
Organik bileşikli	3,61	6,96	0,533

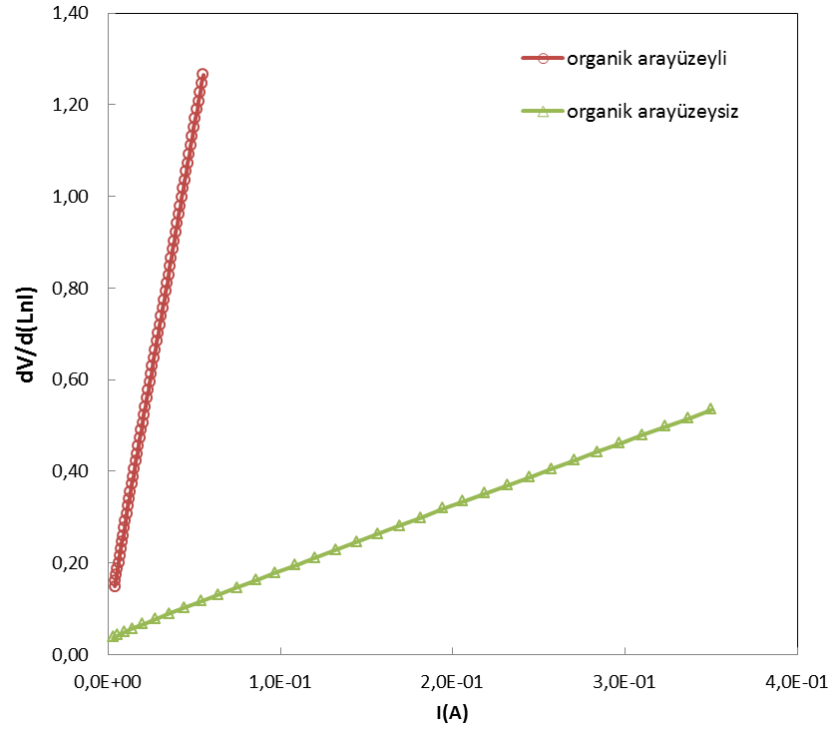


Şekil 4.2. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının yarı-logaritmik düz beslem  $I-V$  karakteristiği

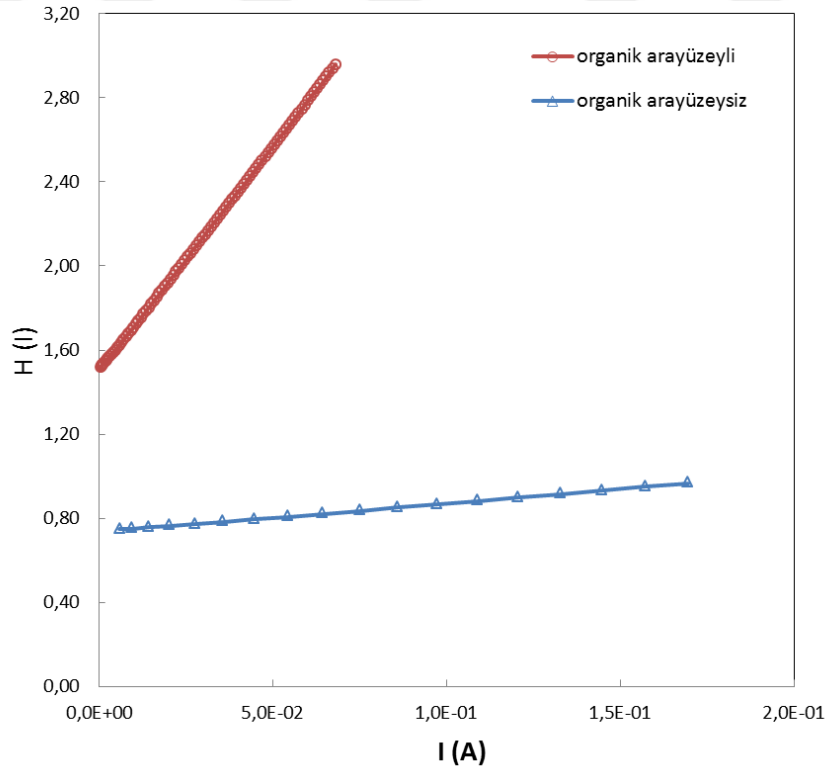
Yapıların düz beslem yarı-logaritmik  $I-V$  eğrileri incelendiğinde yapıya uygulanan harici beslem arttıkça yüksek voltaj bölgesinde her iki yapı için de bir bükülme ve dolayısıyla lineerlikte sapma görülmektedir. Aygıttaki bu davranış biçimi seri direncin sıfırdan farklı olduğunun bir göstergesidir. Seri direnç, yarıiletken içindeki düzensiz katkıların meydana getirdiği öz dirençli bölgelerden oluşabileceği gibi yarıiletken ile kontaktlar arasında olası parçacıklardan veya kirli film tabakalarından da meydana gelebilmektedir. Seri direnç yavaş taşıyıcı yoğunluğunun oluşmasına sebep olan istenmeyen bir durumdur. Yapının seri direnç değerleri Cheung yöntemi ve idealite faktörünün 1'den büyük olması nedeniyle modifiye Norde yöntemi kullanılarak tayin edilmiştir.

Yapının  $I-V$  eğrileri yardımıyla yüksek voltaj bölgesinde kullanılan Cheung yöntemine göre seri dirençleri, (2.49) ve (2.51) denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bunun için organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının  $dV/d(\ln I) - I$  eğrileri çizilmiş olup, Şekil 4.3.'de bu eğriler gösterilmiştir. Elde edilen bu lineer doğrunun eğiminden seri direnç değeri ve düşey eksenini kestiği noktadan da idealite faktörü hesaplanmıştır. (2.51) denklemi ile verilen  $H(I)$  fonksiyonunun kullanılması ile organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının  $H(I)-I$  grafikleri elde edilmiş ve Şekil 4.4.'de bu grafikler gösterilmiştir. Bu lineer eğriden elde edilen eğim yardımıyla seri direnç değeri,  $H(I)$  eksenini kestiği noktadan ise engel yüksekliği elde edilmiştir.

Organik arayüzeyli Schottky (Al/coronene/*p*-Si/Al) yapısının Şekil 4.3.'den elde edilen idealite faktörü ve seri direnç değerleri sırasıyla 2,66 ve 22,14  $\Omega$ 'dur. Aynı yapı için Şekil 4.4.'den elde edilen engel yüksekliği ve seri direnç değerleri ise 0,547 eV ve 21,44  $\Omega$ 'dur. Tablo 4.2.'de organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının Cheung fonksiyonlarından elde edilen parametre değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tablo 4.2.'den görüldüğü üzere arayüzey tabakası yapının seri direnç değerlerinde artış meydana getirmiştir.

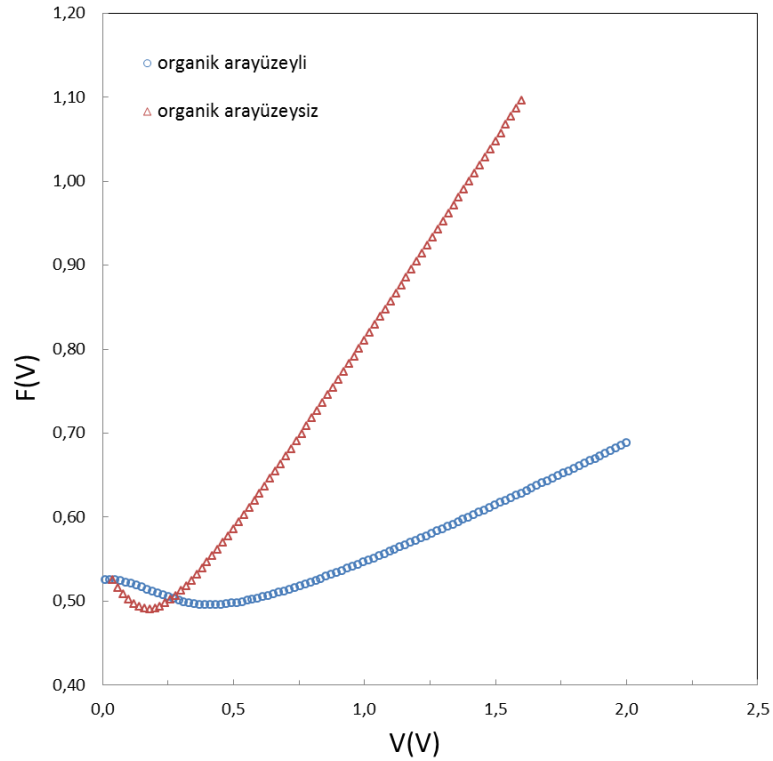


Şekil 4.3. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının  $dV/d(\ln I) - I$  eğrileri



Şekil 4.4. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının  $H(I)-I$  eğrileri

Üretilen Al/coronene/*p*-Si/Al yapısının seri direnci bir diğer farklı yöntem olan Norde [20] metodu yardımıyla da tayin edilmiştir. Bu yöntem idealite faktörü 1 olan aygıtlar için orijinal bir  $F(V)$  fonksiyonu kullanır. Bu tez çalışmasında üretilen yapıların idealite faktörleri 1'den çok büyük çıktığı için seri direnç tayininde Norde yönteminin Bohlin [24] tarafından düzenlenmiş farklı bir versiyonu kullanılmıştır. Bunun için aygıtların  $F(V)$ - $V$  eğrileri, denklem (2.45) yardımıyla ve denklemde belirtilen keyfi sabit değeri de idealite faktöründen büyük olacak şekilde seçilerek elde edildi. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının elde edilen  $F(V)$ - $V$  eğrileri Şekil 4.5.'de verilmiştir. Şekil 4.5.'de görüldüğü üzere  $F(V)$  fonksiyonu  $F(V_0) = 0,511$  ve  $V_0 = 0,271$  V'da bir minimumdan geçmektedir. Bu minimum noktası ve (2.46) ile (2.47) denklemleri kullanılarak  $\phi_B$  ve  $R_s$  değerleri sırasıyla 0,522 eV ve 28,04  $\Omega$  olarak elde edilmiştir. Norde yönteminden tayin edilen bu değerlerin, Cheung yöntemiyle uyum içerisinde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.5. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının  $F(V)$  -  $V$  eğrileri

Tablo 4.2.'de organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarına ait modifiye Norde yöntemi kullanılarak elde edilmiş engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 4.2 Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının Cheung ve modifiye Norde yöntemi kullanılarak elde edilmiş engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç değerleri

Yöntem	$\Phi_B$ (eV)	n	$R_s(\Omega)$	$\frac{R_s(\Omega)}{dv/d\ln(I)}$	$\frac{R_s(\Omega)}{H(I)}$
Cheung (arayüzeyli)	0,523	1,43	-	1,44	1,37
Cheung (arayüzeyli)	0,547	2,66	-	22,14	21,44
Modifiye Norde (arayüzeyli)	0,518	-	1,29	-	-
Modifiye Norde (arayüzeyli)	0,522	-	28,04	-	-

Metal ile yarıiletken arasında bir arayüzey tabakasının var olması yapının elektriksel iletkenliğine önemli ölçüde etki eder. Bu arayüzey tabakası arayüzey durumlarını ( $N_{ss}$ ) meydana getirir ki bunlar yarıiletkenin yasak enerji bant aralığında olup belirli bir yoğunluğa sahiptir. Arayüzey yoğunluğunu akım-gerilim eğrilerini kullanarak tayin etmek mümkündür. Üretilen organik arayüzeyli Schottky yapılarının arayüzey durum yoğunlukları  $I-V$  eğrileri yardımıyla (2.61) denkleminde elde edilmiştir. Bir arayüzey tabakanın ve dolayısıyla arayüzey tuzaklarının olduğu bir durumda yapıya uygulanan harici besleme bağlı olarak engel yüksekliğinin değişimi (4.5) denklemi ile elde edilir.

$$\frac{d\Phi_e}{dV} = \left(1 - \frac{1}{n(V)}\right) = \Gamma \quad (4.5)$$

$\Phi_e$  = Etkin engel yüksekliği,  $\Gamma$  = Engel yüksekliğinin gerilim katsayısı

Yapıya uygulanan harici besleme bağlı etkin engel yüksekliği 4.6 denklemi ile verilir.

$$\Phi_e = \Phi_{bo} + \Gamma V \quad (4.6)$$

$\Phi_{bo}$  = Sıfır beslem engel yüksekliği,  $V$  = Diyot gerilimi

$E_{ss}$  arayüzey durumları enerjisi,

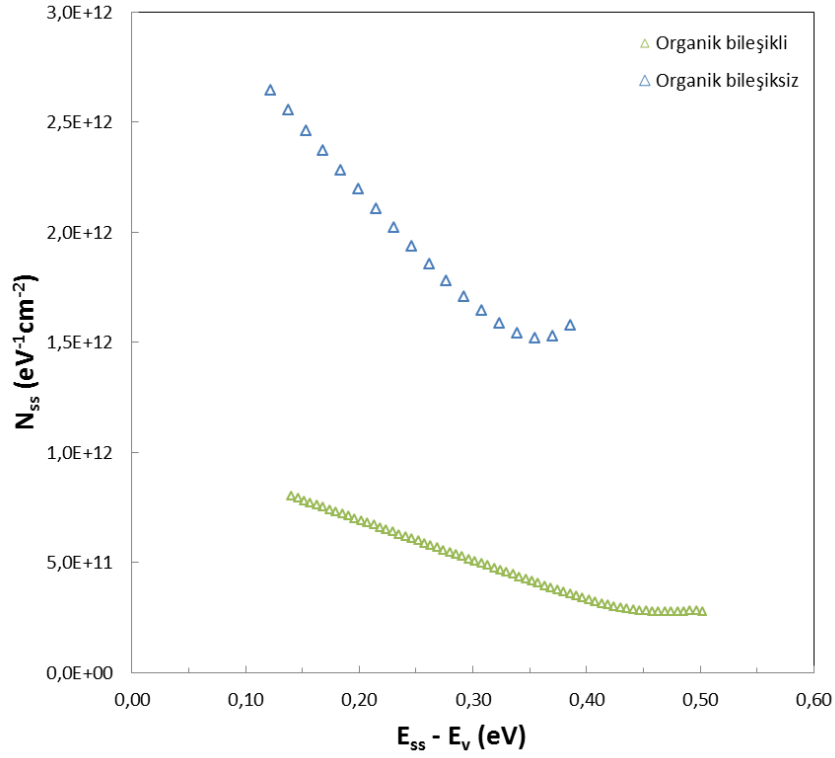
$p$  tipi bir yarıiletkenle değerlik bandının üst seviyesinden ölçülmek üzere 4.7 denklemi ile verilir.

$$E_{ss} - E_v = q(\Phi_e - V) \quad (4.7)$$

$E_{ss}$  = Arayüzey durumları enerjisi,  $E_v$  = Değerlik bandı enerjisi

Şekil 4.6.'da organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının düz beslemdeki akım-gerilim eğrileri kullanılarak elde edilmiş arayüzey durum yoğunluğunun enerjiye bağlı dağılım profilleri verilmiştir. Şekil 4.6.'dan görüldüğü üzere arayüzey durum yoğunluğu bant aralığının orta kısmından başlayarak bir minimumdan geçmekte ve değerlik bandı seviyesine doğru üstel bir şekilde artmaktadır. Al/coronene/ $p$ -Si/Al Schottky yapısı için arayüzey durum yoğunluğunun ortalama değeri  $5,34 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  olarak elde edilmiştir. Şekil 4.6.'ya bakıldığında arayüzey tabakalı yapılardaki tuzak yoğunlukları arayüzey tabakasız yapılardan yaklaşık beş kat daha az olduğu görülmektedir. Bu durum arayüzey tabakasının silisyum yüzeyini başarılı bir şekilde pasifize ettiğini göstermektedir. Diğer taraftan bu arayüzey tabakasının meydana getirdiği pasivasyon işleminin değerlik bandına yakın yüzey tuzakları için biraz daha etkili olduğu söylenebilir. Tablo 4.4'de yapıların elde edilen arayüzey durum yoğunluğu değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Arayüzey durum yoğunluğunu kapasite-gerilim eğrilerini kullanarak da bazı yöntemlerle tayin etmek mümkündür. İleriki bölümde bu yöntemler üzerinde durulacaktır.



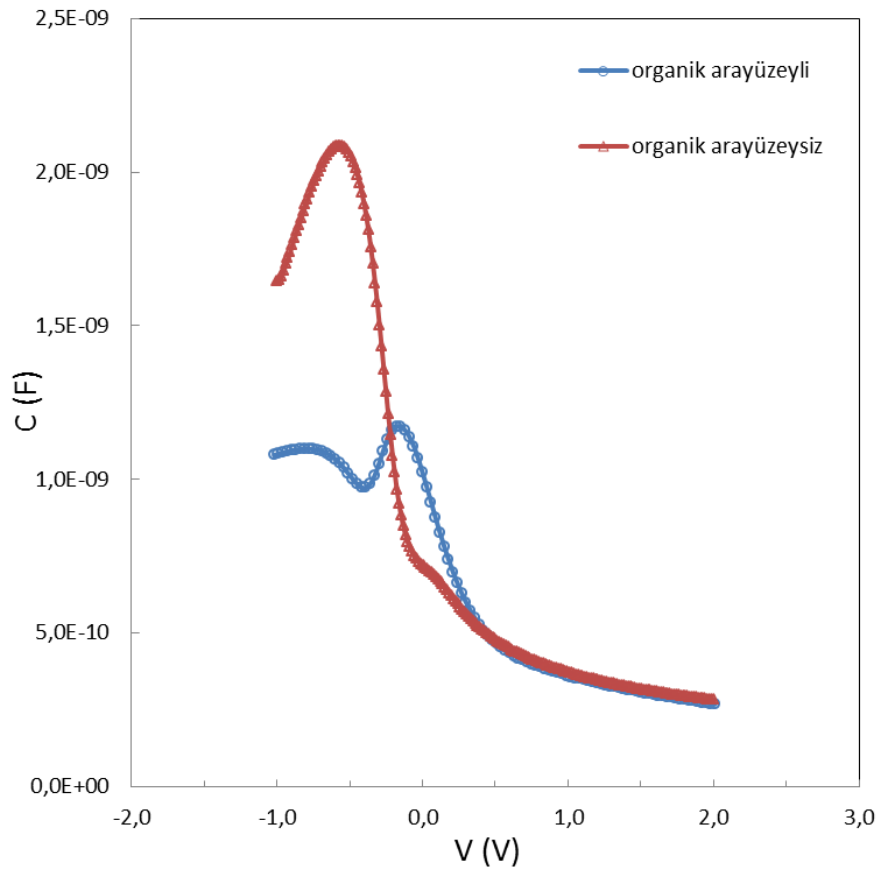
Şekil 4.6. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının arayüzey durum yoğunluğunun enerji dağılım profilleri

#### 4.4. Yapıların Kapasitans-Gerilim ( $C-V$ ) ve İletkenlik-Gerilim ( $G-V$ ) Karakteristikleri

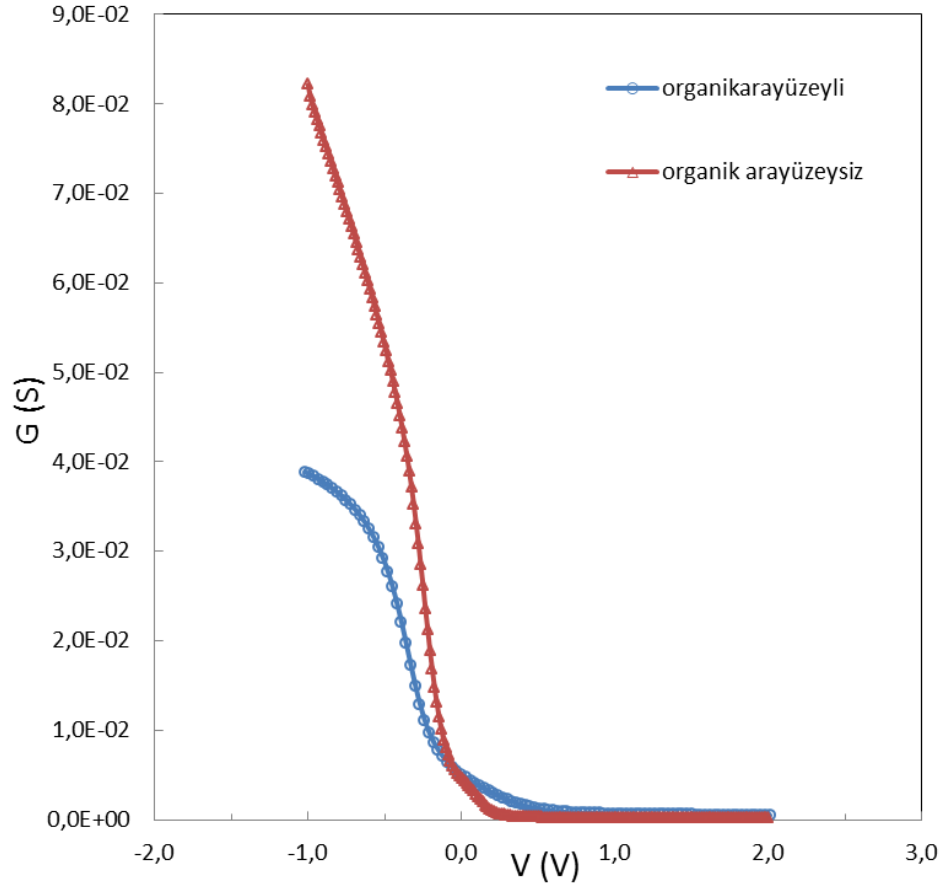
Al/coronene/ $p$ -Si/Al Schottky yapısının kapasitans-gerilim ( $C-V$ ) ve iletkenlik-gerilim ( $G-V$ ) ölçümleri karanlık ortam ve oda sıcaklığında, -1 ile +2 volt aralığında dc beslem kullanılarak yapılmıştır. Uzun zaman sabitine sahip arayüzey tuzaklarının uygulanan sinyali takip edip kapasiteye ek bir katkı yapmaması için ölçümlerde 1MHz'lik sabit frekanslı bir ac sinyali kullanılmış olup, arayüzey durumlarının hesaplanan aygıt parametrelerine olumsuz etkileri azaltılmıştır [25]. Yapıların voltaja bağlı kapasitans eğrileri yardımıyla difüzyon potansiyeli ( $V_d$ ), engel yüksekliği ( $\Phi_B$ ), Schottky alçalması ( $\Delta\Phi_B$ ), taşıyıcı yoğunluğu ( $N_A$ ), elektrik alanı ( $E_m$ ), tüketim tabakası genişliği ( $W_D$ ), ve maksimum elektrik alan ( $E_m$ ) gibi temel aygıt parametreleri hesaplanmıştır. Şekil 4.7. ve 4.8.'de organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının elde edilmiş  $C-V$  ve  $G-V$  eğrileri görülmektedir. Şekil 4.7. ve 4.8.'den görüldüğü üzere aygıtın kapasitans eğrisi sıfır beslem civarında

maksimumdan geçerken iletkenlik eğrisi artan ters besleme artmaktadır. Şekil 4.7.'den gözlemlenen bu davranış bize, bu bölgelerde arayüzey tuzaklarının yerleşmiş olduğu bilgisini vermektedir.

Şekil 4.7.'ye bakıldığında görüldüğü gibi organik bileşikli yapının kapasitans eğrisi diğer yapıya oranla daha düşük değerli bir dağılım göstermektedir. Organik bileşikli ve bileşiksiz yapılar için sıfır voltaj kapasitesi sırasıyla  $7,16 \times 10^{-10}$  ve  $1,02 \times 10^{-9}$  F bulunmuştur. Böylece arayüzey tabakasının pasifize ettiği yüzey durumları yapıların kapasitesine katkıda bulunamamıştır. Şekil 4.8.'e bakıldığında arayüzey tabakalı yapının iletkenliğinin diğer yapıdan yaklaşık iki kat daha azalmış olduğu görülmektedir. Bu durum silisyum yüzeyine büyütülen organik tabakanın yapının direncini arttırdığını göstermektedir.



Şekil 4.7. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının  $C-V$  eğrileri



Şekil 4.8. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının  $G$ - $V$  eğrileri

Arayüzeyli Schottky yapılarının elektriksel karakteristiklerine arayüzey tuzaklarının olumsuz etkisi yanında bir de onları ideallikten saptırabilecek seri direnç ( $R_s$ ) etkisi mevcuttur. Bu etkinin büyüklüğü, yapıların voltaja bağlı akım ölçümlerinden tayin edilebileceği gibi kapasite ölçümlerinden de belirlenebilir. Bu çalışmada yapıların voltaja bağlı seri direnç değerleri admittans tekniği [25] yardımıyla (4.8) denkleminde  $22,08 \Omega$  olarak hesaplanmıştır.

$$R_s = \frac{G_{m,acc}}{(G_{m,acc}^2 + \omega^2 C_{m,acc}^2)} \quad (4.8)$$

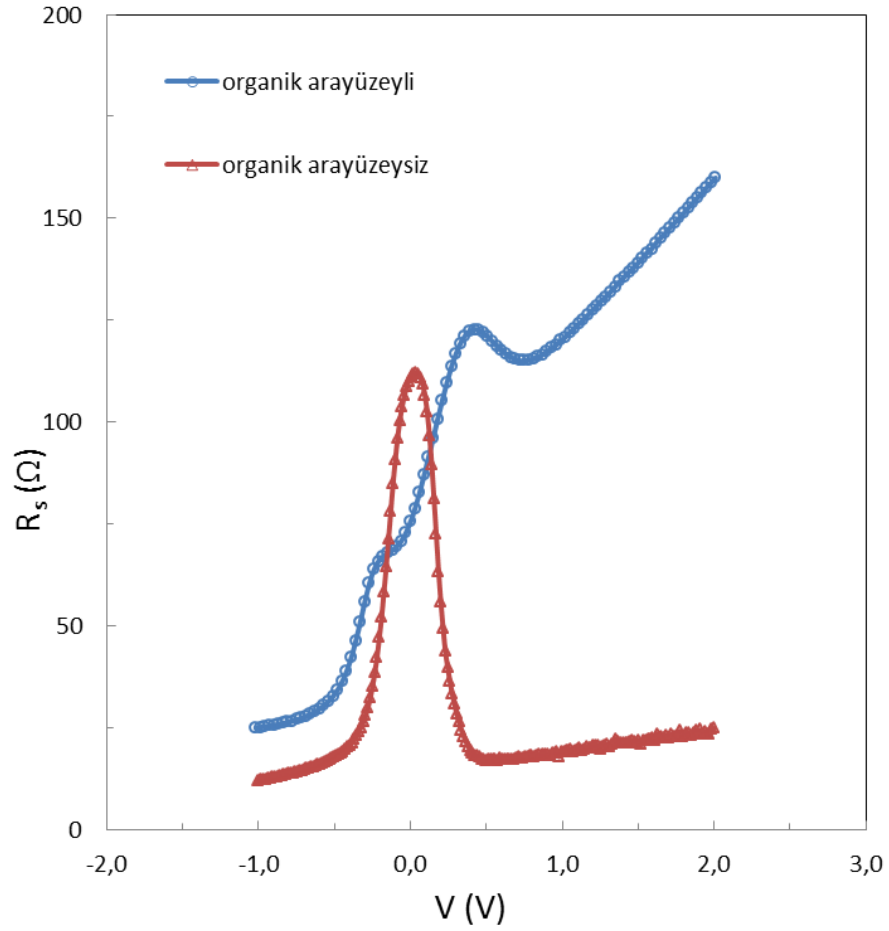
$R_s$  = Seri direnç

$\omega$  = Açısal frekans

$G_{m,acc}$  = Biriktirme bölgesinde elde edilmiş ölçümlerdeki iletkenlik değeri

$C_{m,acc}$  = Biriktirme bölgesinde elde edilmiş ölçümlerdeki kapasite değeri

Şekil 4.9.'da organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının uygulanan voltaja bağlı seri direnç eğrileri görülmektedir. Şekil 4.9.'dan görüldüğü üzere yapının  $R_s$  eğrisi arayüzey tuzaklarının var olduğu sıfır beslem civarında maksimumdan geçmiştir [30].



Şekil 4.9. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının uygulanan voltaja bağlı seri direnç eğrileri

Şekil 4.10.'da organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının  $C^2-V$  eğrileri görülmektedir. Şekil 4.10.'dan görüldüğü üzere her iki eğri de geniş bir harici beslem aralığında lineer davranış göstermiştir. Yapının  $V_{bi}$  difüzyon potansiyeli ile  $V_o$  kesme gerilimi arasındaki ilişki, arayüzey tuzaklarının olmadığı durumda 4.9 denklemi ile verilir.

$$V_0 = \frac{E_g - \Phi_m - X}{q - \Phi_F - V_i} = V_{bi} - \frac{kT}{q} \quad (4.9)$$

$\Phi_m$  = Metalin iş fonksiyonu,  $\Phi_F$  = Değerlik bandı ile Fermi enerjisi seviyesi arasındaki enerji,  $E_g$  = Yasak enerji bant aralığı,

$V_i$  = Arayüzey tabaka üzerinde düşen gerilim,  $\chi$  = elektron yatkınlığı

Arayüzey tuzakları varken (4.9) denklemi (4.10) şeklini alır [31].

$$V_0 = \left( V_{bi} - \frac{kT}{q} \right) (1 + \alpha) \quad (4.10)$$

$V_0$  = Kesme voltajı,  $V_{bi}$  = difüzyon potansiyeli,  $k$  = Boltzman sabiti,

$T$  = Kelvin cinsinden mutlak sıcaklık,  $q$  = elektronik yük,  $\alpha$  = sabit

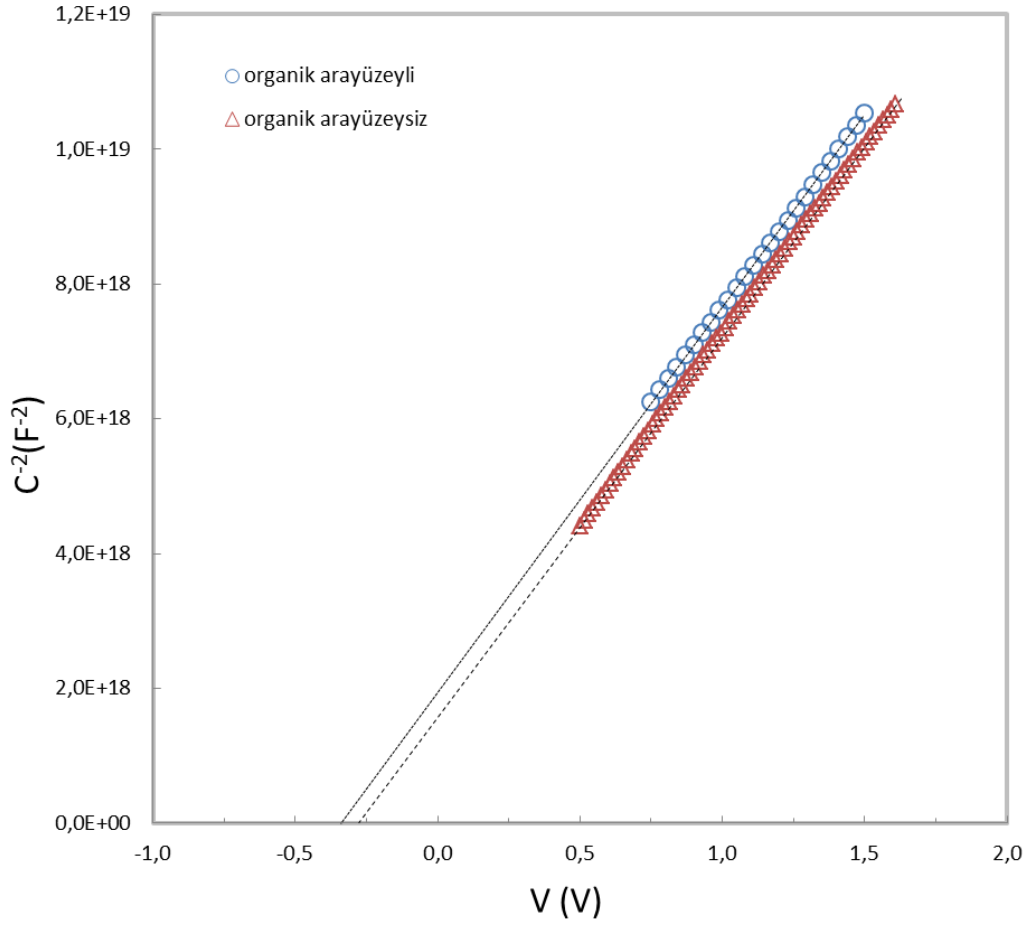
(4.10) denklemindeki  $\alpha$  terimi (4.11) denklemi ile verilir.

$$\alpha = q N_{ss} \delta / \epsilon_i \quad (4.11)$$

$\epsilon_i$  = Arayüzey tabakanın dielektrik sabiti,  $N_{ss}$  = Arayüzey durum yoğunluğu,

$\delta$  = Arayüzey tabakası kalınlığı,

Al/coronene/p-Si/Al Schottky yapısının  $V_{bi}$  difüzyon potansiyeli,  $C^2$ - $V$  eğrisinin voltaj eksenini kestiği noktadan elde edilen  $V_0$  kesme geriliminin yardımıyla hesaplanmıştır.



Şekil 4.10. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının  $C^{-2}$ - $V$  eğrileri

Arayüzey tuzaklarının etkisi altında  $C^{-2}$ - $V$  eğrisinin eğimi, (4.11) denklemindeki  $\alpha$  terimi ile birlikte (4.12) denklemi ile verilir.

$$\frac{dC^{-2}}{dV} = \frac{2}{q\epsilon_s A^2 N_a} (1+\alpha) \quad (4.12)$$

$\epsilon_s$  = Yarıiletkenin dielektrik sabiti,  $q$  = elektronik yük,

$N_a$  = taşıyıcı yoğunluğu,  $A$  = Diyot kontakt alanı

$$\frac{dC^{-1}}{dV} = \text{Eğim}$$

Organik arayüzeyli yapılar için çoğunluk taşıyıcısı yoğunluğu  $C^{-2}$ - $V$  eğrisinin eğiminden deneysel olarak  $4,65 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  olarak bulunmuştur. Bu tez çalışmasında kullanılan silisyum alttabaka için verilen  $2,5 \text{ } \Omega\text{-cm}$ 'lik öz direnç ve mobilite ( $\mu_p=450$

$\text{cm}^2/\text{V.s}$ ) [12] değerleri kullanılarak teorik taşıyıcı yoğunluğu, (4.13) denkleminde  $5,55 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  olarak hesaplanmış olup, bu değer deneysel olarak elde edilmiş taşıyıcı yoğunluğu ile uyumlu olduğu görülmüştür.

$$\rho = 1/q\mu_p N_a \quad (4.13)$$

$\mu_p$  = taşıyıcı mobilitesi,  $q$  = elektronik yük,  $N_a$  = taşıyıcı yoğunluğu

Elde edilen bu teorik değer  $C^{-2}-V$  eğrisinin eğiminden elde edilen deneysel değerle aynı mertebede olduğu görülmüştür. Oda sıcaklığında alınan ölçümler için değerlik bandındaki etkin durumların yoğunluğu (4.14) denklemi yardımıyla  $1,04 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  olarak hesaplanmıştır. Burada deşikler için etkin kütle ( $m^*$ )  $0,55m_0$  olarak alınmıştır [32].

$$N_v = 4,82 \times 10^{15} T^{3/2} \left(\frac{m^*}{m_0}\right)^{3/2} \quad (4.14)$$

$N_v$  = Değerlik bandındaki etkin durumların yoğunluğu,

$m^*$  = p tipi yarıiletkendeki deşiklerin etkin kütlesi,  $m_0$  = Serbest elektron kütlesi

$T$  = Kelvin cinsinden mutlak sıcaklık

Gerçek bir yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi ile katkılandırılmış bir yarıiletkenin Fermi seviyesi arasındaki enerji farkı (4.15) denklemi ile verilmektedir.

$$\Phi_F = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_v}{N_a}\right) \quad (4.15)$$

$\Phi_F$  = Gerçek bir yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi ile katkılandırılmış bir yarıiletkenin Fermi seviyesi arasındaki enerji farkı,

$N_v$  = Değerlik bandındaki etkin durumların yoğunluğu,  $N_a$  = Taşıyıcı yoğunluğu

Al/coronene/p-Si/Al Schottky yapısının tüketme tabakası genişliği (4.16) denklemi kullanılarak elde edilmiştir.

$$W_D = \sqrt{\frac{2 \varepsilon_s \varepsilon_0 V_{bi}}{q N_a}} \quad (4.16)$$

$\varepsilon_s$  = Yarıiletkenin dielektrik sabiti,  $\varepsilon_0$  = Boşluğun dielektrik sabiti,  
 $V_{bi}$  = difüzyon potansiyeli,  $N_a$  = taşıyıcı yoğunluğu

Yapıda meydana gelen  $E_m$  maksimum elektrik alanı ve  $\Delta\Phi_B$  görüntü yük Schottky engel alçalması sırasıyla (4.17) ve (4.18) denklemleri yardımıyla hesaplanmıştır.

$$E_m = \sqrt{\frac{2qN_a V_{bi}}{\varepsilon_s \varepsilon_0}} \quad (4.17)$$

$E_m$  = Elektrik alan,  $\varepsilon_s$  = Yarıiletkenin dielektrik sabiti,  
 $\varepsilon_0$  = Boşluğun dielektrik sabiti,  $V_{bi}$  = difüzyon potansiyeli,  $N_a$  = taşıyıcı yoğunluğu,  
 $q$  = elektronik yük,

$$\Delta\Phi_B = \sqrt{\frac{qE_m}{4\pi\varepsilon_s \varepsilon_0}} \quad (4.18)$$

$\Delta\Phi_B$  = Engel alçalması

Yapının  $\Phi_B$  engel yüksekliği (4.19) denklemi ile verilir.

$$\Phi_B = V_{bi} + \Phi_F - \Delta\Phi_B \quad (4.19)$$

$\Phi_B$  = Schottky engel yüksekliği,  $\Delta\Phi_B$  = Engel alçalması

$\Phi_F$  = Gerçek bir yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi ile katkılandırılmış bir yarıiletkenin Fermi seviyesi arasındaki enerji farkı,

Bir arayüzey tabakasının var olduğu durumda (4.19) denklemi (4.20) şeklinde yazılır [33].

$$\Phi_B = q (C_2 V_0 + \Phi_F) \quad (4.20)$$

$C_2$  = Taşıyıcı yoğunluğuna bağlı parametre,  $V_o$  = Kesme voltajı

Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının oda sıcaklığında ve karanlık ortamda alınmış  $C^{-2}$ - $V$  eğrisi yardımıyla tayin edilen  $N_A$ ,  $V_{bi}$ ,  $\Phi_B$ ,  $W_D$  ve  $E_m$ , parametreleri Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının  $C^{-2}$ - $V$  eğrisi yardımıyla tayin edilen  $N_A$ ,  $V_{bi}$ ,  $\Phi_B$ ,  $W_D$ ,  $E_m$  ve  $R_s$  parametreleri

Yöntem	$N_a$ ( $\times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ )	$V_{bi}$ (V)	$\Phi_B$ (eV)	$W_D$ (Å)	$E_m$ ( $\times 10^4 \text{ V/m}$ )	$R_s$ ( $\Omega$ )
Organik bileşiksiz	4,63	0,319	0,518	2865	2,04	8,35
Organik bileşikli	4,65	0,334	0,534	2942	2,09	22,08

Al/coronene/ $p$ -Si/Al Schottky yapısının arayüzey tabakasının kapasitesi voltaja bağlı kapasite ve iletkenlik eğrilerinden (4.21) denklemi kullanılarak [25]  $1,16 \times 10^{-9}$  F olarak bulunmuştur.

$$C_i = C_{m,acc} \left[ 1 + \left( \frac{G_{m,acc}}{WC_{m,acc}} \right)^2 \right] \quad (4.21)$$

$C_i$  = Arayüzey tabakasının kapasitesi,  $G_{m,acc}$  = Biriktirme bölgesinde ölçülen iletkenlik,

$C_{m,acc}$  = Biriktirme bölgesinde ölçülen kapasite

Arayüzey tabakanın kapasitesi kuvvetli akümülyasyonda sabit olup, sistemin maksimum kapasitansına (geometrik kapasitans) eşittir ve (4.22) denklemi ile verilir.

$$C_i = \frac{\epsilon_0 \epsilon_i A}{\delta} \quad (4.22)$$

$\delta$  = Arayüzey tabakası kalınlığı,  $A$  = Diyot kontakt alanı,

$\epsilon_0$  = Boşluğun elektrik geçirgenliği,  $\epsilon_i$  = Arayüzey tabakasının dielektrik sabiti

Yüksek frekanslı (1MHz)  $C-V$  ölçümlerinden güçlü biriktirme bölgesi için arayüzey tabakasının kalınlığı (4.22) denklemi kullanılarak 46,9 nm olarak bulunmuştur. Burada  $\epsilon_i = 2,89\epsilon_0$  [34] arayüzey tabakasının dielektrik sabitidir.

Önceki bölümde arayüzey durum yoğunluğunun kapasitans-gerilim ve iletkenlik-gerilim eğrilerinin yardımıyla da tayin etmenin mümkün olabileceğinden bahsedilmişti. Bunlardan birisi de hızlı bir yöntem olan ve tek frekans yaklaşımını kullanan Hill-Coleman metodudur [29]. Ölçüm sonucu elde edilmiş iletkenlik eğrisinin maksimum noktası ( $G_{m,max}$ ) ve buna karşılık gelen kapasitans ( $C_m$ ) değerinin kullanıldığı Hill-Coleman ifadesi (4.23) denklemi ile verilir.

$$N_{ss} = \left( \frac{2}{qA} \right) \left[ \frac{\frac{G_{m,max}}{w}}{\left( \frac{G_{m,max}}{wC_i} \right)^2 + \left( 1 - \frac{C_m}{C_i} \right)^2} \right] \quad (4.23)$$

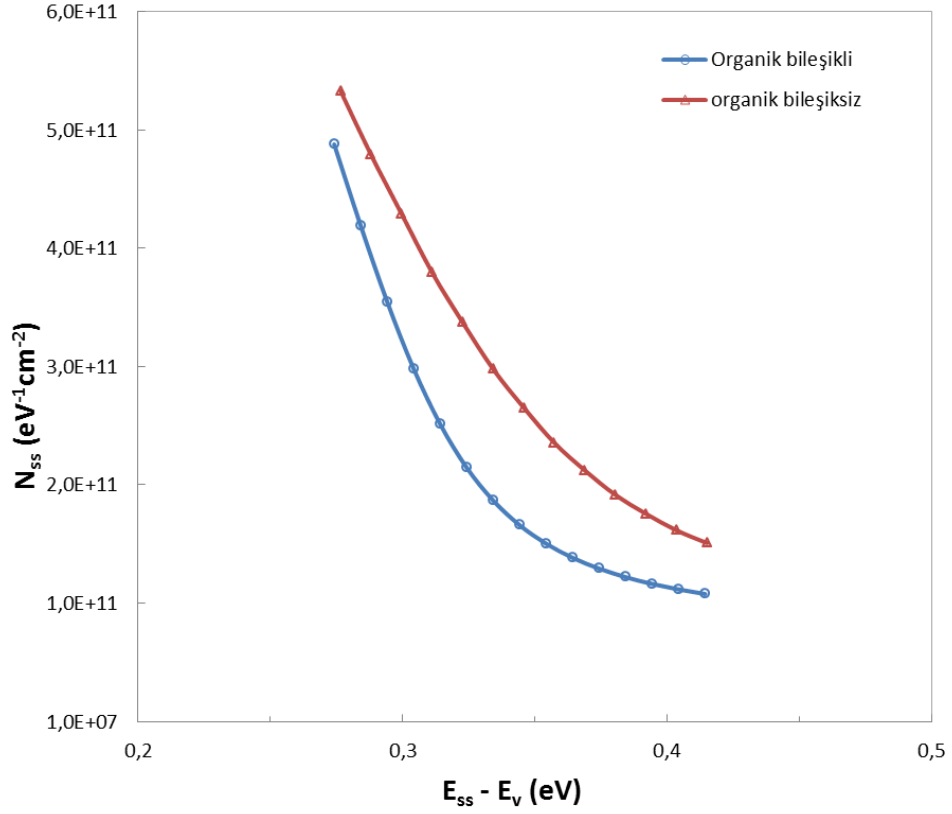
$G_{m,maks}$  = Biriktirme bölgesinde ölçülen maksimum iletkenlik,

$A$  = diyot kontakt alanı,  $q$  = elektronik yük,  $N_{ss}$  = Arayüzey durumları,

$C_m$  = Maksimum iletkenlik değerine karşılık gelen kapasite,

$w$  = Açısal frekans

Şekil 4.11.'de Hill-Coleman metodu kullanılarak organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının elde edilen arayüzey durumları yoğunluğunun enerjiye bağlı dağılımları verilmiştir.



Şekil 4.11. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının arayüzey durumları yoğunluğunun enerjiye bağlı dağılımları.

Şekil 4.11.'den görüldüğü üzere arayüzey durum yoğunluğu bant aralığının orta kısmından başlayarak değerlik bandı seviyesine doğru üstel bir şekilde artmaktadır. Bu metod kullanılarak Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapısı için arayüzey durum yoğunluğunun ortalama değeri  $2,97 \times 10^{11} eV^{-1}cm^{-2}$  olarak elde edilmiştir. Şekil 4.11.'e bakıldığında her iki yapının arayüzey durum yoğunluklarının bant aralığının orta kısmından değerlik bandı kıyasına doğru üstel bir şekilde artmakta olduğu ve arayüzey tabakasının silisyum yüzeyindeki tuzak yoğunluğunu azalttığı görülmektedir. Buradan da silisyum yüzeyi üzerindeki tuzakların organik arayüzey tarafından etkisiz hale getirilmiş olduğu görülmüştür. Tablo 4.4'de Hill-Coleman metodu kullanılarak elde edilmiş arayüzey tuzak değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Kapasitans-gerilim ölçümlerinden faydalanılarak arayüzey durum yoğunluklarını tayin etme yöntemlerinden birisi de düşük-yüksek frekans kapasitans yöntemidir.

Düşük frekans ve yüksek frekans olmak üzere iki frekans yaklaşımının dikkate

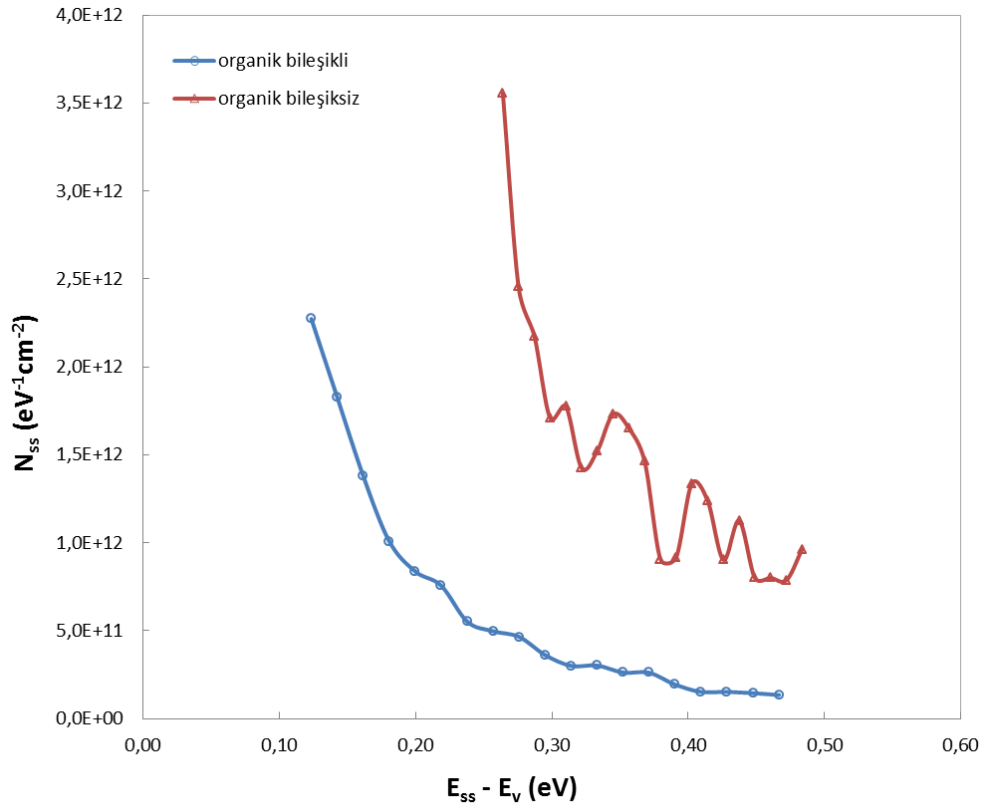
alındığı bu yöntemde (4.24) denklemi kullanılır [28, 35].

$$N_{ss} = \frac{C_i}{qA} \left( \frac{C_{LF}}{C_i - C_{HF}} - \frac{C_{HF}}{C_i - C_{LF}} \right) \quad (4.24)$$

$C_{LF}$  = Düşük frekans ölçümlerinden elde edilen kapasite değerleri,

$C_{HF}$  = Yüksek frekans ölçümlerinden elde edilen kapasite değerleri,

Şekil 4.12.'de organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının 1MHz ve 1kHz frekanslarındaki ölçümlerin kullanıldığı düşük-yüksek frekans kapasitans tekniği ile elde edilmiş enerjiye bağlı arayüzey durum yoğunluğu dağılımları verilmiştir. Şekil 4.12.'ye bakıldığında yine her iki yapının arayüzey durum yoğunluklarının bant aralığının orta kısmından değerlik bandı kıyısına doğru üstel bir şekilde artmakta olduğu ve arayüzey tabakasının silisyum yüzeyindeki tuzak yoğunluğunu azalttığı görülmektedir. Buradan da silisyum yüzeyi üzerindeki tuzakların organik arayüzey tarafından etkisiz hale getirilmiş olduğu görülmüştür. Tablo 4.4'de düşük-yüksek frekans kapasitans tekniği kullanılarak elde edilmiş arayüze tuzak değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 4.12. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının düşük-yüksek frekans kapasitans tekniği ile elde edilmiş enerjiye bağlı arayüzey durum yoğunluğu dağılımı

Tablo 4.4.'de Al/coronene/*p*-Si/Al Schottky yapısının farklı metotlarla elde edilen arayüzey durum yoğunlukları verilmiştir.

Tablo 4.4. Organik bileşenli ve bileşensiz Schottky yapılarının farklı metotlarla elde edilen arayüzey durum yoğunlukları

Yöntem	Organik bileşiksiz $N_{ss}$ ( $eV^{-1}cm^{-2}$ )	Organik bileşikli $N_{ss}$ ( $eV^{-1}cm^{-2}$ )
<i>I-V</i> yöntemi	$2,31 \times 10^{12}$	$5,34 \times 10^{11}$
Hill-Coleman yöntemi	$3,41 \times 10^{11}$	$2,97 \times 10^{11}$
Düşük-yüksek frekans kapasitans yöntemi	$2,17 \times 10^{12}$	$1,23 \times 10^{12}$

## BÖLÜM 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Son yıllarda organik yarıiletken malzemelerin ince film elektroniğinde geniş bir uygulama alanına sahip olmasından hareketle bu tez çalışmasında organik arayüzeyli Schottky yapıları üzerinde çalışılmıştır. Organik arayüzey olarak optik ve organik elektronik alanlarında önemli bir malzeme haline gelen coronene malzemesi seçilmiş ve dönerek kaplama yöntemiyle alttabaka üzerine oluşturulmuştur. Alttabaka olarak 380 µm kalınlığında, 2,5 Ω.cm öz dirençli *p*-tipi silisyum kristali kullanılmıştır. Termal buharlaştırma yöntemiyle yüksek vakum altında omik ve doğrultucu kontakların oluşturulmasını takiben organik arayüzeyli ve organik arayüzeyli Schottky yapıları elde edilmiştir. Elde edilen yapıların karanlık ortam ve oda sıcaklığında akım-gerilim, kapasitans-gerilim ve iletkenlik-gerilim ölçümleri alınmış ve bu ölçüm sonuçları grafiklere aktarılmıştır. Elde edilen verilerden faydalanarak yapıların doyma akımı, engel yüksekliği, idealite faktörü, seri direnç, taşıyıcı yoğunluğu ve tüketim tabakası genişliği gibi temel diyot parametreleri tayin edilmiştir. Yapıların arayüzey durum yoğunluklarının enerjiye bağlı dağılım profilleri ise, akım-gerilim ve kapasitans-gerilim verilerinin esas alındığı değişik teknikler yardımıyla elde edilmiştir.

Organik arayüzeyli yapının düz beslem akım-gerilim grafiğinde ideal davranıştan sapma görülmüş olup, eğri üç bölgede incelenmiştir. Birincisi birkaç  $kT/q$  kadar büyüklükte olan ve yeniden birleşme adı verilen bir bölge, ikincisi eğrinin lineer ve termiyonik emisyon akımının geçerli olduğu bölge ve üçüncü olarak da seri direnç etkisinin görüldüğü ve bundan dolayı da eğrinin aşağı doğru büküldüğü bölgedir. Yapının idealite faktörünün ve doyma akımının değerleri sırasıyla, eğrinin lineer olduğu bölgenin eğiminden ve eğrinin akım eksenini kestiği noktadan tayin edilmiştir. Yapıların idealite faktörü 1'den büyük bulunmuş ve bu durum arayüzey tabakasının ve dolayısıyla da arayüzey durumlarının varlığına atfedilmiştir. Organik

bileşikli ve bileşiksiz yapıların akım-gerilim eğrileri karşılaştırıldığında, arayüzey tabakasının beklenildiği gibi yapıda oluşan akımı önemli ölçüde azaltmış olduğu ve +2 voltta düz beslem akımının değerini 21 kat düşürdüğü görülmüştür.

Yapının akım-gerilim eğrisinin bükülmesine ve yavaş taşıyıcı yoğunluğunun oluşmasına neden olan seri direnç değerleri modifiye Norde yöntemi, Cheung yöntemi ve admittans yöntemleri kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmıştır. Norde yönteminde, akım-gerilim grafiğinin düz beslem bölgesinde 1'den büyük ideallik faktörlerine göre modifiye edilmiş özel bir fonksiyon kullanılmıştır. Bu fonksiyon uygulanan voltaja bağlı olup, düz beslem bölgesi için tanımlanmıştır. Bu yöntem kullanılarak organik bileşikli yapının seri direnç değeri 28,04  $\Omega$  bulunmuştur. Akım-gerilim ölçüm bilgileri kullanılarak seri direncin tayin edildiği bir başka yöntem de Cheung yöntemidir. Bu yöntemle iki adet fonksiyon kullanarak seri direnç değerinin elde edilmesinin yanısıra bir de ideallik faktörü ve engel yüksekliği tayin edilebilir. Bu yöntem kullanılarak organik bileşikli yapının seri direnç değerleri iki fonksiyon için sırasıyla 22,14  $\Omega$  ve 21,44  $\Omega$  olarak bulunmuştur. Yapının her iki metotla elde edilen seri direnç değerleri birbiriyle uyumludur.

Yapıların kapasitans-gerilim ve iletkenlik-gerilim ölçümleri, arayüzey tuzaklarının kapasiteye katkıda bulunamayacağı yeterince yüksek bir frekansta alınmıştır. Kapasitans-gerilim grafiği sıfır beslem civarında maksimumdan geçerken iletkenlik eğrisi artan ters besleme artmıştır. Eğrideki bu maksimumlar arayüzey durumlarının var olduğunu göstermektedir. Organik bileşikli yapının kapasite eğrisi diğer yapıya oranla daha düşük değerli bir dağılım göstermekte olup, organik bileşikli ve bileşiksiz yapılar için sıfır voltaj kapasitansı sırasıyla  $7,16 \times 10^{-10}$  ve  $1,02 \times 10^{-9}$  F bulunmuştur. Buradan arayüzey tabakasının pasifizite ettiği yüzey durumlarının yapıların kapasitansına katkıda bulunmadığı görülmektedir. Diğer taraftan organik bileşiğin oluşturduğu arayüzey tabakası yapının iletkenliğini azaltmıştır.

Yapının elde edilen  $C^2-V$  eğrisinin lineer bölgesinden hareketle taşıyıcı yoğunluğu, difüzyon potansiyeli, engel yüksekliği, görüntü yük Schottky alçalması, tüketim tabakası genişliği gibi birçok temel parametre elde edilmiştir. Organik bileşikli

Schottky yapısının deneysel olarak elde edilmiş taşıyıcı yoğunluğu ile engel yükseklik değerleri sırasıyla  $4,65 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  ve  $0,534 \text{ eV}$ 'dur.  $C^2-V$  eğrisinden deneysel olarak elde edilmiş taşıyıcı yoğunluğu değeri ile teorik olarak hesaplanmış taşıyıcı yoğunluğu değerinin uyum içinde olduğu görülmüştür.

Kapasitans-gerilim ve iletkenlik-gerilim ölçümlerinin esas alındığı admitans tekniği kullanılarak yapıların seri direnç değerleri tekrar hesaplanmış ve uygulanan harici besleme bağlı eğrileri elde edilmiştir. Bu grafiklerde sıfır beslem civarında piklerin oluştuğu görülmüştür. Admitans tekniği kullanılarak organik bileşikli Schottky yapısı için hesaplanmış seri direnç değerleri  $22,08 \Omega$ 'dur.

Bu tez çalışmasında üretilen organik arayüzeyli Schottky yapılarının arayüzey durum yoğunlukları, enerjinin bir fonksiyonu olarak akım-gerilim, kapasitans-gerilim ve iletkenlik-gerilim ölçümlerinden yararlanılarak elde edilmiştir. Bunun için değişik metodlar kullanılmış olup, her metotta elde edilen arayüzey tuzak yoğunlukları genelde  $10^{11}$  ile  $10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  mertebesindedir. Enerji dağılım profilleri incelendiğinde arayüzey tuzaklarının bant aralığının orta kısmından başlayarak değerlik bandı seviyesine doğru üstel bir şekilde arttığı görülmüştür. Mevcut bu durum bize, yarıiletkenin içerisinde bulunan safsızlıkların değerlik bandının üst kısmına doğru yoğunlaştığını ve burada sığ seviyeler meydana getirdiğini göstermektedir. Organik bileşikli arayüzey tabakalı yapılardaki tuzak yoğunluklarının arayüzey tabakasız yapılardan daha az olduğu görülmüştür. Bu durum oluşturulan organik arayüzey tabakasının silisyum yüzeyini başarılı bir şekilde pasifize ettiğini göstermektedir. Diğer taraftan arayüzey tabakasının meydana getirdiği pasivasyon işleminin değerlik bandına yakın yüzey tuzakları için biraz daha etkili olduğu tespit edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Irene, E.A., Massoud, H.Z., & Tierney, E., Silicon oxidation studies: silicon orientation effects on thermal oxidation”, Journal of the Electrochemical Society, 133, 6, 125, 1986.
- [2] Mott, N. F., Note on the contact between a metal and an insulator or semiconductor, Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 34, 568-572, 1938.
- [3] Schottky, W., Halbleitertheorie der Sperrschicht, Naturwiss., 26, 843, 1938
- [4] Neamen, D., Semiconductor Physics and Devices, Elizabeth A. Jones., 2012.
- [5] <https://www.nkfu.com/yari-iletkenlerde-elektronlar-ve-desikler-desik-akimi/> (17.05.2019)
- [6] Yacobi, B.G. Semiconductor Materials: An Introduction to Basic Principles, Springer, 1–3, 2003.
- [7] Durlu, T. N. Katıhal Fiziğine Giriş, Zirve Ofset, Ankara, 1996.
- [8] Bayram, B.A., P-si yarıiletkeni ile hazırlanan Schottky eklemlerin elektriksel parametrelerinin hesaplanması, Giresun Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2014.
- [9] Braun, F., Ukey die Streikleitung durch Schwefelmetalle "Ann. Physik chem., 153, 556, 1874.
- [10] Sze, S.M., Kwok K. Ng., Physics of Semiconductor Devices, John Wiley & Sons, Inc., publication, 2006.
- [11] Rhoderick, E.H., Williams, R.H. Metal–Semiconductor Contacts, Clarendon Press, Oxford, 1988.
- [12] Sze S.M., Physics of semiconductor devices, 2nd ed. New York Wiley, 1981.

- [13] Ziel, A., Solid-State Physical. Electronics, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1968.
- [14] Rhoderick, E. H., The physics of Schottky barriers, Journal of Physics D, 1153, 1970.
- [15] Henisch, H. K., Semiconductor Contacts ,Celerondon Press, New York, 1984.
- [16] Ambrico, M., Losurdo, M., Capezzuto, P., Bruno, G., Ligonzo, T., Schiavulli, L., Farella, I., & Augelli, V., A study of remote plasma nitrided n-GaAs/Au Schottky barrier, Solid State Electronics, 49, 413-419, 2005.
- [17] Crowell, C. R., Rideout, V. L. Normalized Thermionic-Field Emission In Metal-Semiconductor Barriers. Solid State Electronics, 12, 89-105, 1969.
- [18] Padovani, F. A., Stratton, R. Field and Thermionic-Field Emission in Schottky Barriers. Solid-State Electronics, 9, 695-707, 1966.
- [19] Card, H. C., Rhoderick, E. H., Studies of Tunnel MOS Diodes I. Interface Effects In Silicon Schottky Diodes Journal of Physics D: Applied Physics, 4, 1589-1601, 1971.
- [20] Norde, H., A Modified Forward I-V Plot for Schottky Diodes with High Series Resistance Journal of Physics, 50, 5052-5053, 1979.
- [21] Sato, K., Yasamura, Y., Study of Forward I-V Plot for Schottky Diodes with High Series Resistance, Journal of Physics, 60, 1223, 1985.
- [22] McLean, A. B., Limitations to The Norde I-V Plot, Semicond, Science Technology, 1, 177, 1986.
- [23] Cheung, S. K., Cheung, N. W., Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. Applied Physics Letters, 49, 85-87, 1986.
- [24] Bohlin, K. E., Generalized Norde Plot Including Determination of the Ideality Factor, Journal of Applied Physics, 60, 1223-1224, 1986.
- [25] Nicollian, E. H., Brews, J. R., Metal Oxide Semiconductor (MOS) Physics and Technology, John Wiley, New York, 1982.
- [26] Cowley, A. M., Sze, S. M., Surface States and Barrier Height of Metal-Semiconductor Systems. Journal of Applied Physics, 36, 3212-3220, 1965.

- [27] Card, H. C., Aluminum-Silicon Schottky Barriers and Ohmic Contacts in Integrated Circuits. *IEEE Trans. On Electron Devices*, 23, 538-544, 1976.
- [28] Castagne, R., Vapaille, A. Description of the SiO<sub>2</sub>-Si Interface Properties by Means of Very Low Frequency MOS Capacitance Measurements, *Surface Science*, 28, 157, 1971.
- [29] Hill, W. A. Coleman, C. C., A single-frequency approximation for interface-state density determination, *Solid-State Electronics*, 23, 987, 1980.
- [30] Maeda, K., Energy level broadening of defects causing nonideality in nearly ideal Si Schottky barriers, *Applied Surface Science*, 237, 165, 2004.
- [31] Akkal, B., Benamara, A., Gruzza, B., & Bideux, L., Characterization of Interface States at Au/InSb/InP(100) Schottky Barrier Diodes As A Function of Frequency. *Vacuum*, 57, 219-228, 2000.
- [32] Jaros, M., *Physics and Applications of Semiconductor Microstructures*, Clarendon Press, Oxford, 1989.
- [33] Szatkowski, J., Sieranski, K. Interface Effects on Mg-Zn<sub>3</sub>-P<sub>2</sub> Schottky Diodes. *Solid State Electronics*, 31, 257-260, 1988.
- [34] Barış, B., Karadeniz, S., & Erdal M. O., Preparation of coronene nanowires and its properties, *Materials Letters*, 205, 70–74, 2017.
- [35] Kelberlau, U., Kassing, R. Nonequilibrium Properties of MIS-Capacitors. *Solid State Electronics*, 24, 321-327, 1981.

## ÖZGEÇMİŞ

Sitem ÇELİK 1989 yılında Kars'ta doğdu. İlk, Orta ve Lise öğrenimini Kars'ta tamamladı. 2009 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik bölümünden 2015 yılında mezun oldu. Bu eğitim ve öğrenim süreci içerisinde pedagojik formasyon eğitimini tamamladı. Aynı yıl girdiği Giresun Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği alanında Yüksek lisans eğitimine başladı. Halen 2018 yılında atandığı Ankara Kriminal Polis Laboratuvarında polis memuru olarak görev yapmaktadır.