

T.C.
YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

**ORGANİK (METİL MORU) ARAYÜZEY TABAKANIN Sn/p-Si/Al SCHOTTKY
DİYOTLARININ ELEKTRİKSEL KAREKTERİSTİKLERİ ÜZERİNE
ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN : Rozhgar Hasan HAMAD AMEEN
DANIŞMAN : Yrd. Doç. Dr. Abdullah ÖZKARTAL

VAN – 2016

T.C.
YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

**ORGANİK (METİL MORU) ARAYÜZEY TABAKANIN Sn/p-Si/Al SCHOTTKY
DİYOTLARININ ELEKTRİKSEL KAREKTERİSTİKLERİ ÜZERİNE
ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN : Rozhgar Hasan HAMAD AMEEN

VAN – 2016

KABUL ve ONAY SAYFASI

Fizik Anabilim Dalı'nda Yrd. Doç. Dr. Abdullah Özkartal danışmanlığında, Rozhgar Hasan Hamad Ameen tarafından sunulan “**Organik (Metil Moru) Arayüzey Tabakanın Sn/p-Si/Al Schottky Diyotlarının Elektriksel Karakteristikleri Üzerine Etkileri**” isimli bu çalışma “Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği” ve “Fen Bilimleri Enstitüsü Yönergesi’nin ilgili hükümleri gereğince 17/08/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile başarılı bulunmuş ve yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Cabir TEMİRCİ

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Abdullah ÖZKARTAL

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Kadir EJDERHA

İmza :

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/..... tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

İmza

Prof. Dr. Suat ŞENSOY

Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Rozhgar Hasan Hamad Ameen

(İmza)

ÖZET

ORGANİK (METİL MORU) ARAYÜZEY TABAKANIN Sn/p-Si/Al SCHOTTKY DİYOTLARININ ELEKTRİKSEL KAREKTERİSTİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ

HAMAD AMEEN Hasan Rozhgar

Yüksek Lisans Tezi, Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Abdullah ÖZKARTAL

Ağustos 2016, 55 sayfa

Bu çalışmada, $\rho=12-16 \Omega.cm$ öz dirençli, [100] doğrultusunda büyütülmüş, 620 μm kalınlığında, Bor katkılı *p*-Si kristali kullanılarak, metil moru organığının bir arayüzey malzemesi olarak Sn/p-Si/Al Schottky diyotlarının elektriksel karakteristikleri üzerine etkileri araştırılmıştır.

Üretilen Sn/metil moru/p-Si/Al diyotların akım-voltaj (*I-V*), kapasite-voltaj (*C-V*) ve kapasite-frekans (*C-f*) ölçümleri oda sıcaklığında ve karanlıkta alındı. Üretilen Sn/metil moru/p-Si/Al kontakların idealite faktörü (*n*), engel yüksekliği (Φ_b) ve seri direnç (R_s) gibi karakteristik diyot parametreleri belirlendi. Bu parametreler Cheung ve Norde fonksiyonları ile hesaplanmış ve her iki yöntemden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte organik ara yüzeyli Schottky diyotun ara yüzey durumlarını belirlemek için *C-V* ölçümleri alınmış ve $C^{-2}-V$ karakteristikleri yardımıyla difüzyon potansiyeli (V_d), Fermi enerji seviyesi (E_f), akseptör yoğunluğu (N_a) ve arıma bölgesi genişliği (W_d) değerleri hesaplanmıştır.

Elde edilen sonuçlar literatürdeki değerlerle karşılaştırılmış ve metil moru organığının Sn/p-Si/Al Schottky diyot parametrelerine önemli ölçüde etkidiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler : Metil moru Schottky diyot, Organik bileşen,.

ABSTRACT

EFFECTS of ORGANIC (METHYL-VIOLET) INTERFACIAL LAYER on ELECTRICAL CHARACTERISTIC at Sn/p-Si/Al SCHOTTKY DIODES

HAMAD AMEEN Hasan Rozhgar

M. Sc. Thesis, Physics Department

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Abdullah ÖZKARTAL

Agust 2016, 55 pages

In this study, effects of organic methyl violet on electrical characteristics of *Sn/p-Si/Al* Schottky diodes were investigated for *Sn/methyl-violet/p-Si/Al* structure, by using Boron doped p-Si crystal with [100] direction, with 620 μm thickness and resistivities between 12-16 $\Omega\cdot\text{cm}$.

Current-voltage (*I-V*), capacitance-voltage (*C-V*) and capacitance-frequency (*C-f*) measurements of produced samples were taken under dark at room temperature. Diode characteristic parameters of produced *Sn/p-Si/Al* and *Sn/methyl-violet/p-Si/Al* contacts such as ideality factor (*n*), barrier height (Φ_b) and series resistance (R_s) were determined. These parameters were calculated by Cheung and Norde functions and obtained from both methods were compared. In addition, for defining the interface states of the Schottky diodes which has organic interface layer, *C-V* measurements were performed, and the values of V_d , E_f , N_d , W_d and Φ_b were calculated from C^{-2} -*V* characteristics of Schottky diodes. The obtained barrier heights values were compared with the previous values.

When the obtained results were compared with traditional metal semiconductor Schottky (MS) diodes, it was observed the organic methyl-violet affect significantly on the electrical parameters of Schottky diodes.

Key words : Methyl-violet, Schottky diode, Organic components.

ÖN SÖZ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmada, yardımlarını ve desteğini hiçbir şekilde esirgemeyen sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Abdullah ÖZKARTAL' a teşekkürlerimi sunarım.

Tezin oluşumunda büyük katkılar sunan ilk danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Bahri BATI' ya teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım sırasında YYÜ Fen Fakültesi Fizik Bölümü Yarıiletken Aygıtlar Üretimi ve Karakterizasyonu Laboratuvarını kullanmam konusunda her türlü destek veren Fizik Bölümü Başkanı Prof. Dr. Cabir TEMİRCİ' ye teşekkür ederim.

Deneylein yapımında yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Arife GENCER İMER' e teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmaları ve ölçümlerindeki yardımlarından dolayı Arş. Gör. Abdulkadir KORKUT' a teşekkür ederim.

Moral ve desteklerini esirgemeyen Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fizik Bölümü öğretim üyelerine ve öğretim elemanlarına teşekkür ederim.

Rozhgar Hasan HAMAD AMEEN

Ağustos / 2016

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
ÖN SÖZ	v
ÇİZELGELER LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLDİRİŞİ	3
3. TEORİK BİLGİ	8
3.1. Metal-Yarıiletken Kontaklar	8
3.2. Metal n-Tipi Yarıiletken Kontaklar	8
3.1.1. Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak	9
3.1.2. Metal n-tipi yarıiletken omik kontak	11
3.2. Metal p-Tipi Yarıiletken Kontaklar	13
3.2.1. Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu kontak	13
3.2.2. Metal p-tipi yarıiletken omik kontak	15
3.3. Metal Yarıiletken Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları	16
3.3.1. Termiyonik emisyon teorisi	16
3.3.2. Difüzyon teorisi	18
3.3.3. Termiyonik emisyon - difüzyon teorisi	19
3.3.4. T_0 etkili akım iletimi	20
3.4. Akım Voltaj Verilerinden Kontak Parametrelerinin Elde Edilmesi	21
3.5. Metal Yarıiletken Kontaklarda Schottky Kapasitesi	23
3.6. Schottky Diyotlarının Kapasitansı	26
3.7. Schottky Diyotlarının Kapasite-Voltaj Karakteristikleri	30
3.8. Metal - Yarıiletken Schottky Diyotlarda Arayüzey Tabakasının Etkileri	31
4. DENEY DÜZENİĞİ VE ÖLÇÜMLER	34
4.1. Numunelerin Hazırlanması ve Temizlenmesi	35
4.2. Schottky Diyotların Yapılması	35
4.3. Ölçümler ve Grafikler	37
4.3.1. Akım-voltaj (I - V) ölçümleri ve cheung fonksiyonlarının kullanılması	37

4.3.2. Norde Fonksiyonu ile Engel Yüksekliği ve Seri Direnç Hesaplama	42
4.3.3. Sabit frekans altında kapasite-gerilim (C-V) ölçümleri	44
4.3.4. Kapasitans - frekans (C-f) ölçümleri	47
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	49
KAYNAKLAR	52
ÖZGEÇMİŞ.....	56

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4. 1. Üretilen diyotların etkin alanları	40
Çizelge 4. 2. Üretilen diyotların bazı karakteristik parametrelerin deneysel değerleri ..	40
Çizelge 4. 3. Üretilen diyotların bazı karakteristiklerinin Norde fonksiyonu ile elde edilen değerleri.....	43
Çizelge 4. 4. Üretilen diyotların C-V ölçümlerinden hesaplanan değerleri	46

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3. 1. Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji band diyagramları	10
Şekil 3. 2. Metal n-tipi yarıiletkende omik kontağın enerji- band diyagramı,	12
Şekil 3. 3. Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu kontakta enerji band diyagramları	14
Şekil 3. 4. Metal p-tipi yarıiletken omik kontakta enerji band diyagramları	15
Şekil 3. 5. Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontakta.....	23
Şekil 4. 1. Deneylerde kullanılan vakum kaplama sistemi.....	34
Şekil 4. 2. Tavlama için kullanılan fırın	36
Şekil 4. 3. Metil moru molekül yapısı	37
Şekil 4. 4. S0 ve SMM numunelerinin $\ln I-V$ grafiği.	38
Şekil 4. 5. S0 ve SMM numunelerine ait Cheung fonksiyonları $dV/d(\ln I)-I$ grafiği.	41
Şekil 4. 6. S0 ve SMM numunelerine ait $H(I)-I$ grafiği.	42
Şekil 4. 7. S0 ve SMM numunelerine ait $F(V)-V$ grafiği.....	43
Şekil 4. 8. S0 ve SMM numunelerine ait $C-V$ ölçümlerinden elde edilen $C-V$ grafiği...	45
Şekil 4. 9. S0 ve SMM numunelerine ait $C-V$ ölçümlerinden elde edilen $C^{-2}-V$ grafiği.	45
Şekil 4. 10. S0 ve SMM numunelerinin sabit frekansta $C-V$ değişim grafiği.	47
Şekil 4. 11. S0 ve SMM numunelerinin sabit voltajda $C-f$ değişim grafiği.	48

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A	Diyot alanı
C	Kapasite (Sığa)
C₀	Arınma bölgesi kapasitesi
D	Arayüzey tabaka kalınlığı
E_S	Vakum seviyesi ile valans bandı arasındaki enerjisi farkı
E_{SS}	Arayüzey hal enerjisi
E_F	Fermi enerjisi
E₀	Aktivasyon Enerjisi
E_V	Valans bandı enerji seviyesi
E_{vak}	Vakum enerji seviyesi
ε_i	Arayüzey tabakasının dielektrik sabiti
ε_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ε₀	Boşluğun dielektrik sabiti
f_(E)	Fermi dağılım fonksiyonu
F	Frekans
H	Planck sabiti
I	Akım
I₀	Doyma (saturation) akımı
J	Akım yoğunluğu
J₀	Doyma akım yoğunluğu
Φ_b	Schottky engel yüksekliği
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
N_a	Yarıiletkenin iletkenlik bandındaki durumların yoğunluğu
N_v	Yarıiletkenin valans bandındaki durumların yoğunluğu
ρ(x)	Konuma bağlı uzay yük yoğunluğu
K	Boltzman sabiti
MIS	Metal yalıtkan yarıiletken

MOS	Metal oksit yarıiletken
MS	Metal yarıiletken
m_h^*	Değişin etkin kütlesi
m_e^*	Elektronun etkin kütlesi
m_e	Elektronun kütlesi
μ	Elektron mobilitesi
N_d	Yarıiletkenin donör yoğunluğu
N_a	Yarıiletkenin akseptör yoğunluğu
N_{ss}	Yarıiletkenle dengede olan arayüzey hal yoğunluğu
n	İdealite faktörü
n_x	Elektron yoğunluğu
R_s	Seri direnç
R^*	Richardson sabiti
R^{**}	Etkin Richardson sabiti
T	Ortam sıcaklığı (Kelvin)
V_d	Difüzyon potansiyeli
W_d	Arınma bölgesinin kalınlığı
χ_s	Yarıiletkenin elektron ilgisi
V	Voltaj (gerilim)
V_p	Potansiyel fark
v_r	Rekombinasyon hızı
v_x	İletim hızı
$\Psi(x)$	Kontağın yüzey potansiyel fonksiyonu

1. GİRİŞ

İletişimin çok güçlü ve çok hızlı olduğu bir zamanda yaşıyoruz. Güçlü iletişim hızlı teknolojik gelişmelere neden olmaktadır. Her geçen gün gelişen elektronik dünyasında da Schottky diyotlar araştırmacıların ilgisini çekmeyi sürdürmektedir. Hızlı anahtar uygulamaları, mikrodalga karıştırıcı algılayıcıları, frekans-gerilim değişimli kondansatörler, güneş pilleri ve Schottky engel tabakalı alan etkili transistörler Schottky diyotları araştırma konularından bazılarıdır. Bu yapılarda, Schottky engel yüksekliğinin büyüklüğü en önemli karakteristik değerdir. Son zamanlarda Schottky engel yüksekliğini büyütmek için birçok bilimsel araştırma yapılmıştır. Organik/inorganik kontakların arayüzeylerinde dipollerin oluşturularak engel yüksekliğinin artacağı veya azalacağı rapor edilmiştir (Barış, 2013). Schottky tipi güneş pillerinde açık devre gerilimi ve pil veriminin artması için organik malzemelerin, metal ve inorganik malzeme arasında arayüzey tabaka olarak kullanılmalarına dair pek çok çalışma mevcuttur (Aydın ve ark., 2011; Yahia ve ark., 2011; Aydoğan ve ark., 2010; Yakuphanoglu ve ark., 2010; Okur ve ark., 2009; Ashok ve ark., 1979).

Bu tip organik arayüzey ile oluşturulan yapılar, Schottky kontağı metal-yarıiletken (MS) yapısından, metal-arayüzey-yarıiletken (MIS) yapısına dönüştürür. MIS yapılarında kontağın elektriksel karakteristiği arayüzey malzemenin özelliklerine göre değişir. Kullanılan arayüzey malzeme, doğrudan kontağın özelliklerini, performansını ve verimini etkiler (Rhoderick, 1978). Organik malzemeler yarıiletkenlik göstererek yasak enerji aralıklarının farklı değerler alması, maliyetlerinin ucuz olması ve farklı amaçlar için kolaylıkla sentezlenebilir olmaları arayüzey malzeme olarak öncelikli tercih edilmelerine neden olmaktadır.

Yarıiletken organik malzeme ile yapılan MIS yapılarda arayüzey çalışmaları ve tartışmaları yoğun bir şekilde sürmektedir. Yarıiletken organiklerdeki karasız elektriksel özellikler son zamanlarda yapılan çalışmalar ile kararlı hale gelmiş ve üretilen teknolojik yapılar laboratuvar çalışmalarından çıkarak endüstriyel alana kaymıştır.

Bu çalışmada amaç, organik malzeme olan metil morunu arayüzey malzemesi olarak kullanarak Sn/Metil Moru/p-Si/Al kontakları üretilip, metil moru organik malzemenin Sn/p-Si/Al Schottky kontağının elektriksel karakteristikleri üzerine etkisini araştırmaktır. Bu amaçla üretilen Sn/metil moru/p-Si/Al diyotların akım-voltaj (I - V),

kapasite-voltaj ($C-V$) ve kapasite-frekans ($C-f$) ölçümlerini alarak kontakların idealite faktörü (n), engel yüksekliği (Φ_b) ve seri direnç (R_s) gibi karakteristik diyot parametreleri belirlenerek, sonuçlar yorumlanmıştır.

2. LİTERATÜR BİLDİRİŞİ

Metal-yarıiletken (MS) kontaklar, çok çeşitli elektronik devre elemanlarının yapısında yer aldıkları için büyük önem taşırlar. Hangi devrede, ne özellikli MS kontağının kullanılmasını belirlemek için MS kontaklarının idealite faktörü (n) ve engel yüksekliği (Φ_b) gibi elektriksel özellikleri iyi bilinmesi gerekir (Rhoderic ve Williams, 1988). Son yıllarda, yüzey ve ara yüzey tekniklerinin uygulaması, metaller ve yarıiletkenler arasında oluşan ara yüzeylerin kompleks bölgeler olduğunu ve fiziksel özelliklerinin, yüzey hazırlama şartlarına bağlı olduğunu açıkça göstermekte ve birçok durumda, bilinmeyen kirliliklerle kaplı olan yüzeyler üzerine oluşturulan kontaklar ara yüzey durumlarına sebep olduğu ve bu durumların diyotların performansını, kararlılığını, verimini, mekanik ve elektriksel özelliklerini etkilediği bilinmektedir (Bolotnikov, 2002).

Yarıiletken ile metali ayıran ince arayüzey yalıtkan tabakanın olması halindeki (MIS) Schottky engelli güneş pilinin açık devre voltajı ve verimliliğinde gözlenen artış nedeniyle MIS Schottky diyotlarına olan ilgiyi artırmıştır (Ashok ve ark.,1979).

Schottky diyotlarda elektriksel iletkenlik, çoğunluk taşıyıcıları ile sağlandığından yüksek frekanslarda ve düşük düz beslemede çalışabilen diyotlardır. GHz mertebesinde anahtarlama hızına sahiptirler. Bu nedenle Schottky engel diyotların optoelektronik ve telekomünikasyon alanlarında geniş kullanım alanları mevcuttur (Aydın, 2003).

Metal-yarıiletken (MS) kontakların geçmişi Braun'ın 1874 yılında metal sülfat kristallerde elektriksel iletkenliğin asimetric olduğunu keşfetmesi ile başlar. 1895 yılında Marconi'nin radyo iletişimine ait deneyleri Braun'un dikkatini çekmiş ve bu deneylerin sonuçlarını nokta kontak metal-yarıiletken doğrultuculara ve detektörlere başarıyla uygulamıştır. Kristal doğrultucuların yükseltmesinin zayıf olmasından dolayı, 1920 lerde vakum tüpleri radyo dalga ayarlamasında kristal doğrultucuların yerini almıştır.

Schottky ve ark. (1931), MS kontaklarda doğrultma özelliğinin olduğunu ilk olarak açıklamışlardır.

Schottky (1938) ve Mott (1938), birbirlerinden bağımsız olarak doğrultma işleminin elektronların potansiyel engeli üzerinden sürüklenme ve difüzyon şeklinde geçişi ile açıklanabileceğini ileri sürmüşlerdir. Schottky-Mott teorisine göre, oluşan potansiyel engelin nedeni metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farktır. Bu teoriye göre potansiyel engelinin büyüklüğü, metalin iş fonksiyonu ile yarıiletkenin elektron ilgisi arasındaki farka eşittir (Rhoderick ve Williams, 1988). Fakat daha sonra yapılan çalışmalar Schottky engel yüksekliğinin, metalin iş fonksiyonundan ziyade metal-yarıiletken kontağın hazırlama yöntemlerine bağlı olduğunu göstermiştir. Schottky-Mott teorisinde ideal MS yapı kabul edilmiş, oluşan arayüzeyin durumları dikkate alınmamıştır. Oysa bu arayüzey yapı kontak oluşturma işlemlerine göre her zaman olmaktadır. Oluşan arayüzey hal yoğunlukları, yarıiletkenin ait Fermi seviyesinin yasak enerji aralığındaki hareketini sınırlandırmaktadır. Bu sonuç üzerine Bardeen, MS arayüzeyinin varlığından dolayı potansiyel engel yüksekliğinin metalin iş fonksiyonundan bağımsız olacağını belirtmiştir (Wilmsen, 1985).

Termoiyonik emisyon, sıcak bir yüzeyden elektron veya boşluk salınmasıdır (Bethe, 1942). Bethe (1981), Richardson'un bulduğu metal vakum sistemi için, 1942 yılında bulduğu termoiyonik emisyon teorisini metal-yarıiletken yapılara da uygulanabileceğini gösterdi.

Crowell ve Sze (1965), metal n-tipi yarıiletken kontaklarda engel yüksekliğini, iş fonksiyonunu ve arayüzey durumlarını incelemişlerdir.

Heine (1965), Al/n-Si Schottky diyotlarda, $C-f$ karakteristiklerinde düşük frekanslarda görülen uzay yükü sığasına ilave kapasitenin sadece arayüzey hallerinden ileri gelmediği, bunun yanında ilave kapasitenin omik kontak direncinin belirgin bir kapasitesinin olduğu ve artık sığanın sadece arayüzey hallerinin bir ölçüsü olmayacağı sonucuna vardı.

Crowell ve Sze (1966), Schottky' nin difüzyon teorisi ile Bethe'nin termoiyonik emisyon teorisini birleştirerek termoiyonik emisyon-difüzyon teorisini ortaya koymuştur.

Card ve Rhoderick (1971), doğru beslem $I-V$ karakteristiklerinden elde edilen idealite faktörünün niceliğine bağlı olarak, arayüzey hallerinin metalle mi yoksa yarıiletkenle mi dengede olduğunu teorik ve deneysel olarak açıklamışlardır.

Cheung ve Cheung (1986), ideal ve ideal olmayan diyotlar için doğru beslem I - V karakteristikleri kullanarak Schottky diyotlarda engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnci hesaplamak için farklı bir hesaplama yöntemi ortaya koymuşlardır.

Werner ve ark.(1988), Schottky diyotlarda, doğru beslem durumunda Schottky kapasitesine ek olarak gözlenen kapasitenin, azınlık taşıyıcılarından ziyade arayüzey hallerine atfedilebileceğini illeri sürmüşlerdir.

Chattopadhyay ve Das (1991), seri direncin varlığında C - V grafiklerinin gösterdiği pikler, C - V karakteristiklerinde seri direnç etkisi düşünülerek, R_s seri direncinden kaynaklandığından C - V grafiğindeki piklerin maksimumuna karşılık gelen voltaj değerlerini, I - V karakteristiklerinde kullanarak, R_s değerlerini hesaplamak için bir model geliştirmişlerdir.

Schottky diyotlarında C - V kapasite-gerilim ölçümleri konusunda araştırmalar yapılmıştır. Arayüzey oksit tabakalı ve arayüzey tabakasız Al/p-Si Schottky diyotlarında arayüzey durumları ve arayüzeydeki sabit yükleri dikkate alarak I - V ve C - V karakteristiklerini inceleyerek engel yüksekliğini, idealite faktörünü ve arayüzey durum yoğunluğunu belirlemişlerdir. Metal-yarıiletken kontaklarda arayüzey durum yoğunluğunu ve bunun neden olduğu artık sığayı deneysel olarak inceleyerek bu sığanın frekansın artmasıyla azaldığını, diğer bir ifadeyle arayüzey durum yoğunluğunun artan frekansla azaldığını belirtmişlerdir (Türüt ve Sağlam, 1992).

Chattopadhyay ve Raychaudhuri (1993), C - V karakteristiklerinde gözlenen kapasite pikini seri direnç etkisine atfetmişlerdir.

Batı (1999), yaklaşık otuz yıldır metal-yarıiletken Schottky diyotlarında arayüzey hallerinin etkisi, çok yoğun bir şekilde, çeşitli yöntem ve tekniklerle araştırıldığını belirtmiştir. Özellikle, son 25 yılda, arayüzey halleri hakkında bilgi ilave veya artık kapasite analizlerinden çıkarıldığını rapor etmiştir.

Temirci ve ark. (2001), Sn/p-Si Schottky kontaklarda anodik oksidasyon yöntemiyle metal-yarıiletken arayüzeyinde oluşturulacak kontrollü bir oksidasyon işlemiyle engel yüksekliğinin arttırabileceğini göstermiştir.

Kumta ve ark. (2005), yüksek dielektriğe sahip metal-yarıiletken diyotların karakteristiklerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimini incelemişlerdir.

Tataroğlu ve Altındal (2006), Al/SiO₂/p-Si (MIS) Shottky diyotların karakteristiklerinin diydun yalıtkan tabakasının kalınlığına bağlı olarak nasıl

değiştiğini ve idealite faktörü ile engel yüksekliğinin yalıtkan tabakasının kalınlığına bağlı olup olmadığını incelemişlerdir.

Yakuphanoglu (2007), Al/p-Si/Cu Phthalocyanine fotodiyot kontak yapılarında elektronik ve fotovoltaiik özellikleri incelemiştir.

Ocak ve ark. (2009), Sn/Metilen mavisi/p-Si Schottky diyotun *I-V* ve *C-V* karakteristiklerini incelemişlerdir.

Karataş ve Çakar (2009), Sn/Rhodamine-101/p-Si Schottky yapının elektriksel ve arayüzey durumlarının sıcaklığa bağıllığını incelemişlerdir.

Akkılıç ve ark. (2006), organik arayüzey tabakası olarak kitin kullanarak, *Ag/kitin/n-Si* Schottky engel yüksekli diyot üretmişler ve karanlıkta ve oda sıcaklığında elektriksel özelliklerini incelemişlerdir. Ürettikleri diyotların engel yüksekliğini ve idealite faktörünü sırasıyla 0.959 eV ve 1.553 olarak hesaplamışlardır.

Kılıçoğlu (2008), organik arayüzey tabakası olarak metil kırmızısı kullanarak, *Al/metil kırmızısı/p-Si* Schottky engel yükseklikli diyot üretmiş ve karanlıkta ve oda sıcaklığında elektriksel özelliklerini incelemiştir. Organik arayüzeyli diyotların engel yüksekliğini ve idealite faktörünü sırasıyla 0.855 eV ve 1.19 olarak hesaplamıştır.

Güllü ve ark. (2010), organik arayüzey tabakası olarak kongo kırmızısı kullanarak, *Al/kongo kırmızısı/p-Si* Schottky engel yükseklikli diyot üretmişler ve karanlıkta ve oda sıcaklığında elektriksel özelliklerini incelemişlerdir. Ürettikleri diyotların engel yüksekliğini ve idealite faktörünü sırasıyla 0.77 eV ve 1.68 olarak hesaplamışlardır.

Aydoğan ve ark. (2010), organik arayüzey tabakası olarak karmin kullanarak, *Al/karmin/n-Si* Schottky engel yükseklikli diyot üretmişler ve karanlıkta ve oda sıcaklığında elektriksel özelliklerini incelemişlerdir. Ürettikleri diyotların engel yüksekliğini ve idealite faktörünü sırasıyla 0.69 eV ve 2.89 olarak hesaplamışlardır.

Aydoğan ve ark. (2010), organik arayüzey tabakası olarak anilin yeşili kullanarak, *Al/anilin yeşili/Ga₂Te₃* Schottky engel yükseklikli diyot üretmişler ve karanlıkta ve oda sıcaklığında elektriksel özelliklerini incelemişlerdir. Ürettikleri diyotların engel yüksekliğini ve idealite faktörünü sırasıyla 0.67 eV ve 1.79 olarak hesaplamışlardır.

Ozerden ve ark. (2015), organik arayüzey tabakası olarak 9, 10-H₂BaP kullanarak, *Ag/10-H₂BaP/n-Si* Schottky engel yükseklikli diyot üretmişler, karanlıkta ve oda sıcaklığında elektriksel özelliklerini incelemişlerdir. Ürettikleri diyotların engel yüksekliğini ve idealite faktörünü sırasıyla 0.67 eV ve 1.30 olarak hesaplamışlardır. Ayrıca ürettikleri diyotların fotovoltaiik özelliklerini de incelemişlerdir.

Ugur ve ark. (2015), organik arayüzey tabakası olarak kinolin sarısı kullanarak, *Al/kinolin sarısı/p-Si* Schottky engel yükseklikli diyot üretmişlerdir. Karanlıkta, aydınlıkta ve oda sıcaklığında elektriksel ve fotovoltaiik özelliklerini incelemişlerdir. Ürettikleri diyotların engel yüksekliğini ve idealite faktörünü sırasıyla 0.87 eV ve 1.23 olarak hesaplamışlardır. Kinolin sarısı ince filiminin optiksel yasak enerji bant aralığını 2.73 eV olarak bulmuşlardır.

Bati (2016), organik arayüzey tabakası olarak metil mavisi kullanarak, *Al/metil kırmızısı/n-Si* Schottky engel yükseklikli diyot üretmiştir. Ürettiği diyotlar karanlıkta ve oda sıcaklığında elektriksel özelliklerini incelemiştir. Organik arayüzeyli diyotların engel yüksekliğini ve idealite faktörünü sırasıyla 0.83 eV ve 2.8 olarak hesaplamıştır.

Bu çalışmada, organik metil morunun Sn/p-Si/Al Schottky tipi diyotunda arayüzey malzemesi olarak kullanılarak diyot karakteristikleri üzerine etkilerinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Üretilen Sn/metil moru/p-Si/AL Schottky kontakların elektriksel özelliklerini belirleyebilmek için, karanlıkta ve oda sıcaklığında *I-V*, *C-V*, *C-f* ölçümleri alınarak, grafikler yardımıyla ve hesaplamalarla karakterizasyon işlemleri yapıldı.

3. TEORİK BİLGİ

3.1. Metal-Yarıiletken Kontaklar

Bir metalin bir yarıiletkenle temas ettirilmesiyle oluşturulan metal-yarıiletken (MS) kontaklarda termal denge kuruluncaya kadar metal ile yarıiletken arasında yük geçişleri olur. Metalden yarıiletkenle, yarıiletkenle metale elektron geçişi metal ile yarıiletkenin Fermi enerji düzeylerinin eşit olduğu termal denge durumuna kadar devam eder. Böylece metal yarıiletken arayüzeyinde yüklerin ayrılmasıyla yeni bir dağılım sonucunda bir potansiyel engeli oluşur. Arayüzey bölgesi, yarıiletken tarafında oluşan ve hareketli yüklerin olmadığı yüksek dirençli bir bölgedir. Metal yarıiletken arayüzeyinde bir potansiyel engel oluştuğunu ilk olarak Schottky, eklemde oluşan bu potansiyelin metal ile yarıiletken iş fonksiyonları arasındaki farktan kaynaklandığını ise Mott açıklamıştır. Schottky-Mott teorisine göre potansiyel engeli, metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki fark sebebiyle oluşur (Sharma, 1984).

MS kontaklar, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına, üretim tekniğine ve katkılama oranına bağlı olarak doğrultucu kontak ve omik kontak olmak üzere iki çeşittir. Bir metalin kontak haline getirildiği yarıiletkenin tipi de önemlidir. Mesela bir altın tel, p tipi germanyuma kontak edilirse omik kontak oluşur; aynı tel n-tipi germanyuma kontak edilirse doğrultucu kontak oluşur.

3.2. Metal n-Tipi Yarıiletken Kontaklar

MS kantağın omik ya da doğrultucu olduğunu anlamak için iş fonksiyonlarına bakmak gerekir. Φ_m , metalin iş fonksiyonudur ve bir elektronu Fermi seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli enerji, olarak tanımlanır. Φ_s ise yarıiletkenin iş fonksiyonudur. Yarıiletkenlerde fermi seviyesi katkı miktarına göre değiştiği için değişken bir niceliktir. Fermi enerji seviyesi (E_f); dolmuş yörüngeleri dolmamış yörüngelerden ayıran izafî bir seviyedir ve $f(E)$ Fermi dağılım fonksiyonuna bağlı olarak ifade edilir. E_f 'nin $f(E)$ ile ilişkisi

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp[-(E_f - E)/kT]} \quad (3.1)$$

ile verilir. Yarıiletkenin elektron ilgisi χ_s , iletkenlik bandının tabanından (E_c) bir elektronu vakum seviyesine çıkarmak için gerekli enerji miktarıdır. Vakum seviyesi, bir metalin tam dışındaki sıfır kinetik enerjili elektronun enerji seviyesidir.

3.1.1. Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak

Metal-yarıiletken doğrultucu kontakların veya Schottky diyotlarının özelliklerinden biri kontak direncinin dışarıdan uygulanan gerilime bağılılığıdır. Bu bağılılık o kadar güçlüdür ki, metal yarıiletken kontağı tek yönlü iletkenliğe getirmektedir. Yani kontakta akım, bir yönden kolayca geçer, ters yönden ise zayıf geçer (Cafer, 2000).

Metal n-tipi yarıiletken kontaklarda $\Phi_m > \Phi_s$ olduğunda doğrultucu kontak olur. Kontakta önce (Şekil 3.1(a)) yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden her iki yapının iş fonksiyonları arasındaki fark kadar ($\Phi_m - \Phi_s$) yukardadır. Metal ile yarıiletken kontak haline getirildiğinde yarıiletkenden metale yük akışı başlar. Yarıiletkenin yüzey tabakasından elektronlar metale geçerler ve termal denge kurulduktan sonra yük geçişi durur. Böylece her iki Fermi seviyeleri aynı hizaya gelir. Yarıiletkenin Fermi seviyesi $\Phi_m - \Phi_s$ kadar düşer (Şekil 3.1(b)) (Bozkurt, 2009).

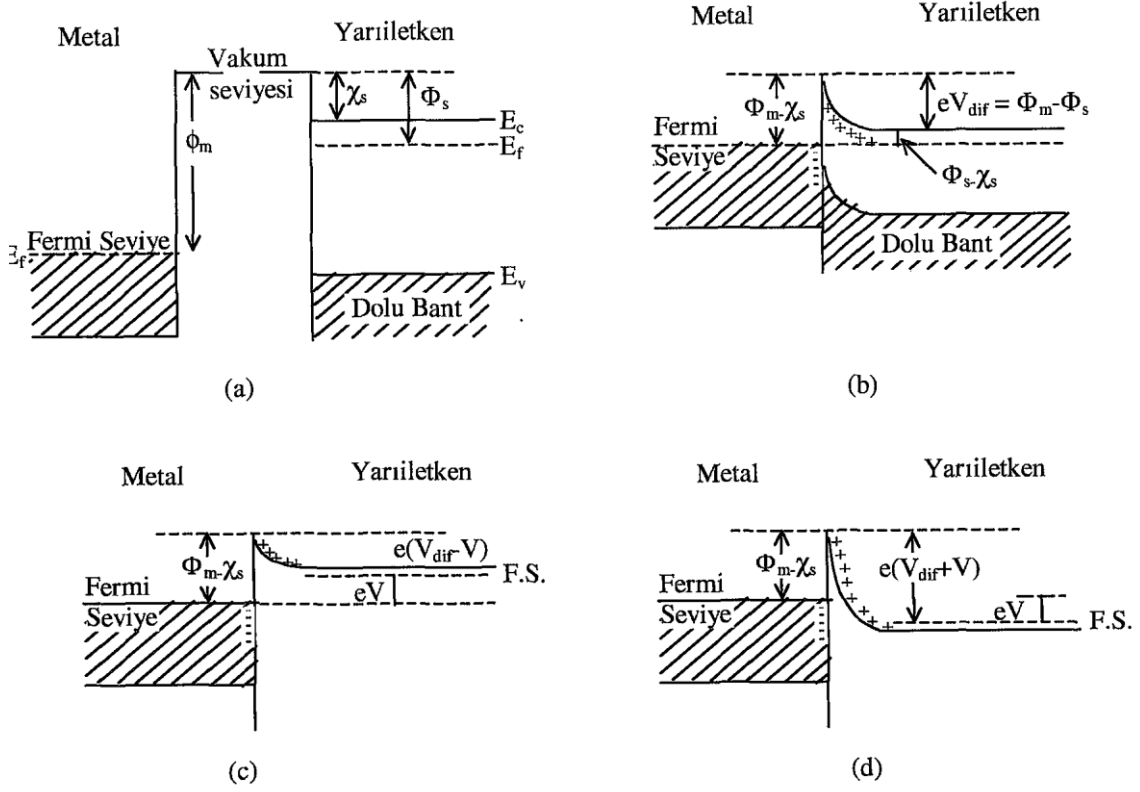
Bunun sonucunda metal tarafındaki yüzey yükleri ile yarı iletken tarafındaki uzay yüklerinin oluşturduğu dipol tabakasından dolayı, metal-yarıiletken arayüzeyinde yarıiletken enerji bantların yukarı doğru bükülmesiyle bir potansiyel engeli oluşur. Bu potansiyel engelinin yarıiletken tarafındaki yüksekliği;

$$eV_d = \Phi_m - \Phi_s \quad (3.2)$$

metal tarafındaki yüksekliği ise;

$$e\Phi_b = \Phi_m - \chi_s \quad (3.3)$$

denklemleri ile verilir.



Şekil 3.1. Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontakın enerji band diyagramları
 (a) kontak öncesi, (b) kontak sonrası termal denge,
 (c) $V < 0$ olması durumunda (düz beslem), (d) $V > 0$ olması durumunda (ters beslem).

Kontakın yarıiletken tarafındaki iyonize olmuş donörlerin neden olduğu d kalınlığında, elektronlardan arınmış bir bölge oluşur (Şekil 3.1). Bu bölgeye engel bölgesi (tabakası), uzay yükü bölgesi, geçiş bölgesi, ‘arınma bölgesi’ veya ‘Schottky bölgesi’ denir. Arınma bölgesinin elektronlardan arınmasıyla geriye kalan sabit pozitif yüklere ‘uzay yükü’ denir. Arınma bölgesinin bir tarafında pozitif uzay yükü diğer tarafında negatif yüzey yükleri olduğundan bir kondansatör gibi davranır. Bu kapasiteye Schottky kapasitesi veya arınma bölgesi kapasitesi denir. Schottky kapasitesi arınma tabakasının kalınlığı d ile ters orantılıdır. Kalınlığı iyonize olmuş donörlerin konsantrasyonuna ve difüzyon potansiyeline bağlıdır.

Termal uyarımla potansiyel engelini aşmaya yetecek enerjiye ulaşan elektronlar metalden yarıiletken ve yarıiletken metale eşit ve zıt I_0 sızıntı akımı oluştururlar. Eğer yarıiletken $(-V)$ gerilimi uygulanırsa (Şekil 3.1(c)) metalden yarıiletken geçen elektronlar için engel yüksekliği değişmez, akım da aynı kalır. Buna mukabil

yarıiletkenden metale geçen elektronlar için iletkenlik bandı eV kadar yükseleceğinden engel yüksekliği de eV kadar azalacaktır. Arınma bölgesinin kalınlığı ise;

$$d = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(V_d - V)}{eN_d}} \quad (3.4)$$

olmaktadır. ($V < 0$) Böylece, metal yarıiletken kontağına ters yönde uygulanan gerilim elektronlar için potansiyel engelini yükseltir ve arınma bölgesinin kalınlığını büyütür. Dolayısıyla metalden yarıiletken doğru akan akım $\exp(eV/kT)$ çarpanı kadar değişecektir. Oluşan net akım;

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

olur ki, akım pozitifdir. Burada I_0 doyma akımı;

$$I_0 = AR^*T^2 \left[\exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] \quad (3.6)$$

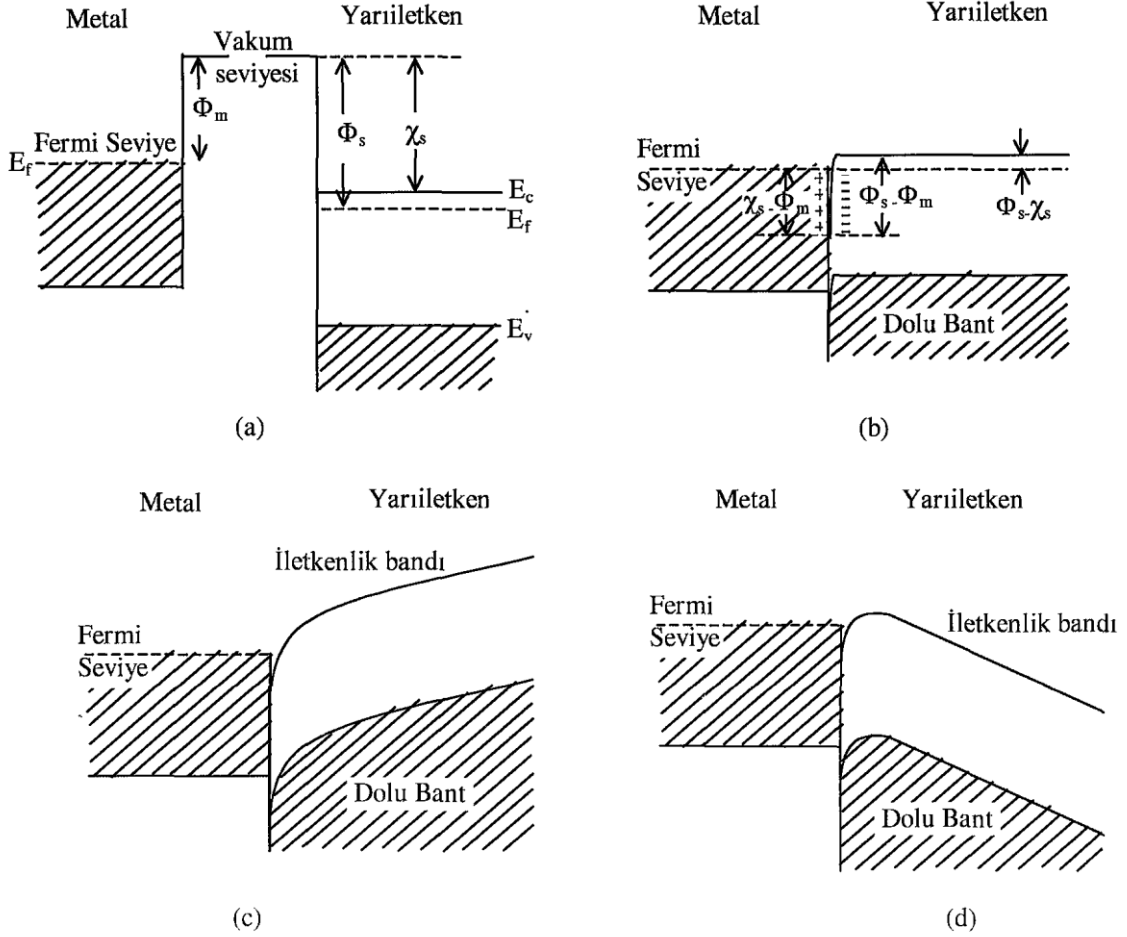
şeklindedir. A, kontağın kesit alanı (cm^2); R^* , Richardson sabiti; T, mutlak sıcaklık (K); k, Boltzman sabiti; $e\Phi_b$ engel yüksekliğidir (eV). Doğru belsem ve ters belsem tanımı 0 Volt değerine göre (kıyaslanarak; $V > 0$, $V < 0$ gibi yapılır. Yarıiletken tipine göre de değişiklik olur.

Buradan anlaşılacağı gibi yarıiletken tarafındaki potansiyel engelinin yüksekliği uygulanan voltaja bağlı olarak değişir. Metal tarafındaki engel yüksekliği voltajdan bağımsızdır.

3.1.2. Metal n-tipi yarıiletken omik kontak

Akımı her iki doğrultuda kolayca geçirebilen kontaklara omik kontak denir. Kontakta önce (Şekil 3.2(a)) yarıiletkenin fermi seviyesi metalin fermi seviyesinden $\Phi_s - \Phi_m$ kadar aşağıdadır ($\Phi_m < \Phi_s$). Kontakta sonra (Şekil 3.2(b)) elektronlar metalden yarıiletken, negatif bir yüzey yükü oluşturacak şekilde akarlar. Metal tarafında, ayrılan

elektronlardan dolayı pozitif bir yüzey yükü ve yarıiletken tarafında da bir yüzey yükü oluşur.



Şekil 3. 2. Metal n-tipi yarıiletkente omik kontakın enerji- band diyagramı,
 (a) kontak öncesi, (b) kontak sonrası (termal dengede),
 (c) $V < 0$ olması durumunda, (d) $V > 0$ olması durumunda.

Yük değiş tokuşu bittikten sonra yarıiletkenin Fermi seviyesi $\Phi_s - \Phi_m$ kadar yükselir. Böylece her iki materyalin Fermi seviyeleri termal dengeye gelir. Termal denge kurulduktan sonra kontakın her iki tarafındaki yüzey yüklerinden dolayı dipol takakası oluşur. Bu tabaka oluştuğundan sonra kontaktaki yük taşıyıcıları her doğrultuda kolayca akabilecek durumdadır.

Metal tarafına $+V$ gerilimi uygulanırsa, yarıiletkenden metale akan elektronlar için engel olmadığından kolayca hareket edebilirler (Şekil 3.2(c)). Eğer yarıiletkene $+V$

gerilimi uygulanırsa yarıiletken tarafı aşırı negatif yüklerden kaynaklanan engel yüksekliği çok az olacaktır ve elektronlar metalden yarıiletkenine doğru kolayca akacaklardır (Şekil 3.2(d)). Omik kontak durumunda elektronlar her iki yönde de hareket edebilir. Bundan dolayı omik kontaklar enjeksiyon kontakları da denir.

3.2. Metal p-Tipi Yarıiletken Kontaklar

Bu tür kontaklarda da kontağın türünü anlamak için, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına bakmak gerekir. Bu kontaklar da omik ve doğrultucu kontak olmak üzere iki türdür.

3.2.1. Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu kontak

Metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçük ise ($\Phi_m < \Phi_s$), doğrultucu kontak oluşur. Kontakta önce yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\Phi_s - \Phi_m$ kadar düşüktür. Kontakta sonra metalden yarıiletkenine Fermi seviyeleri aynı hizaya gelinceye kadar elektron akışı meydana gelir, buna bağlı olarak yarıiletkenin yüzey tabakası negatif olarak yüklenmiş olur. Bu negatif yük iyonize olmuş akseptörlerle oluşur ve bu yük d kalınlıklı bir uzay yükü tabakası boyunca dağılır. Yarıiletken gövdedeki enerji seviyeleri $\Phi_s - \Phi_m$ kadar yükseldiğinden, yarıiletken tarafındaki holler için yüzey engeli;

$$eV_d = e(\Phi_s - \Phi_m) \quad (3.7)$$

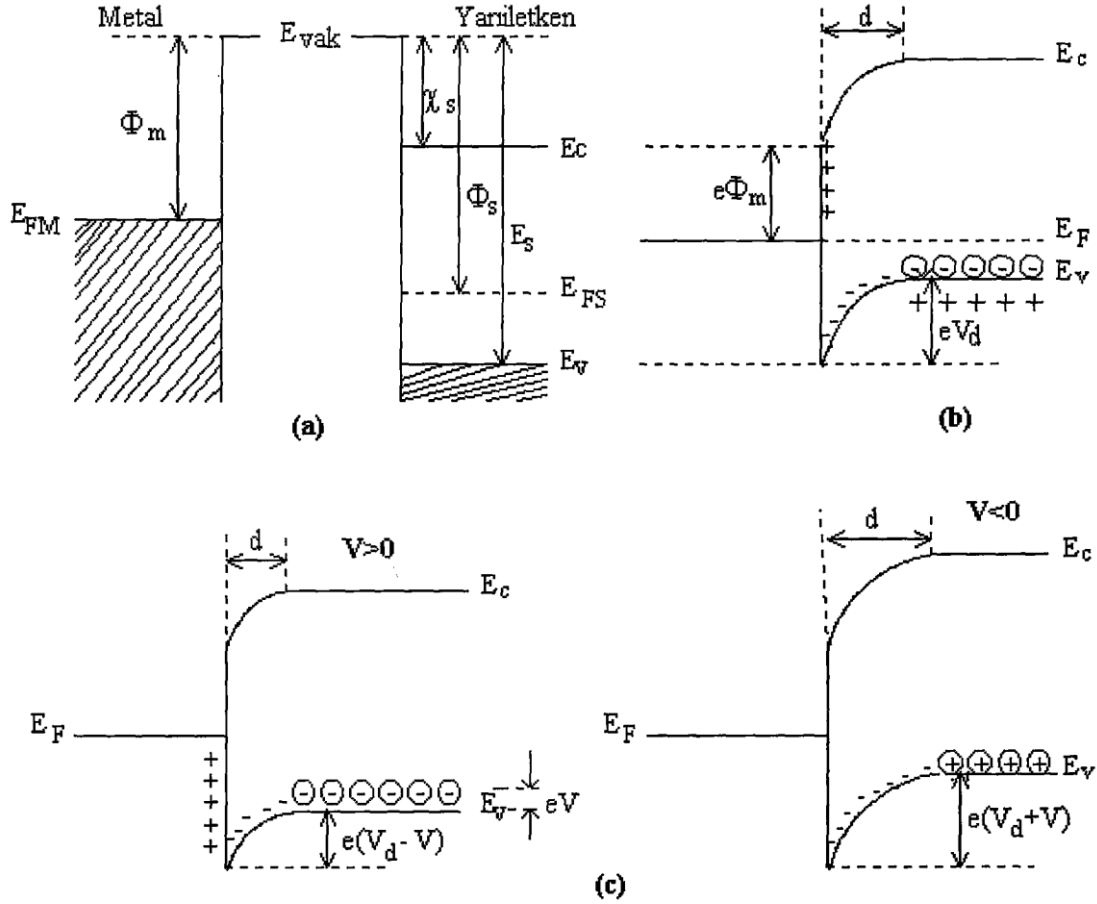
olur. Burada V_d , difüzyon potansiyelidir. Yarıiletken içerisindeki bu potansiyel, metalin yüzeyine göre alınır. Kontakta metal tarafındaki holler için engel yüksekliği;

$$e\Phi_b = e(E_s - \Phi_m) \quad (3.8)$$

burada E_s , valans bandın tepesi ile vakum seviyesinin tabanı arasındaki enerji farkıdır.

Termal uyarılmadan dolayı, yarıiletkendeki bazı holler potansiyel engelini aşacak kadar enerji kazanıp metalin içine geçebilir. Aynı şekilde metalde termal olarak

oluşan bazı holler de engeli aşacak kadar enerji kazanıp, yarıiletken içine geçebilir. Böylece kontakta engelden geçen eşit ve zıt yönlü bir sızıntı I_0 akımı oluşur.



Şekil 3.3. Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu kontakta enerji bant diyagramları
a) kontak öncesi b) kontak sonrası durum c) $V \neq 0$ durumu.

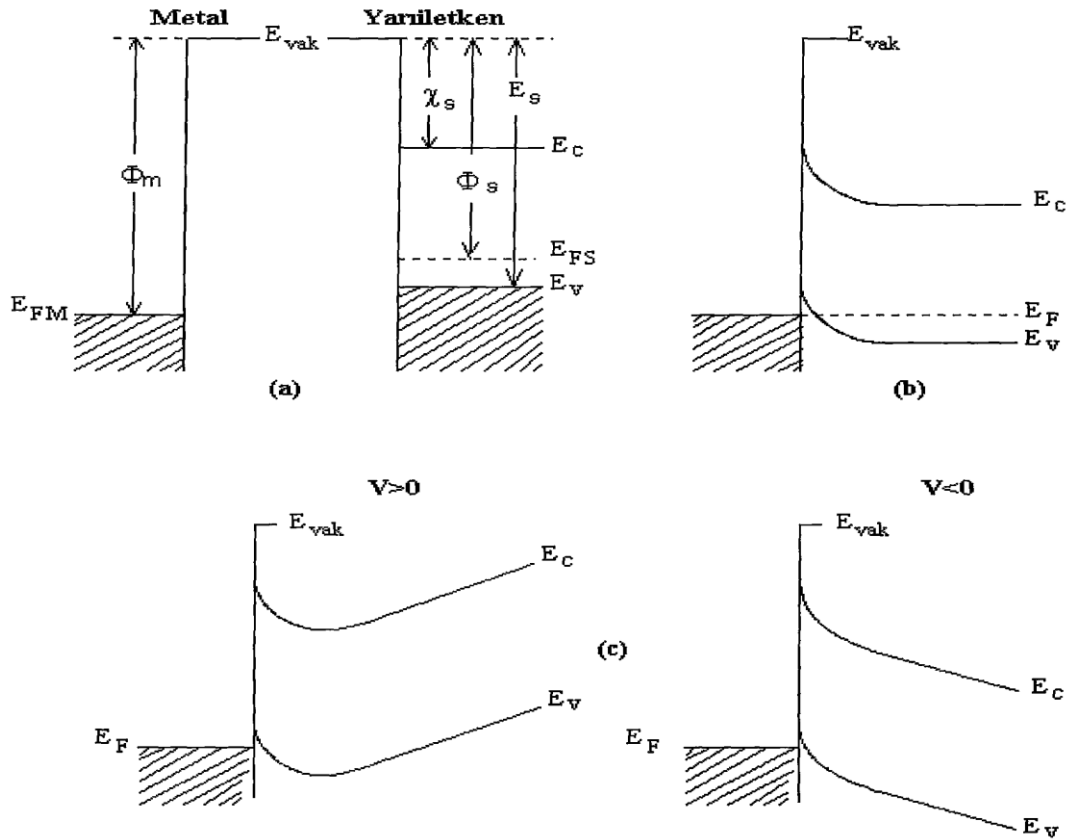
Eğer yarıiletkene bir V gerilimi uygulanırsa (Şekil 3.3(c)), soldan sağa akan hol akımı değişmez, fakat sağdan sola hol akımı $\exp(eV/kT)$ çarpanı kadar değişir. Bundan dolayı yarıiletkendeki enerji seviyelerinin tümü eV kadar düşer ve buna bağlı olarak sağdan sola geçen holler için engel yüksekliği eV kadar azalır. Sonuç olarak sağdan sola akım doğrultusu (yarıiletkenden metale geçen hollerin oluşturduğu akım) pozitif olarak kabul edilirse, karakteristik akım;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.9)$$

olarak tanımlanır. Bu bir doğrultucu kontaklıdır.

3.2.2. Metal p-tipi yarıiletken omik kontak

Metal p tipi yarıiletken kontakta $\Phi_m > \Phi_s$ olursa omik kontak oluşur. Yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\Phi_m - \Phi_s$ kadar yukardadır. Kontaklıktan sonra metal ve yarıiletkenin elektrokimyasal enerjileri (Fermi seviyeleri) aynı düzeye gelinceye kadar yarıiletken metalde elektron geçişi gerçekleşir. Denge durumunda yarıiletkenin Fermi seviyesi $\Phi_m - \Phi_s$ kadar alçalır. Yarıiletkenindeki elektronlar geride bir pozitif yüzey yüküne neden olarak metal tarafına geçerler. Buna karşılık metal tarafında da bir negatif yüzey yükü oluşur. Yarıiletken yüzeyinde hol konsantrasyonu artmasından dolayı p tipi oranı artar. Elektronlar metalden yarıiletkeni kolayca geçebilirler. Böyle her iki yönde akımın kolayca geçebildiği kontaklara omik kontak denir.



Şekil 3. 4. Metal p-tipi yarıiletken omik kontakta enerji bant diyagramları
a) kontaklıktan önce b) kontaklıktan sonraki durum c) $V \neq 0$ durumu.

3.3. Metal Yarıiletken Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları

MS ve MIS yapılarda akım iletimi genellikle çoğunluk taşıyıcılar ile gerçekleşir. Sıcaklık, arayüzey durumları seri direnç ve metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan tabaka nedeniyle akım iletim mekanizması MS ve MIS yapılarda farklılık gösterir. Bu yapılarda geçerli olabilecek akım iletim mekanizmaları şunlardır: Termiyonik emisyon (TE), Difüzyon, Termiyonik emisyon-difüzyon, Kuantum mekaniksel tünelleme, Üretilme–yeniden birleşme, Azınlık taşıyıcı konsantrasyonu ve T_0 etkili akım iletimidir.

3.3.1. Termiyonik emisyon teorisi

Termiyonik emisyon, sıcak bir yüzeyden elektron veya boşluk salınması olarak bilinir (Bethe, 1942). Metal-yarıiletken Schottky diyotlarda termiyonik emisyon teorisi, taşıyıcıların (elektron ve boşluklar) ısısal enerjileri nedeniyle, potansiyel engelini aşarak metalden yarıiletkene veya yarıiletkenden metale geçmeleri esasına dayanır. Bu olay, metal/n-tipi yarıiletken yapılarda elektronlar, metal/p-tipi yarıiletken yapılarda ise boşluklar tarafından, yani her iki yapıda da çoğunluk taşıyıcıları tarafından sağlanır (Ziel, 1968; Rhoderick ve Williams, 1988).

Bu teoriye göre;

- a) Akım termal olarak uyarılan çoğunluk taşıyıcılar ile sağlanır.
- b) Potansiyel engel yüksekliği kT/q enerjisinden çok büyüktür. ($q\Phi_b \gg kT$)
- c) Yarıiletkenden metale hareket eden serbest hollerin tüketim bölgesindeki çarpışmaları ihmal edilebilir.
- d) Görüntü (hayal) kuvvetlerin etkisi ihmal edilmektedir ve akım engel yüksekliğine zayıfça bağlıdır.

Bu varsayımlar doğrultusunda yarıiletkenden metale doğru akım yoğunluğu J_{sm} , potansiyel engelini geçmeye yetecek kadar enerjiye sahip elektronların konsantrasyonu ve bunların hızı ile ifade edilir:

$$J_{sm} = \int_{E_f + q\Phi_b}^{\infty} qv_x dn \quad (3.10)$$

Burada $E_F + q\Phi_b$ metalden TE için gerekli minimum enerji, v_x ise iletim hızıdır. dn , küçük bir enerji aralığında enerji yoğunluğudur. Bu ifadeden hareketle metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda metalden yarıiletkene geçen elektronlar için akım yoğunluğu denklemi;

$$J_{ms} = \left(\frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp\left(-\frac{q(\Phi_b)}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (3.11)$$

şeklinde verilir. Burada m^* , taşıyıcının etkin kütlesi; k Boltzmann sabiti; h , Planck sabitidir. Buradan,

$$J_{ms} = R^* T^2 \exp\left[-\frac{q\Phi_b}{kT}\right] \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (3.12)$$

ifadesi yazılır. Burada R^* , TE için Richardson sabitidir. Metalden yarıiletkene hareket eden elektronlar için engel yüksekliği aynı kaldığından metalden yarıiletkene doğru akım yoğunluğu uygulanan gerilimden etkilenmez. Bu akım yoğunluğu, dengede ($V=0$) iken, yarıiletkenden metale geçen akım yoğunluğuna eşittir. Buna göre metalden yarıiletken doğru akan akım,

$$J_{ms} = -A^* T^2 \exp\left[\frac{-q\Phi_b}{kT}\right] \quad (3.13)$$

şeklinde ifade edilir. Toplam akım yoğunluğu 3.12 ve 3.13 denklemlerinin toplamı olarak ve metalden yarıiletkene geçen akımın yönü pozitif seçilirse,

$$J_n = J_{sm} + J_{ms} \quad (3.14)$$

$$J_n = \left(A^* T^2 \exp\left[\frac{-q(\Phi_b)}{kT}\right] \right) \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (3.15)$$

şeklinde yazılır. Burada $A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_b}{kT}\right)$ terimi, sızıntı akımı olarak da adlandırılan doyum akım yoğunluğudur.

3.3.2. Difüzyon teorisi

Aralarında yük yoğunluğu farkı bulunan bölgeler arasında, yoğunluğun çok olduğu bölgeden az olduğu bölgeye doğru gerçekleşen yük geçiş olayına difüzyon denir. Schottky tarafından tanımlanan difüzyon teorisinin dayandığı varsayımlar aşağıda sıralanmıştır:

- i) Potansiyel engelin yüksekliği kT/q enerjisinden büyüktür
- ii) Tüketim bölgesindeki elektronların çarpışma etkisi ihmal edilemez.
- iii) $x=0$ ve $x=w'$ deki taşıyıcı konsantrasyonları, akımdan etkilenmemiştir (yani onlar termal denge değerine sahiptir)
- iv) Yarıiletkendeki safsızlık konsantrasyonu dejenere değildir.

Bu kabuller doğrultusunda tüketim bölgesindeki akım, bölgesel alan ve yoğunluk farkına bağlı olduğundan akım yoğunluğu denklemi kullanılır. Bu denklem metal/n-tipi yarıiletken kontaklar için,

$$J_x = J_n = q \left[n(x) \mu E(x) + D_n \frac{\partial n}{\partial x} \right] \quad (3.16)$$

$$J_x = q D n \left[\left(\frac{q n(x)}{kT} \right) \left(\frac{\partial v(x)}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial n}{\partial x} \quad (3.17)$$

şeklindedir. Burada $n(x)$ elektron yoğunluğu μ elektron mobilitesi, D_n elektron difüzyon sabiti ve $E(x)$ Schottky bölgesindeki elektrik alanıdır. Buna göre difüzyon kuramında akım ifadesi,

$$J_x = J_{SD} \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (3.18)$$

Difüzyon teorisindeki doyma akım yoğunluğu (J_{SD}) , gerilim ile çok daha hızlı değişir fakat TE doyum akım yoğunluğuna göre sıcaklığa daha az bağlıdır.

3.3.3. Termiyonik emisyon - difüzyon teorisi

Crowell ve Sze (1966), TE ve difüzyon teorisini birleştirerek termiyonik emisyon difüzyon teorisini geliştirdiler. Teori MS arayüzey kenarında tanımlanmış olan v_r rekombinasyon hızı üzerine kurulmuştur. Metal ile yarıiletken gövde arasına uygulanan gerilim, metale doğru bir elektron akısına neden olur. Taşıyıcıların bir kısmı optik fonon geri saçılmalarına bir kısmı da kuantum mekaniksel yansımalara uğradığından akım değeri azalır. Sze (1981), bunun nedenini rekombinasyon hızındaki azalmaya bağlamıştır. Termiyonik emisyon-difüzyon teorisine göre elektronlar MS arayüzeyinde optik fononlarla etkileşmeksizin potansiyel engel üzerinden salınma olasılığı ve ortalama iletim katsayısı değeri göz önüne alınarak R^* Richardson sabiti, R^{**} olarak değişir. Buna göre en genel akım-gerilim (I - V) ifadesi:

$$J = J_0 \left(\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right) \quad (3.19)$$

ile verilir. Burada T sıcaklık, n diyotun idealite faktörü ve J_0 doyma akım yoğunluğu olup,

$$J_0 = -R^{**}T^2 \exp \left(\frac{-q\Phi_b}{kT} \right) \quad (3.20)$$

şeklinde ifade edilir. R^{**} , düzenlenmiş etkin Richardson sabitidir. β , engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişim katsayısı olmak üzere,

$$R^{**} = R^* \exp \left(\frac{\beta}{kT} \right) \quad (3.21)$$

ile verilir. Termiyonik emisyon teorisine göre ideal bir Schottky diyotda $n = 1$ 'dir. İdeal diyottan sapmaları belirlemek amacıyla bir idealite faktörü, n tanımlanır. Buna göre akım yoğunluğu ifadesi,

$$J = J_0 \exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) \quad (3.22)$$

şeklini alır. Burada n idealite faktörü 1'den uzaklaştıkça engel yüksekliğinin voltaja bağlılığı artmaktadır. İdealite faktörü yarıiletken ile dengede arayüzey durumları (N_{ss}) ve metal yarıiletken arasındaki yalıtkan oksit tabakasının kalınlığı (δ) cinsinden,

$$n = 1 + \frac{\delta}{\epsilon_i} \left[\frac{\epsilon_s}{L_w} + qN_{ss} \right] \quad (3.23)$$

olarak ifade edilir. Bu denklemde ikinci terimin artması ile ideallikten uzaklaşılır. Yani idealite faktörü, hem yalıtkan tabaka kalınlığının artmasıyla hem de arayüzey durumlarının artması ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Engel alçalması ve R^{**} 'nin alana bağımlı olması nedeniyle ideal Schottky diyotlarında n idealite faktörü $1 < n < 1,2$ arasında değer alır.

3.3.4. T_0 etkili akım iletimi

İdealite faktörü 1'den büyük olması hayali kuvvet ya da arayüzey durumlarından ortaya çıkıyorsa n sıcaklıktan bağımsız olmalıdır, fakat idealite faktörünün 1'den büyük olması termoiyonik alan emisyonundan veya tüketim bölgesindeki rekombinasyon akımlarından etkileniyorsa, idealite faktörü n sıcaklığa bağlıdır. T_0 etkili akım yoğunluğu karakteristiği,

$$J = R^{**} T^2 \exp \left[-\frac{q\Phi_b}{k(T+T_0)} \right] \left\{ \exp \left[\frac{qV}{k(T+T_0)} \right] - 1 \right\} \quad (3.24)$$

şeklinde ifade edilir. Burada T_0 geniş bir sıcaklık aralığında sıcaklık ve voltajdan bağımsız olan sabit bir parametredir. n 'nin sıcaklığa bağlılığı deneysel olarak

$$n = 1 + \frac{T_0}{T} \quad (3.25)$$

olarak ifade edilir.

3.4. Akım Voltaj Verilerinden Kontak Parametrelerinin Elde Edilmesi

Termiyonik emisyon için akım gerilim ifadesi

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{eV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (3.25)$$

dır. Burada

$$I_0 = AR^*T^2 \exp \left(-\frac{e\Phi_b}{kT} \right) \quad (3.26)$$

ile verilir. Bu durum ideal Schottky diyotları için geçerlidir. Arayüzey tabakalı durumda uygulanan gerilimin tümü tüketim bölgesi boyunca düşmeyeceğinden, burada bir n idealite faktörü tanımlamalıyız bu faktör diyodun ideal oluşunun bir ölçüsüdür. Böylece karakteristik akım için,

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{eV}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (3.27)$$

şekline dönüşür. İdealite faktörü her zaman birden büyüktür. Ayrıca uygulanan gerilimin yüksek değerlerinde, akım gerilim karakteristiğinde bükülmeye sebep olan bir etken vardır. Bu seri dirençtir ve R_s ile gösterilir. Seri direncin de hesaba katılmasıyla karakteristik akım,

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{e(V - IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (3.28)$$

şeklini alır. I_0 doyma akımı, yarı logaritmik akım gerilim grafiğinin doğru beslem tarafındaki lineer kısmının $V=0$ noktasına doğru ekstrapolasyonu ile elde edilir. $V > 3kT/e$ için 1 ihmal edilirse ve R_s göz ardı edilirse, idealite faktörü yine bu grafiğin lineer kısmının eğiminden bulunur. Yani,

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (3.29)$$

denklemleri ile idealite faktörü bulunur.

Ayrıca R_s , Φ_b , n gibi kontak parametrelerinin bulunabilmesi için birçok yöntem ortaya konmuştur. Bunlardan en bilineni Cheung (1986) tarafından türetilen Cheung fonksiyonlarıdır. Bu fonksiyonları elde etmek için ilk önce I_0 ' ın değeri yerine yazılarak denklem (3.27)' nin her iki tarafının doğal logaritması alındığında,

$$\ln I = \ln(AR^*T^2) - \frac{e\Phi_b}{kT} + \frac{eV}{nkT} - \frac{eIR_s}{nkT} \quad (3.30)$$

elde edilir ve buradan V ifadesi için,

$$V = \frac{nkT}{e} \ln\left(\frac{I}{AR^*T^2}\right) + n\Phi_b + IR_s \quad (3.31)$$

elde edilir. Bu denklemin her iki tarafın $\ln I$ ' ya göre türevi alınırsa,

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (3.32)$$

Birinci Cheung fonksiyonu elde edilmiş olur. Denklem 3.32' den görüleceği gibi, $dV/d(\ln I)$ 'nin I 'ya göre grafiği lineerdir. Grafiğin eğimi R_s 'yi verir. Aynı grafiğin, $I=0$ için $dV/d(\ln I)$ eksenini kestiği noktadan n idealite faktörü bulunabilir. Yani,

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \bigg|_{I=0} \quad (3.33)$$

dir. Diğer parametreleri bulabilmek için Denklem 3.31' de bir düzenleme yapılırsa,

$$V - \frac{nkT}{e} \ln\left(\frac{I}{AR^*T^2}\right) = n\Phi_b + IR_s \quad (3.34)$$

burada denklemin her iki tarafı $H(I)$ 'ya eşitlenmesiyle aşağıdaki iki denklem elde edilir;

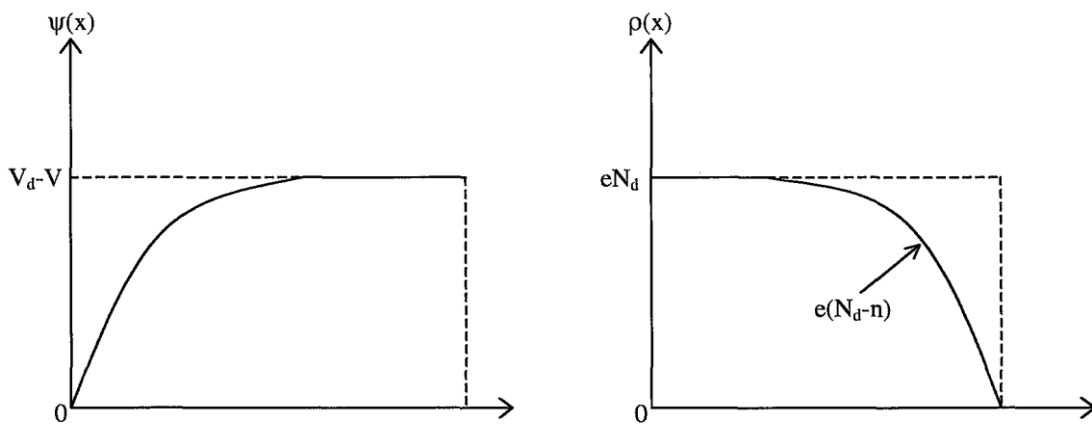
$$H(I) = V - \frac{nkT}{e} \ln\left(\frac{I}{AR^*T^2}\right) \quad (3.35)$$

$$H(I) = n\Phi_b + IR_s \quad (3.36)$$

Denklem (3.33)' ten elde edilen n değeri, Denklem (3.35)' deki $H(I)$ denkleminde yerine yazılır. Buradan $H(I)$ 'nın I ya grafiği çizilir. Bu grafik lineerdir. Denklem (3.36)' dan görüleceği gibi grafiğin eğimi R_s ' yi, $I=0$ için $H(I)$ eksenini kestiği nokta ise $n\Phi_b$ yi verir. n değeri bilindiği için buradan engel yüksekliği Φ_b elde edilir. Denklem 3.35 ve 3.36 ikinci Cheing fonksiyonlarıdır.

3.5. Metal Yarıiletken Kontaklarda Schottky Kapasitesi

Metal yarıiletken kontaklarda arınma bölgesi, yarıiletken tarafındaki uzay yükleri (n tipi için iyonize olmuş donörler; p tipi için iyonize olmuş akseptörler) ve metal tarafındaki negatif yüzey yüklerinden dolayı bir kondansatör gibi davranır. Ters beslemde gerilim artarsa yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar metalden uzaklaşırlar ve buna bağlı olarak gerilim artmasından dolayı arınma bölgesinin genişliği artar. Arınma bölgesindeki yük değişir. Tüketim bölgesindeki bu yük değişimi sığa değişimine sebep olur (Rhoderick ve Williams, 1988; Ziel, 1968). Bu nedenden dolayı bu diyotlar kondansatör olarakta kullanılırlar. Kontakın yarıiletken tarafında metale yakın önemli bir hol yoğunluğu mevcutsa, yeni Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesi ile çakışacağından hol yoğunluğu düşecektir.



Şekil 3. 5. Metal n -tipi yarıiletken doğrultucu kontakta
a) potansiyel dağılımı b) Yük dağılımı

Ters beslem altındaki kontak sığasında diyot parametreleri ile ilgili önemli bilgiler elde edilebilir. Metal yarıiletken kontağın potansiyel dağılımı ve yük yoğunluğu arasındaki ilişki Poisson eşitliği ile verilir (Ziel, 1968):

$$\nabla^2 \psi(x) = \frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (3.37)$$

Bu denklemde ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti, $\rho(x)$ konuma bağlı uzay yük yoğunluğudur. N_d yarıiletkenin donör yoğunluğu, n metalin iletkenlik bandındaki elektron yoğunluğu olmak üzere; $\rho(x)$ uzay yük yoğunluğu;

$$\rho(x) = e(N_d - n) \quad (3.38)$$

şeklinde ifade edilir. Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın $\psi(x)$ yüzey potansiyel fonksiyonu ile $\rho(x)$ uzay yükü yoğunluğunun konuma bağlı değişimleri Şekil (3.5)' te verilmiştir.

Engel tabakasının difüzyon potansiyeli V_d ile, kontağa uygulanan potansiyel V ile gösterilir; $e(V_d - V) \gg kT$ olduğundan $0 \leq x \leq d$ aralığında $N_d \gg n$ olur. Bu nedenle

$$\rho(x) \cong eN_d \quad (3.39)$$

ifadesi yazılabilir. (3.38) ve (3.39) denklemleri poisson denkleminde kullanılırsa

$$\frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} = -\frac{eN_d}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (3.40)$$

şeklinde elde edilir. Denklem (3.40) sınır şartları altında çözülürse potansiyel dağılımını bulunabilir. Sınır şartları:

- 1) $x = 0$ da $\psi(x) = 0$
- 2) $0 \leq x \leq d$ $\psi(x) = V_d \pm V$

$$3) \quad x = d \text{ de } \quad \frac{d\psi(x)}{dx} = 0$$

Üçüncü sınır şartı göz önünde alınarak Denklem (3.40)' ın integrali alınırsa kontak bölgesindeki elektrik alanı elde edilir.

$$E(x) = \frac{d\psi(x)}{dx} = -\frac{eN_d}{\varepsilon_s \varepsilon_0} (x - d) \quad (3.41)$$

Bu ifadenin birinci sınır şartı altında integralini alınırsa potansiyel dağılım fonksiyonunu bulunur:

$$E(x) = -\frac{eN_d}{\varepsilon_s \varepsilon_0} \left(\frac{1}{2} x^2 - dx \right) \quad (3.42)$$

Bu denklemi de ikinci sınır şartı altında çözülürse Schottky tabakasının genişliği (d) bulunur:

$$d = \left[\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0}{eN_d} (V_d \pm V) \right] \quad (3.43)$$

Bu denklemde V_d sıfır gerilim altında difüzyon potansiyelidir. Yarıiletken tarafına pozitif gerilim uygulandığında kontak ters beslemmedir. Yarıiletkende birim alan başına düşen yük yoğunluğu;

$$Q = eN_d d = [2\varepsilon_s \varepsilon_0 eN_d (V_d \pm V)]^{1/2} \quad (3.44)$$

eşitliği ile ifade edilir. Birim alan başına küçük sinyal kapasitesi uygulanan voltaja göre yük değişimi olarak tanımlanır.

$$C = \frac{dQ}{dV} = \left[\frac{\varepsilon_s \varepsilon_0 eN_d}{2(V_d \pm V)} \right]^{1/2} = \frac{\varepsilon_s \varepsilon_0}{d} \quad (3.45)$$

Bu ifadeden; C 'nin V ile ters, N_d ile doğru orantılı olduğu görülür. Uygulanan voltaj(V) artırıldığında; kapasite (C) azalır. Schottky tabakasının genişliği (d) artar. Donor

yoğunluğu (N_d) artarsa, kapasite artar, buna bağlı olarak Schottky tabakasının genişliği (d) azalır. Denklem 3.41' den;

$$C^{-2} = \frac{2(V_d + V)}{\epsilon_s \epsilon_0 e N_d} \quad (3.46)$$

olarak yazılabilir. Bu ifadeden anlaşılabacağı üzere $C^{-2} - V$ grafiği bir doğru verir. Bu doğrunun eğiminden,

$$N_d = \frac{2}{e \epsilon_s \epsilon_0} \cdot \frac{dV}{d(C^{-2})} \quad (3.47)$$

elde edilir. Doğrunun yatay eksenini kestiği noktadan ise V_d (difüzyon potansiyeli) bulunur.

3.6. Schottky Diyotlarının Kapasitansı

Metal/n-tipi yarıiletken ($\Phi_m > \Phi_s$) ve metal/p-tipi yarıiletken ($\Phi_s > \Phi_m$) doğrultucu kontaklarında, yük taşıyıcıları konsantrasyonlarının metal ve yarıiletken arasında yeniden dağılımı neticesinde, yarıiletkenin sınır bölgesinde elektronlardan (n-tipi baz için) veya deliklerden (p-tipi baz için) arınma ve yüksek dirence sahip tabaka meydana gelmektedir. Bu bölgenin kalınlığı (L_0) dışarıdan uygulanan gerilimle değişmektedir. Bu tür metal yarıiletken kontağın (veya Schottky diyotun) yapısı kondansatörün yapısına benzer. Metal-arınma bölgesi-yarıiletken sistemi, iki iyi iletkenin (metal-yarıiletken) arasındaki yüksek dirençli tabakadan oluşmaktadır. Bu tabakanın direnci, yarıiletkenin iç bölgesinin direncinden çok büyüktür. Bilinen kondansatörlerle karşılaştırıldığında, Schottky diyotundaki arınma tabakası, kondansatörün metalik elektrotları arasındaki yalıtkan tabakaya benzer.

Schottky diyota dışarıdan gerilim uygulandığında, devrede ilk anda oluşan akımın etkisiyle, uzay bölgesinin sınırlarındaki elektrik yükleri değişmektedir. Buradaki olaylar kondansatördeki olaylara benzer. Schottky diyotunun sığası, uzay yükü bölgedeki potansiyel engel yüksekliğinin değişimine bağlıdır, bu nedenle diyotun sığası engel sığası olarak adlandırılır. Diferansiyel engel sığası şu şekilde verilir,

$$C = \frac{dQ}{dV} \quad (3.48)$$

burada dQ engel bölgesindeki yük değişimi, dV uygulanan gerilimin değişimidir. Diyotun engel sığası, zamanla değişen gerilim uygulandığında kendini göstermektedir. Bu durumda kontakta akım geçmektedir. Kontaktaki yük taşıyıcıların hareketine bağlı olmayan akım, engel sığasını belirlemektedir.

Schottky diyotun arınma bölgesinin elektrik alanı (E) veya potansiyelinin koordinatla dağılımını bulmak için Poisson denklemini çözmek gerekir.

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon \epsilon_0} \quad (3.49)$$

E , elektrik alan şiddeti, $\rho(x)$, maddenin hacimsel yük yoğunluğu, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti, ϵ maddenin bağıl dielektrik sabitidir. Metal/n-tipi yarıiletken kontak için, tüm kontak potansiyel farkı n tipi yarıiletkende oluşur. Elektrik alan şiddeti ve elektrostatik potansiyel arasındaki bağıntı,

$$E = -\frac{d\phi}{dx} \quad (3.50)$$

şeklindedir; burada $d\phi$, elektrostatik potansiyedir.

$$\rho(x) = en(x) \quad (3.51)$$

$n(x)$, n tipi yarıiletkenlerde mesafeye bağlı elektron konsantrasyonu, e ; elektron yüküdür. Verilen değerleri Denklem 3.48' de yerine yazılırsa,

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon \epsilon_0} \quad (3.52)$$

$$\frac{d}{dx} \left(-\frac{d\phi}{dx} \right) = \frac{en(x)}{\epsilon \epsilon_0} \quad (3.53)$$

$$-\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{en_{(x)}}{\varepsilon\varepsilon_{(x)}} \quad (3.54)$$

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} + \frac{en(x)}{\varepsilon\varepsilon_0} = 0 \quad (3.55)$$

Denklem (3.55), 2. dereceden bir diferansiyel denklemdir, genel çözümü;

$$\varphi_{(x)} = \frac{en_{(x)}}{2\varepsilon\varepsilon_0} (L_0 - x)^2 + A(L_0 - x) + B \quad (3.56)$$

şeklindedir. L_0 : kontak bölgesindeki elektrik alanının yarıiletkende yayılma derinliğidir. Denklem 3.56, sınır şartlarına uymaktadır.

$$\varphi(L_0) = 0 \quad (3.57)$$

$$E(L_0) = -\frac{d\varphi}{dx}\Big|_{x=L_0} = 0 \quad (3.58)$$

(3.58) sınır şartları (3.56) denkleminde yerine yazılırsa

$$\varphi_{(L_0)} = \frac{en_{(x)}}{2\varepsilon\varepsilon_0} (L_0 - L_0)^2 + A(L_0 - L_0) + B \quad (3.59)$$

$$\varphi(L_0) = 0 = B \quad (3.60)$$

$$E_{(0)} = E_0 = -\frac{d\varphi}{dx}\Big|_{x=0} = \left[-\frac{2en_{(x)}}{2\varepsilon\varepsilon_0} (L_0 - x)(-1) + A(-1) \right] \quad (3.61)$$

$$E_0 = -\frac{en}{\varepsilon\varepsilon_0} (L_0 - x) + A \quad (3.62)$$

$$E_{(L_0)} = - \frac{d\varphi}{dx|_{x=L_0}} \quad (3.63)$$

$$0 = - \left[- \frac{2en_{(x)}}{2\epsilon\epsilon_0} (L_0 - x)(-1) + A(-1) \right] \quad (3.64)$$

$$0 = - \frac{en}{\epsilon\epsilon_0} (L_0 - x) - A \quad (3.65)$$

$X=L_0$; burada $x=L_0$ ’ da $A=0$ olur.

$$\varphi_{(x)} = - \frac{en_{(x)}}{2\epsilon\epsilon_0} (L_0 - x)^2 + A(L_0 - x) \quad (3.66)$$

$$\varphi_{(x)} = - \frac{en_{(x)}}{2\epsilon\epsilon_0} (L_0 - x)^2 \quad (3.67)$$

Yarıiletkende elektrik alanın yayılma derinliği L_0 ’ ı bulmak için, arınma bölgesinin sınırında ($x=0$) oluşan potansiyelin ifadesini kullanmak gerekir.

Burada; $x_0=0$ ise, $\varphi_0 = - \frac{en}{2\epsilon\epsilon_0} L_0^2$

φ_0 ve φ_k zıt taraflardan başlayıp sonlanıyor. Dolayısıyla $\varphi_0 = - \varphi_k$

$$\frac{\phi_k}{e} = \frac{\phi_m - \varphi_s}{e}$$

$$\varphi_0 = \frac{\phi_m - \varphi_s}{e} \text{ olur.}$$

$$- \frac{en}{2\epsilon\epsilon_0} L_0^2 = - \frac{\phi_m - \varphi_s}{e} \quad (3.68)$$

$$L_0 = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(\varphi_m - \varphi_s)}{e.n.e}}. \quad (3.69)$$

Yada

$$L_0 = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0\varphi_k}{e.n.}}. \quad (3.70)$$

Schottky kontağını paralel plakalı kondansatör olarak alırsak, sığası;

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0.S}{L_0} \quad (3.71)$$

olur. S, diyetun kesit alanıdır.

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0.S}{\left[\frac{2\epsilon\epsilon_0\varphi_k}{en}\right]^{1/2}}$$

$$C = \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0.en}{2\varphi_k}} S \quad (3.72)$$

3.7. Schottky Diyotlarının Kapasite-Voltaj Karakteristikleri

Scottky diyetuna dışarıdan gerilim uygulandığında, kontağın hacimsel yük bölgesinin kalınlığı değişmektedir. Diyet doğru yönde kutuplanırsa geçiş bölgesinin kalınlığı ve direnci azalır. Ters yönde uygulanan gerilim, geçiş bölgesinin kalınlığını ve direncini büyötmektedir. Böylece Schottky diyetuna uygulanan gerilimin etkisiyle, geçiş bölgesindeki hacimsel yük değişir.

Genellikle Schottky diyetların, p-n eklemlerin ve heteroeiklemlerin sığası iki bileşenden oluşmaktadır: engel sığası ve difüzyon sığası.

Kontağın ve eklemlerin engel sığası, geçiş bölgesindeki yük taşıyıcılarının yeniden dağılımına bağılıdır. Difüzyon sığası ise, yarıiletkenin baz bölgesindeki yüklerin yeniden dağılımı ile belirlenmektedir.

Schottky diyetlarının difüzyon sığası yoktur, onların karakteristikleri yalnızca engel sığası ile belirlenmektedir. Bu nedenle Schottky diyetların çalışma hızı çok

yüksektir. p-n eklemlerin hem engel sığası hem de difüzyon sığası vardır. Potansiyel fark uygulandığında geçiş bölgesine düşen potansiyel,

$$\varphi = \varphi_k - V \quad (3.73)$$

ile verilir.

$$C = \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 e n}{2(\varphi_k - V)}} \cdot S \quad (3.74)$$

V: + ise doğru beslem, V : - ise ters beslem olur. Görüldüğü gibi doğru beslemde C artar, ters beslemde C azalır. Uygulanan gerilimin işaret ve miktarına göre Schottky diyotun sığası değişir.

3.8. Metal - Yarıiletken Schottky Diyotlarda Arayüzey Tabakasının Etkileri

Schottky–Mott teorisine göre Schottky diyotlarda engel yüksekliği metalle yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farka eşittir, yani engel yüksekliği metalin iş fonksiyonuna çok sıkı bir şekilde bağlıdır. Fakat yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar, engel yüksekliğinin metalin iş fonksiyonundan bağımsız olduğunu göstermiştir. N-tipi bir yarıiletken ile doğrultucu kontak haline getirilen bir metalin p tipi için omik kontak oluşturması gerekirken doğrultucu kontakta oluşturabileceği bulundu. Yarıiletken üzerindeki yüzey halleri cinsinden bunu açıkladı. Bu yüzey halleri yarıiletkenin içini metalden perdeler ve difüzyon potansiyelinin ve dolayısıyla engel yüksekliğinin gerçek değerinden farklı olmasına sebep olurlar. Yine Bardeen modeli, metal ile yarıiletken arasında bir yalıtkan tabakanın varlığını da kabul eder (Card ve ark., 1973).

Arayüzey halleri, tahmin edilen ve gözlenen Schottky engel yüksekliklerinin arasındaki farktan dolayı hesaba katılır. Bu arayüzey (yüzey) hallerini dört kısma ayırabiliriz.

i) Metal ile kontakta önce yarıiletken ve vakum seviyeleri arayüzeyinde mevcut olan asal yüzey halleri, bunlar genel olarak yarıiletken kristalin periyodik yapısının yüzeyde kesilmesinden ortaya çıkarlar (Crowel ve Sze, 1965).

ii) Metal ile kontakta sonra ortaya çıkan asal olmayan (extrinsic) yüzey halleri; bunlar yarıiletkenin yüzeyinde yığılmış olan yabancı atomların varlığından veya metalin yeteri kadar temiz olmayışından dolayı oluşan yüzey halleridir.

iii) Hem yarıiletkenin yüzeyinde hem de yarıiletkenin gövdesinde bulunan kusurlar (defects) ve kirlerden ortaya çıkan asal olmayan yüzey halleri, bu haller metal buharlaştırıldığında yarıiletkenin ince bir tabakasıyla (arayüzey tabakası) metalden ayrılırlar. Bu durumda, bu hallerin dengede olduğu söylenir.

iv) Arayüzey kimyasal reaksiyonlarından ortaya çıkan arayüzey halleri veya metalle uyarılan yüzey halleri. Bazı metaller temiz yarıiletkenin yüzeyine buharlaştırıldıklarında metal ile yarıiletken arasında kuvvetli bir kimyasal reaksiyon meydana gelir. Bu reaksiyondan dolayı arayüzeyde arayüzey tabakası olarak kabul edilen yeni bir bileşik ve dolayısıyla yeni arayüzey halleri ortaya çıkmış olur. Metalle uyarılan veya metalle sebep olunan haller (metal-induced gap states- MIGS), metalden yarıiletkenine yük transferiyle ortaya çıkan hallerdir. Bir metal bir yarıiletkenin yüzeyine temas ettirildiğinde (kontak haline getirildiğinde) MIGS'ler yarıiletkenin yüzeyindeki asal yüzey hallerinin yerine geçebilirler.

Deneyisel olarak bu dört tipin varlığı gösterilmiştir. Teorik hesaplamalarda bu arayüzeylerin yapısı ve özellikleri ciddi bir şekilde tartışılmıştır. Bu dört tip arayüzey hallerini Schottky diyot karakteristiklerinin beklenilenden farklı çıkmasına sebep oldukları hem deneyisel hem de teorik olarak gösterilmiştir. Bunlara ilave olarak, metalle yarıiletken arasındaki ince oksit tabakası bant yapısı karakterine sahip değildir ve metal-yarıiletken kontaklardaki etkisi aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1) Bu tabakadaki potansiyel değişmesinden dolayı termal dengedeki sıfır beslem engel yüksekliği ideal bir Schottky diyotunun engel yüksekliğinden daha düşük olacaktır.

2) Elektronlar, bu tabakadan dolayı oluşan engelin içinden geçerler (tünelleme) ve bu durum Schottky parametrelerinin beklenilenden farklı çıkmasına neden olur.

3) Bir gerilim uygulandığında, bu gerilimin bir kısmı arayüzey tabakası boyunca düşeceğinden engel yüksekliği uygulanan geriliminin bir fonksiyonu olur. Engel yüksekliğinin bu beslem bağımlılığı, I - V karakteristiklerinin biçiminin değişmesine

sebepler. Bu durum ideallikten sapma olarak tanımlanır ve idealite faktörü olan n cinsinden ifade edilir. Ayrıca, arayüzey tabakası ve arayüzey hallerinin Schottky diyot kapasitesine etki ve katkılarına aşağıdaki gibi söz edilebilir.

20 Å' dan daha küçük kalınlıklı arayüzey tabakası için arayüzey halleri metalle, 20 Å' dan daha büyük kalınlıklı arayüzey tabakası için arayüzey halleri yarıiletkenle dengededir. Arayüzey halleri, yüksek frekanslarda ($f > \text{MHz}$) AC sinyaline cevap veremediğinden engel kapasitesine katkıda bulunamazlar. Bundan dolayı, arayüzey hal yoğunluğu beslemeyle değişmez ve sabit kalır (Bozkurt, 2009).

4. DENEY DÜZENEGİ VE ÖLÇÜMLER

Bu bölüm Sn/p-Si/Al ve $\text{Sn/metil moru/p-Si/Al}$ Schottky diyotlarının yapımı için izlenen yöntemleri içerir. Bu çalışmada kullanılan kontaklar, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fizik Bölümü Yarı İletken Üretim ve Karakterizasyon Laboratuvarı'nda bulunan vakum kaplama sistemi (Şekil (4.1)) ve spin kaplama ünitesi kullanılarak üretilmiştir. Üretilen kontaklardan ölçümler sonucu elde edilen diyot parametreleri (idealite faktörü, engel yüksekliği, seri direnç) ve karakteristikleri bu bölümde yer almaktadır.



Şekil 4. 1. Deneylerde kullanılan vakum kaplama sistemi.

4.1. Numunelerin Hazırlanması ve Temizlenmesi

Bu çalışmada [100] doğrultusunda büyütülmüş, öz direnci $\rho=12-16 \Omega.cm$ olan Bor (B) katkılı p-tipi silisyum (p-Si) kullanılmıştır. Diyot yapımında iyi sonuçların alınabilmesi için, kullanılacak numunenin yüzeyinin organik ve mekanik kirlerden temizlenmesi için aşağıdaki işlemler sırasıyla yapılmıştır:

- 1) Aseton' da ultrasonik olarak 10 dk. yıkanır.
- 2) Metanol' da ultrasonik olarak 10 dk. yıkanır.
- 3) Deiyonize su ile iyice yıkanır.
- 4) RCA1 (H_2O , H_2O_2 , NH_3 ; 6:1:1) de $60^\circ C$ ' de 10 dk. yıkanır.
- 5) Seyreltik HF (H_2O , HF; 10:1) ile 30 sn. yıkanır.
- 6) RCA2 (H_2O , H_2O_2 , HCl; 6:1:1) de $60^\circ C$ ' de 10 dk. yıkanır.
- 7) Deiyonize su ile iyice yıkanır.
- 8) Seyreltik HF (H_2O , HF; 10:1) ile 30 sn. yıkanır.
- 9) 15-20 dk. akan deiyonize su ile iyice yıkanır.
- 10) Azot (N_2) gazı ile kurutulur.

Ayrıca buharlaştırmada kullanılan metaller, metanol ve % 10 seyreltik hidroklorik asit (HCl) çözeltisinde ve deiyonize su ile iyice yıkandı.

4.2. Schottky Diyotların Yapılması

Numunenin önce mat tarafına omik kontak yapıldı. Bunun için önce ısıtıcı pota % 10 seyreltik HCl ile yıkanıp, deiyonize su ile yıkanıp kurutuldu ve sonra vakum cihazındaki yerine yerleştirilerek yakılıp hazır hale getirildi. Sonra numuneler kimyasal olarak temizlendikten sonra daha önce çalıştırılarak hazır hale getirilen vakum cihazında mat yüzü aşağı bakacak şekilde yerleştirildi. Vakum işlemi sonucunda basınç 10^{-5} torr değerine ulaşınca ısıtıcı pota içine yerleştirilmiş % 99.98 saflıktaki alüminyum (Al) metali buharlaştırıldı. Kısa bir süre bekledikten sonra ters işlem yaparak vakum cihazının içine hava girişi sağlandı. Numune vakum cihazından çıkartılarak daha önce kimyasal olarak temizlenmiş kuartz potanın içine yerleştirilerek, yine yakılarak temizlenmiş $580^\circ C$ deki fırında 3 dk. Azot gazı ortamında tavlama işlemi yapıldı (Temirci, 2000). Tavlama işlemi yapılan fırın Şekil (4.2)' de gösterilmiştir. Böylece

omik kontak işlemi tamamlanmış oldu. Bu aşamadan sonra numune iki eşit parçaya kesildi. Bir parçası referans numune olmak üzere hemen Schottky kontak yapıldı. Bu işlem için daha önce kimyasal olarak temizlenen ve sadece kalay (Sn) metali buharlaştırma için kullanılan ısıtıcı potaya % 99.98 saflıktaki Sn metali kimyasal temizlenerek yerleştirildi. Sonra numuneyi uygun yükseklikte 1.2 mm çapındaki delikli maske üzerine, numunenin parlak tarafı aşağı gelecek şekilde Schottky kontak yapmak için yerleştirdik. Buharlaştırma için hazır hale gelen sistemimizin yeniden vakum alma işlemine başlayarak basıncın tekrar 10^{-5} torr a düşmesi sağlandı ve buharlaştırma işlemi gerçekleştirdi.



Şekil 4. 2. Tavlama için kullanılan fırın.

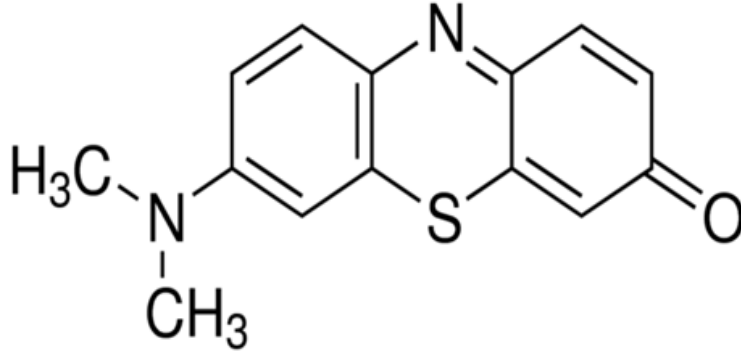
Böylece referans numune olarak *Sn/p-Si/Al* diyotu elde edilmiş oldu. Buharlaştırma işleminin ardından kısa bir süre bekledikten sonra sisteme hava verip numuneyi vakum cihazından çıkartılarak gerekli ölçümleri alındı.

Omik kontaktları aynı olan, geriye kalan numuneyi spin kaplama ünitesine yerleştirilerek metil moru organiğinin kaplanması sağlandı ve organik maddenin kuruması için 24 sa. beklendi. Bu işlemin ardından numune Schottky kontak yapımı için

vakum cihazına yerleştirilerek metil moru kaplı yüzeyine 1.2 mm çaplı Sn metali buharlaştırıldı. Böylece *Sn/metil moru/p-Si/Al* diyotu elde edilmiş oldu.

4.2.1. Metil Moru Molekülü

Metil moru ($C_{24}H_{28}N_3Cl$) kimyasalları 4, 5 ve 6 metil bağından ($R-CH_3$) oluşan kimyasallardan oluşur. Mol kütlesi 393.958 g/mol olan metil moru 137 °C’ de erir. Metil morunun molekül yapısı şekil 4.3.’ te verilmiştir.



Şekil 4. 3. Metil moru molekül yapısı.

4.3. Ölçümler ve Grafikler

Referans numuneye S0, organik metil moru arayüzeyli numuneye SMM isimleri verilmiştir. Her iki numunun akım-voltaj ($I-V$) ölçümleri karanlıkta ve oda sıcaklığında alındı. Sonra sırasıyla kapasite-voltaj ($C-V$) ve kapasite-frekans ($C-f$) ölçümleri alındı. Ölçümler, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Yarı İletken Üretim ve Karakterizasyon Laboratuvarı’ ndaki Keithley 6487 Picoammeter/Voltage Source ve Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer cihazları ile yapıldı.

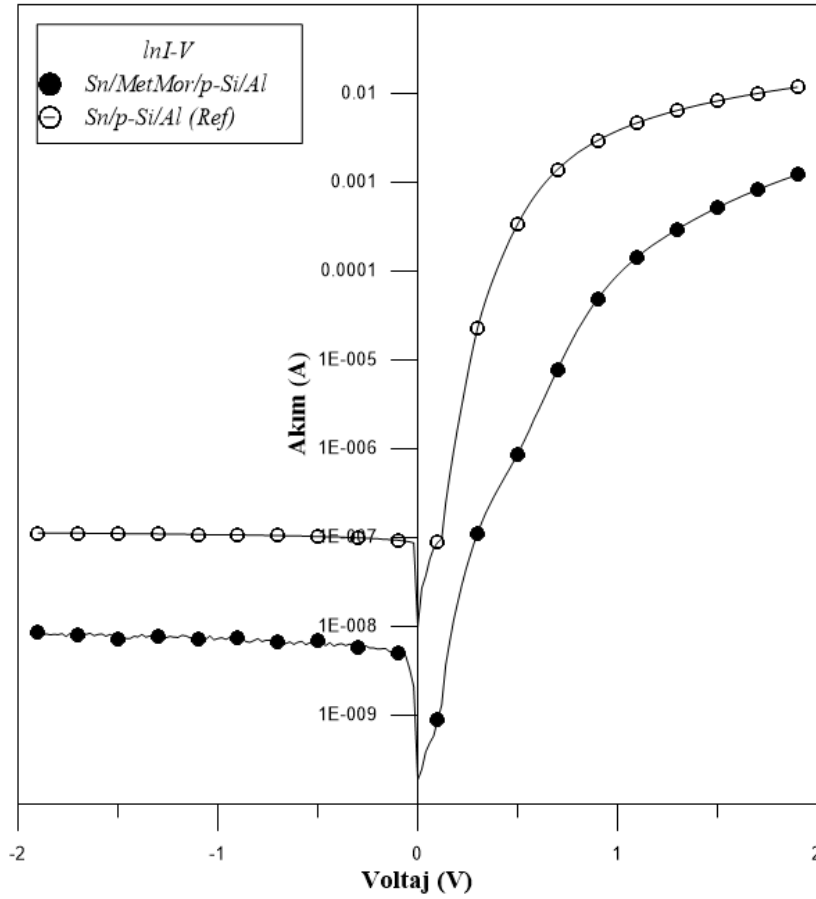
4.3.1. Akım-voltaj ($I-V$) ölçümleri ve cheung fonksiyonlarının kullanılması

Numunelerde kullanılan yarıiletken p-Si kristalinin öz direnci $\rho=12-16 \Omega.cm$ ve kalınlığı 620 μm olarak üretici firma tarafından verilmiştir. $T=300 K$ için p-Si

yarıiletkenin mobilitesi $\mu_p = 450 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ ve $N_v = 1.04 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ literatür olarak verilmiştir (Sze ve ark., 2007). Bu değerler kullanılarak akseptör yoğunluğunu ve Fermi enerji seviyesi aşağıdaki gibi hesaplandı;

$$N_a = \frac{1}{e\rho\mu_p} \quad \text{ve} \quad N_a = N_v \exp\left(\frac{-E_f}{kT}\right) \quad (4.7)$$

formüllerinden $N_a = 1,157 \cdot 10^{15} - 0,868 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ arasında ve Fermi enerji seviyesi $E_f = 0.235 - 0.243 \text{ eV}$ arasında hesaplanmıştır. Fermi enerji seviyesi ortalama $14 \text{ } \Omega.\text{cm}$ özdirence karşılık olarak 0.24 eV olarak alınmıştır. Numunelerin akım-voltaj grafiği karanlıkta ve oda sıcaklığında olmak üzere Şekil 4.4' te verilmiştir.



Şekil 4. 4. S0 ve SMM numunelerinin $\ln I$ - V grafiği.

Grafiklerden idealite faktörlerini (n), engel yüksekliklerini (Φ_B) ve seri dirençleri (R_S) elde edilmiştir. Diyotların idealite faktörlerini hesaplamak için Denklem 3.27' yi tekrar düzenlersek;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.8)$$

ve $eV \gg 3kT$ olduğu hesaba katılırsa 1 ihmal edilir. Denklem 4.8 ifadesinin tabii logaritması alınır ve sonra V ye göre türevi alınır,

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4.9)$$

denklemden n idealite faktörü hesaplanır. Denklem (4.9)' dan $dV/d(\ln I)$ teriminin değeri, $\ln I$ - V grafiğindeki doğru kısmının eğiminden elde edilerek yerine yazılırsa idealite faktörü hesaplanır. Doyma akım yoğunluğu Denklem (3.26)' dan

$$I_0 = AR^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \quad (4.10)$$

engel yüksekliği için

$$e\Phi_b = kT \cdot \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (4.11)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadede yer alan A diyotların etkin alanıdır. Hazırlanan diyotların etkin alanları Çizelge 4.1 de verilmiştir. R^* , Richardson sabiti (p-Si için $R^* = 32 \text{ A/K}^2 \cdot \text{cm}^2$) (Andrews ve Lepselter, 1970; Werner ve Rau, 1994); T , Kelvin cinsinden ortam sıcaklığı ($T=300 \text{ K}$); k , Boltzmann sabiti ($k=8.625 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$) dir.

Çizelge 4. 1. Üretilen diyotların etkin alanları

Numune Adı	Etkin Alan (cm ²)
S0	1,13.10 ⁻²
SMM	1,13.10 ⁻²

Deneysel olarak doyma akım yoğunluğu $\ln I$ - V grafiğinin doğru beslem tarafındaki eğrinin doğru kısmına çizilen doğrusal fitin düşey eksenini kestiği noktadan elde edilir. Elde edilen idealite faktörleri Çizelge 4.2’ de verilmiştir.

Çizelge 4. 2. Üretilen diyotların bazı karakteristik parametrelerin deneysel değerleri

Numune	n (I-V)	n (Cheung)	Φ_B (eV) (I-V)	Φ_B (eV) (Cheung)	Φ_B (eV) (C-V)	R_s (Ω) ($dV/d\ln I$)-I	R_s (Ω) ($H(I)$ -I)
S0	1.65	1.90	0.74	0.75	0.86	99.2	111.4
SMM	2.87	3.12	0.81	0.82	0.67	972.1	1279.5

Denklem 3.32 ve 3.36’ dan I. ve II. Cheung fonksiyonları

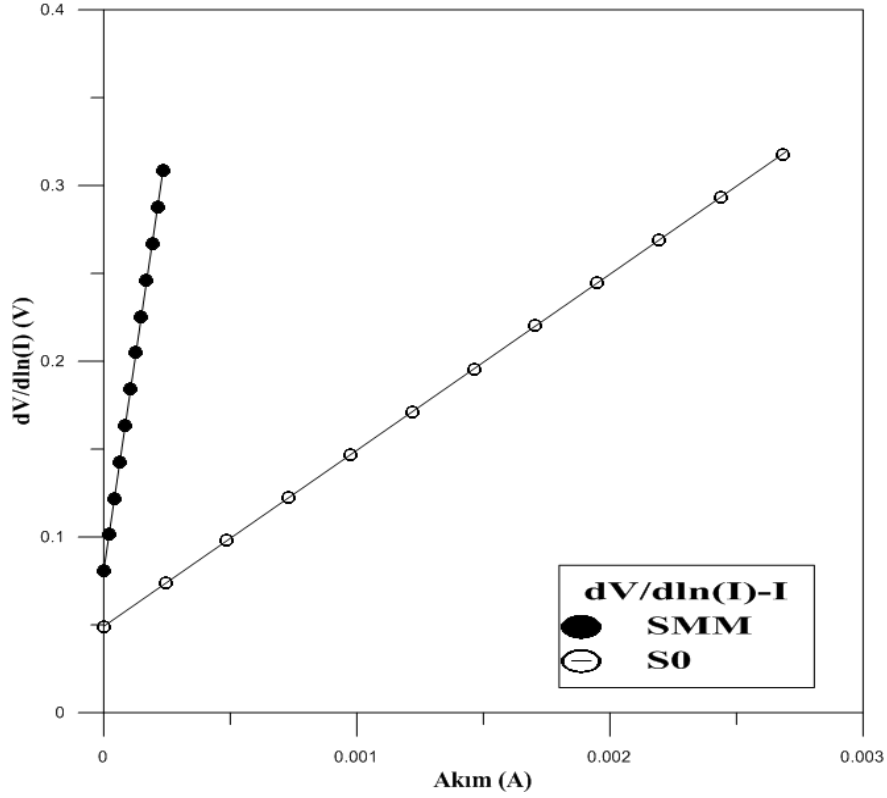
$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (4.12)$$

ve

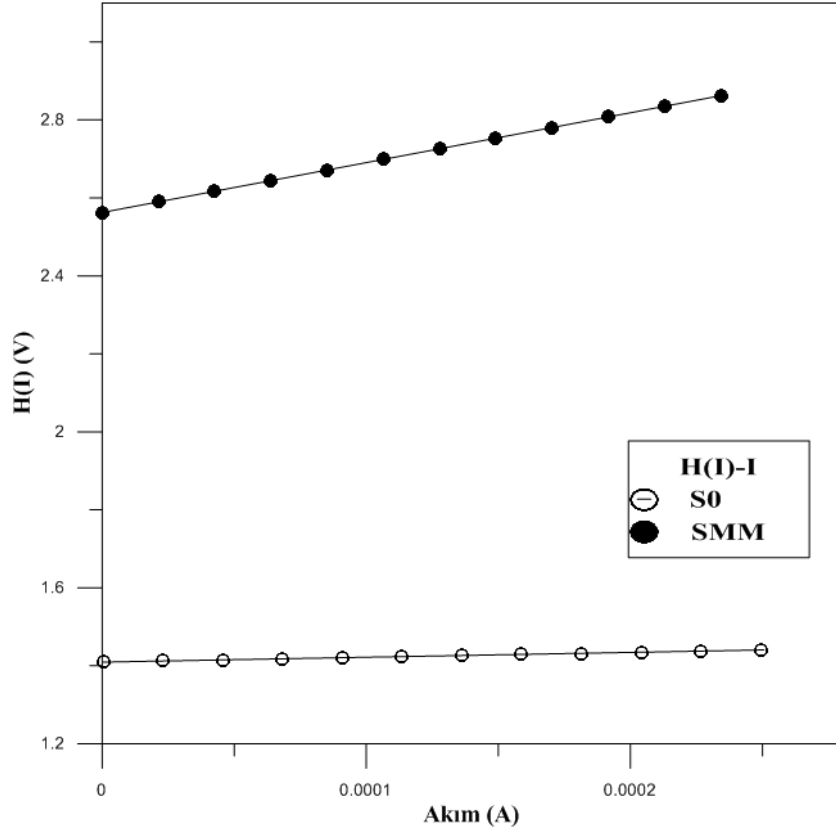
$$H(I) = n\Phi_b + IR_s \quad (4.13)$$

olarak ifade edilmektedir. I. ve II. cheung fonksiyonları yardımıyla, diyotların nötral bölge seri dirençlerinin yanı sıra idealite faktörleri ve engel yükseklikleri yeniden elde edildi. Elde edilen değerler Çizelge 4.2’ de verilmiştir. Denklem 4.12 ile verilen $dV/d(\ln I)$ ’ ın I ’ ya karşı çizilen grafiği bir doğru vermektedir. Bu doğrunun, $I=0$ iken düşey eksenini kestiği noktadan idealite faktörü ve eğiminden de R_s seri direnci elde edilir. Numunelere ait Cheung fonksiyonundan elde edilen $dV/d(\ln I)$ - I grafikleri Şekil 4.5’ te verilmiştir.

Denklem 4.13 ile verilen $H(I)$ 'nın I 'ya göre çizilen grafiği de bir doğru vermektedir. Elde edilen doğrunun $I=0$ 'da düşey eksenini kestiği noktadan, diyotun Schottky engel yüksekliği elde edilir. Bu eğrinin eğimi yine R_s seri direnci vermektedir. II. Cheung fonksiyonu diye de adlandırılan $H(I)$ eşitliğine bağlı olarak elde edilen $H(I)-I$ grafiği Şekil 4.6' da verilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen Φ_b engel yüksekliği ve R_s seri direncine ait değerler Çizelge 4.2' de verilmiştir.



Şekil 4. 5. S0 ve SMM numunelerine ait Cheung fonksiyonları $dV/d(\ln I)-I$ grafiği.



Şekil 4. 6. S0 ve SMM numunelerine ait $H(I)$ - I grafiği.

4.3.2. Norde Fonksiyonu ile Engel Yüksekliği ve Seri Direnç Hesaplama

Engel yüksekliği ve seri direnç hesaplamada Norde' un önerdiği yöntem şöyledir (Norde, 1979). İndirgenmiş Norde Fonksiyonu,

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (4.14)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklemden γ değeri, diyotun idealite faktöründen büyük en küçük tam sayıdır. Örneğin S0 için $n=1.68$ için $\gamma=2$ ve SMM için $n=2.87$ için $\gamma=3$ olarak alınmıştır. Norde fonksiyonu yönteminde engel yüksekliği ifadesi,

$$\Phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (4.15)$$

şeklindedir. Burada $F(V_0)$ değeri $F(V)$ - V grafiğinde, grafik çizgisinin en alt noktasına karşılık gelen en küçük $F(V)$ değeridir ve V_0 da bu noktanın voltaj değeridir. Norde fonksiyonu yönteminin seri direnç ifadesi ise,

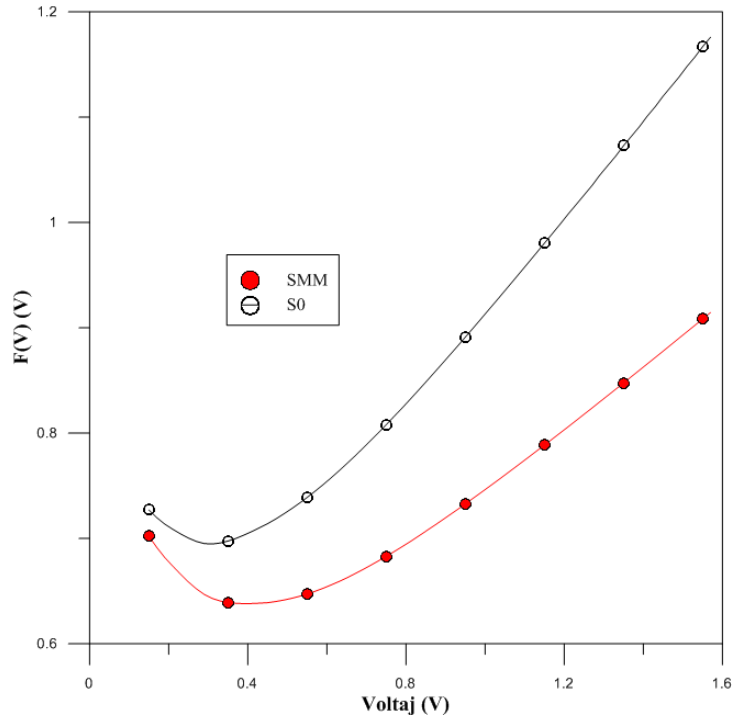
$$R_s = \frac{kT}{q} \frac{(\gamma-n)}{I_0} \quad (4.16)$$

şeklindedir. Buradaki I_0 , daha önce $F(V)$ - V grafiğinde bulunan V_0 a karşılık gelen I-V verilerindeki akım değeridir. Norde fonksiyonu yöntemi ile hesaplanan engel yüksekliği ve seri direnç değerleri Çizelge 4.3.' te verilmiştir.

Çizelge 4. 3. Üretilen diyotların bazı karakteristiklerinin Norde fonksiyonu ile elde edilen değerleri

Numune	V_0 (V)	$F(V_0)$	I_0 (A)	R_s (Ω)	Φ_B (eV)
S0	0.31	0.6948	3×10^{-5}	276	0.82
SMM	0.39	0.6382	3.2×10^{-7}	10511	0.74

Norde fonksiyonu yöntemi ile elde edilen $F(V)$ - V grafiği şekil 4.7.' de verilmiştir.



Şekil 4. 7. S0 ve SMM numunelerine ait $F(V)$ - V grafiği.

4.3.3. Sabit frekans altında kapasite-gerilim (C-V) ölçümleri

Kapasite-voltaj (C-V) ve kapasite-frekans (C-f) ölçümleri *Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer* cihazı ile yapıldı. Numunelerin C-V ölçümleri -4.0 V ile 4.0 V voltaj aralığında alındı. İdeal bir metal-yarıiletken (M-S) kontağın birim yüzey alanı başına arınma (deplasyon) bölgesinin sığası,

$$C^{-2} = \frac{2(V_d - V)}{q\epsilon_s N_a} \quad (4.14)$$

belirlenir. Bu denklemde V_d , difüzyon potansiyeli; q , elektronun yükü; ϵ_s , yarıiletkenin dielektrik sabiti ve N_a , akseptör yoğunluğudur. Denklem 4.14 göre C^{-2} -V grafiği bir doğru verecektir. Bu doğrunun yatay eksenini kestiği noktadan difüzyon potansiyeli elde edilir. C-V karakteristiklerinden engel yüksekliği

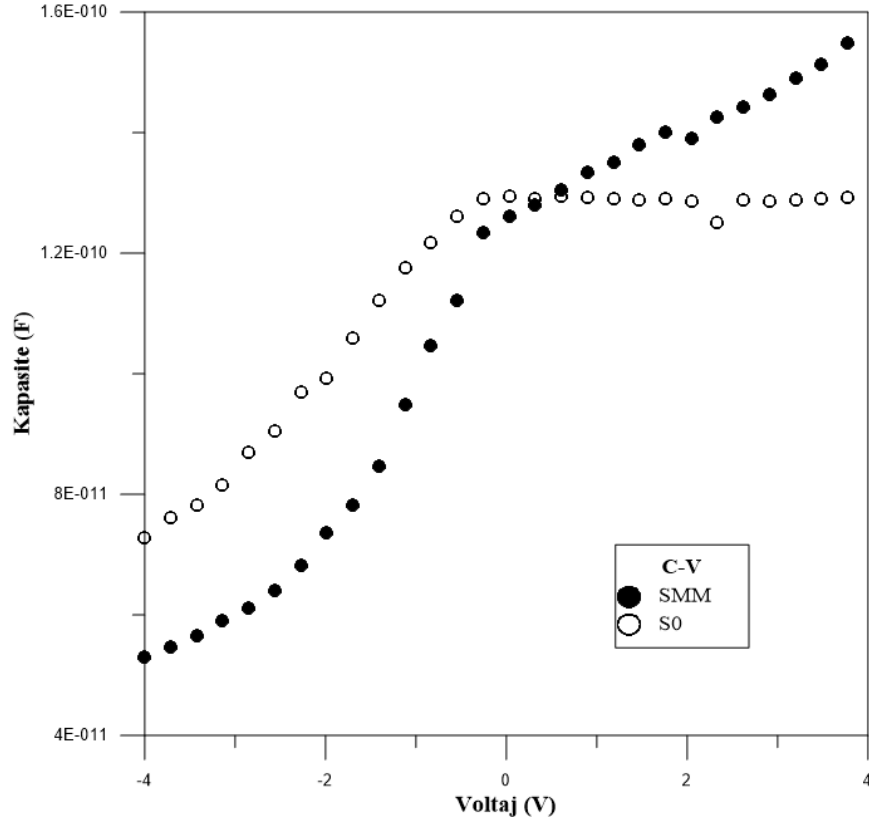
$$\Phi_b = (c_2 V_d + V_p) \quad (4.15)$$

şeklinde elde edilir. Burada $c_2 = 1/n$ ve V_p p-tipi yarıiletken için valans bandının kenarına göre alınan E_F ' ye eşittir. Denklem 4.14'ün V ye göre diferansiyeli alınarak, yüzey alanı A olan bir diyot için N_a ' ya göre çözümü yapılırsa,

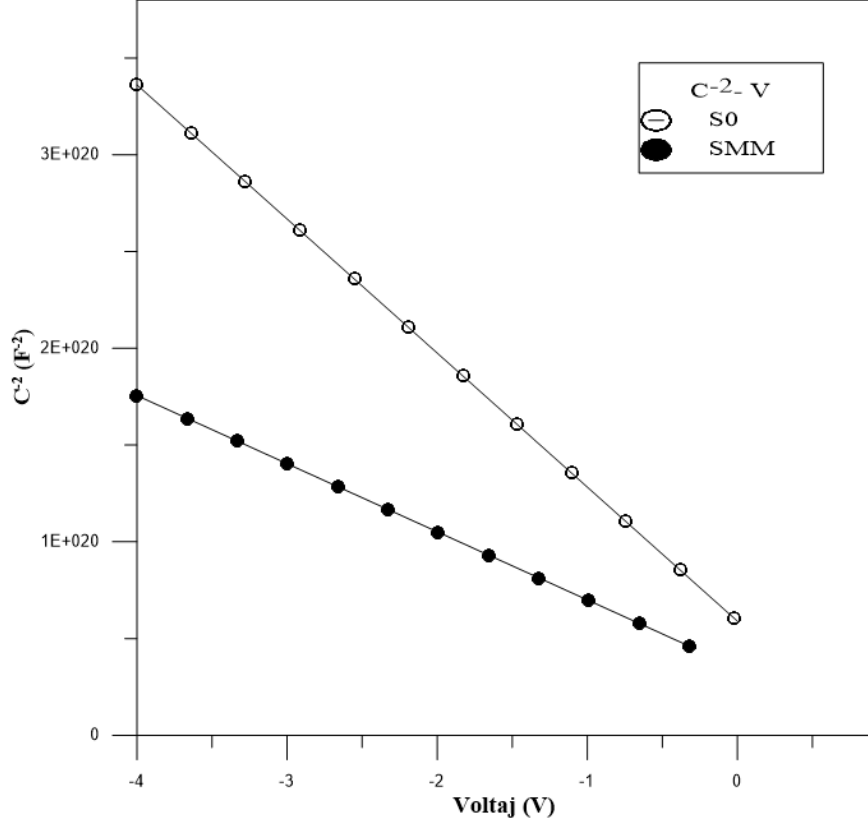
$$N_a = \frac{2}{qA^2 \epsilon_s \epsilon_0} \frac{dV}{d(C^{-2})} \quad (4.16)$$

eşitliği elde edilir. Bu ifadedeki son terim C^{-2} -V grafiğindeki doğrunun eğiminden elde edilerek, yerine yazılırsa her bir diyot için akseptör yoğunluğu elde edilir.

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9' da sırasıyla S0 ve SMM numunelerine ait C-V ve C^{-2} -V grafikleri verilmiştir. Denklem 4.14' e göre $V_d = V$ iken $C^{-2} = 0$ durumunda doğrunun yatay eksenini kestiği noktadan V_d difüzyon potansiyeli hesaplanır.



Şekil 4. 8. S0 ve SMM numunelerine ait C-V ölçümlerinden elde edilen C-V grafiği.



Şekil 4. 9. S0 ve SMM numunelerine ait C-V ölçümlerinden elde edilen C^2 -V grafiği.

Hesaplanan V_d difüzyon potansiyeli,

$$e\Phi_b = \frac{V_d}{n} + V_p \quad (4.17)$$

denkleminde yerine yazılarak Φ_b engel yükseklikleri hesaplanır. Bulunan engel yükseklik değerleri Çizelge 4.2 de verilmiştir.

$$N_a = \frac{1}{e\rho\mu_p} \quad (4.18)$$

Denklem (4.18)' den teorik olarak N_a hesaplanabilir. Buradan akseptör yoğunluğunu teorik olarak $N_a=9.92 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ olarak hesaplarız.

$$N_a = N_v \exp\left(\frac{-E_F}{kT}\right) \quad (4.19)$$

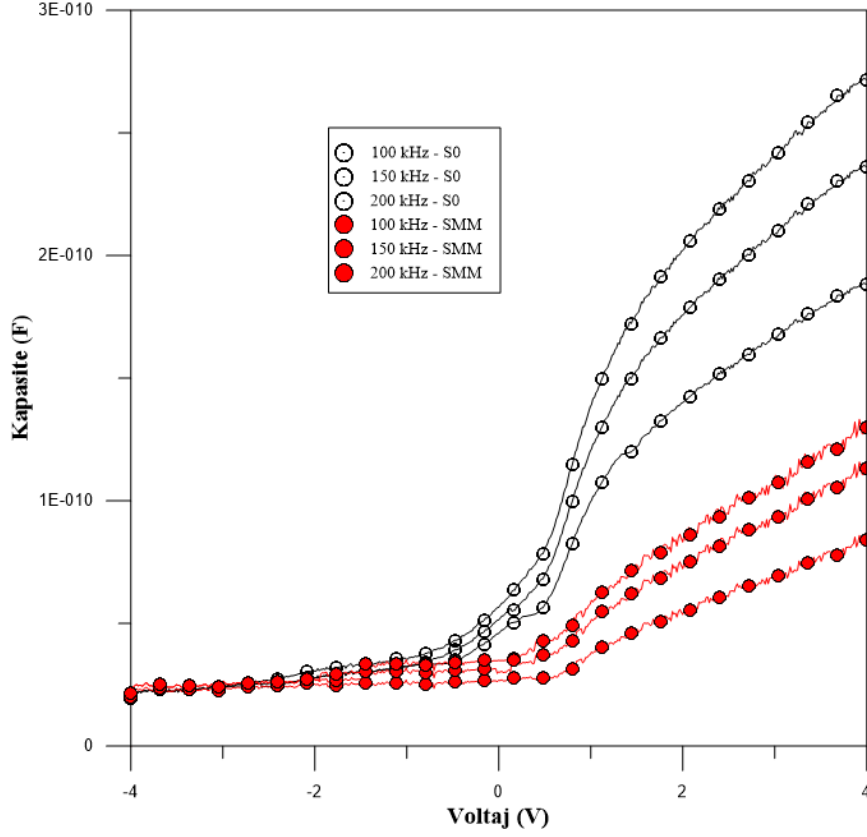
Denklem 4.19' da N_v yarıiletkenin valans bandındaki etkin durumların yoğunluğudur ve değeri $1.04 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ tür. Burada yarıiletkenin öz direncinin $\rho=14 \text{ } \Omega.\text{cm}$ ortalama değeri aldığımızda, $E_F=0.24 \text{ eV}$ teorik olarak hesaplarız. Aynı zamanda N_a ' nın deneysel değerlerini denklem 4.19 da yerine koyarak E_F ' nin deneysel değerlerini buluruz.

Çizelge 4. 4. Üretilen diyotların C-V ölçümlerinden hesaplanan değerleri

Numune	$N_a \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ (teorik)	$E_F \text{ (eV)}$ (teorik)	$\Phi_B \text{ (eV)}$ (teorik)	$N_a \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ (deneysel)	$E_F \text{ (eV)}$ (deneysel)	$V_d \text{ (eV)}$ (deneysel)	$\Phi_B \text{ (eV)}$ (deneysel)
S0	9.92×10^{19}	0.24	0.75	1.42×10^{13}	0.35	0.85	0.86
SMM	---	---	---	1.47×10^{13}	0.35	0.91	0.67

Kapasitans-voltaj karakteristiği Schottky diyotların en önemli özelliklerinden biridir. Schottky diyotların C-V karakteristiği arayüzey durumlarına karşı oldukça duyarlıdır ve arayüzey durumlarının devre elemanlarının elektriksel özellikleri üzerine etkisi mevcuttur. S0 ve SMM numunelerine ait diyotların sabit frekanslarda kapasitans-voltaj ölçümlerinin grafikleri Şekil 4.10' da verilmiştir. Her bir ölçüm -4 V ile 4 V arasında belirli sabit frekanslarda yapılmıştır. Frekans değerleri arttıkça kapasite

değerlerinin azaldığı görülmüştür. Bu durum düşük frekanslarda AC sinyalinin elektronlar tarafından takip edilebildiğini göstermektedir. Yeterince yüksek frekansta alınan kapasite-voltaj ölçümleri arayüzeydeki yüklerin AC sinyalini takip edemedikleri görülmektedir.



Şekil 4. 10. S0 ve SMM numunelerinin sabit frekansta C-V değişim grafiği.

4.3.4. Kapasitans - frekans (C-f) ölçümleri

Ölçümlerin tamamı 00, 50, 100, 150, 200 mV değerlerinde alınmıştır. Böylece bir taraftan frekansa bağlı olarak sığa değişimleri gözlenirken, diğer taraftan $C-f$ ölçümlerinin uygulanan gerilimle ne şekilde etkilendiği görülmektedir. S0 ve SMM numunelerine ait $C-f$ grafikleri Şekil 4.11’ de verilmiştir.

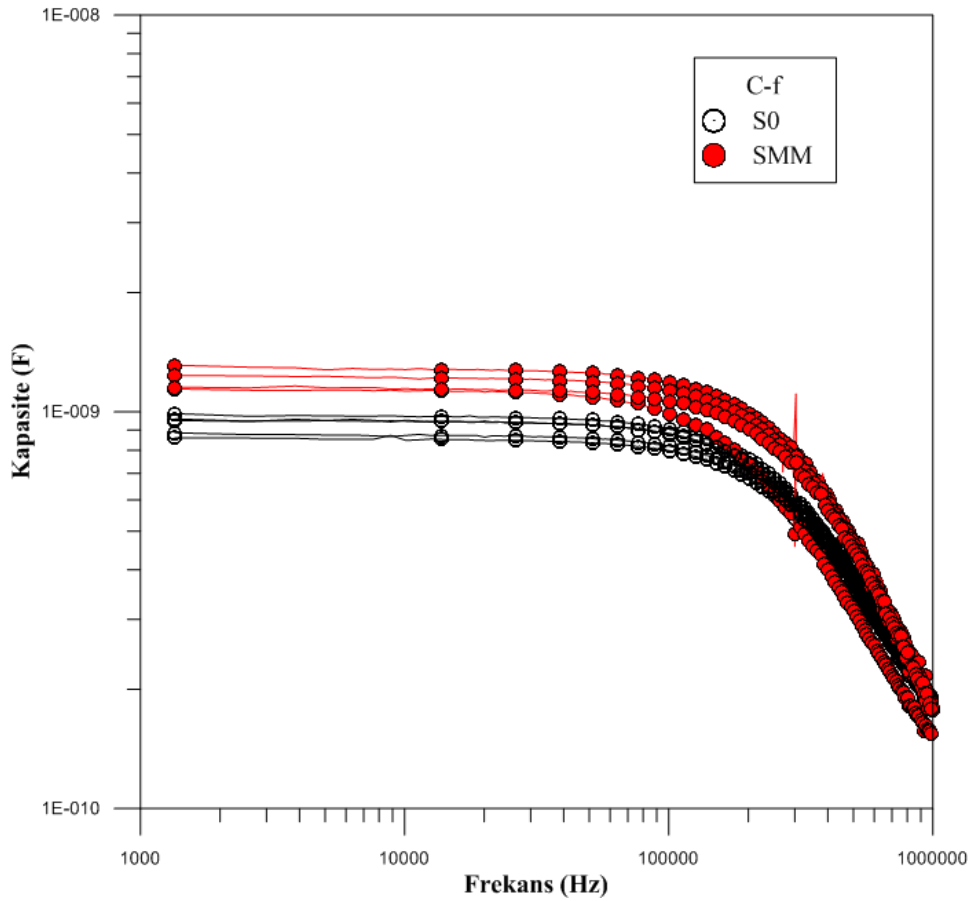
Düşük frekanslarda diyotun kapasitesine arayüzey hallerinden katkılar, yüksek frekanslara doğru gidildikçe azalmakta ve yeterince yüksek frekanslarda arayüzey hallerinden gelen sığa katkısı sıfıra çok yaklaşır, dolayısıyla ihmal edilebilir. Bu

durumda yüksek frekanslarda kontak sığası, arayüzey hallerinin AC sinyalini takip edememesinden dolayı sadece uzay yükü bölgesi sığasından (C_{SC}) ibarettir. $C-f$ ölçümlerinden elde ettiğimiz verilerde, düşük frekanslara karşılık gelen sığa (C), yaklaşık olarak uzay yükü sığasıyla (C_{SC}) arayüzey hallerinden kaynaklanan sığanın (C_{it}) toplamına eşittir (Sing,1985; Baret ve Maaref,1993).

$$C = C_{SC} + C_{it} \quad (\text{düşük frekanslarda}) \quad (4.18)$$

$$C = C_{SC} \quad (\text{yüksek frekanslarda}) \quad (4.19)$$

4.18 ve 4.19 denklemlerinden $C-f$ verilerini kullanarak arayüzey hallerinden kaynaklanan sığanın C_{it} frekansla değişimi elde edilir.



Şekil 4. 11. S0 ve SMM numunelerinin sabit voltajda $C-f$ değişim grafiği.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada, *Sn/p-Si/Al* Schottky diyotlarında organik metil moru arayüzey malzemesi olarak kullanıldığında diyotun elektriksel özelliklerinin nasıl değiştiği araştırıldı. [100] doğrultuda büyütülmüş, ~620 µm kalınlıklı ve öz direnci 12-16 Ω.cm olan Bor katkılı p-Si kullanılmıştır. S0 referans numunesi standart temizleme yöntemi ile temizlendikten sonra *Sn/p-Si/Al* Schottky engel yükseklikli diyotları üretildi. Çalışmamızın amacı, arayüzey malzemesi olarak organik metil moru kullanılması ile üretilen *Sn/metil moru/p-Si* kontaklarının bir Schottky diyotu olduğunu göstermek ve metil morunun diyot parametreleri (idealite faktörü, engel yüksekliği) üzerine etkilerini gözlemektir. Bu çalışmada kullanılan p-Si kristalinin oda sıcaklığındaki mobilitesi $\mu_p=450 \text{ cm}^2/\text{V.sn}$ ve valans bandındaki durum yoğunluğu $N_v=1.04.10^{19} \text{ cm}^{-3}$ olarak verilmektedir (Sze, 1981).

Omik tarafları aynı olan ve standart temizleme işlemi ile üretilen *Sn/p-Si/Al* referans numunesine S0 ismi verilmiştir. Diğer taraftan organik metil moru kullanılarak üretilen *Sn/metil moru/p-Si* numunesine SMM ismi verilmiştir. Her bir numunenin akım-voltaj (*I-V*), kapasitans-voltaj (*C-V*) ve kapasitans-frekans (*C-f*) ölçümleri, karanlıkta ve oda sıcaklığında alınmıştır. Böylece organik metil moru sonucunda idealite faktörü değerleri ve engel yükseklikleri belirlenerek, elde edilen karakteristik parametrelerin birbiri ile karşılaştırma imkanı elde edilmiştir. *I-V* karakteristiklerinden diyotların idealite faktörleri ve engel yükseklikleri hesaplanmıştır. *C-V* karakteristiklerinden diyotların difüzyon potansiyelleri ve engel yükseklikleri hesaplanmıştır. *C-f* ölçümleri alınarak grafikleri çizilmiştir. Ayrıca Norde fonksiyonu yöntemi ile engel yüksekliği ve seri direnç hesaplanmış ve grafiği çizilmiştir.

Şekil 4.4.' te oda sıcaklığında referans S0 numunesinin ve SMM numunesinin karanlıkta ve oda sıcaklığında *I-V* karakteristikleri birlikte gösterilmektedir. İdealite faktörleri, seri direnç etkisi önemsenmeyerek, karanlıktaki *I-V* karakteristiklerinin doğru beslem kısmının lineer bölgesinin eğiminden Denklem 4.8' e göre hesaplandı. *Sn/p-Si/Al* Schottky diyotların engel yüksekliği değerleri, yarı logaritmik doğru beslem *I-V* karakteristiklerinde, eğrinin düşey eksenini kestiği noktadan doyma akımı (I_0), ve Denklem 4.10 yardımıyla hesaplandı. Çizelge 4.2 de görüldüğü gibi S0 referans

numunesinin engel yüksekliği 0.74 eV olarak elde edilirken, organik metil moru arayüzeyli SMM numunesinin engel yüksekliği 0.81 eV olarak hesaplanmıştır. İdealite faktörü S0 için 1.65 ve SMM için ise 2.87 olarak bulunmuştur. Bununla birlikte Bati (2016), organik arayüzey tabakası olarak metil mavisi kullanarak, *Al/metil kırmızısı/n-Si* Schottky engel yükseklikli diyot üretmiştir. Organik arayüzeyli diyotların engel yüksekliğini ve idealite faktörünü sırasıyla 0.83 eV ve 2.8 olarak hesaplamıştır. Diyotlardaki akım iletim mekanizmalarına göre ideal bir diyotun idealite faktörü 1 veya 1' e çok yakın olmalıdır. İdealite faktörü 1.05 – 1.08 eV aralığı ideale en yakın bir Schottky diyot olarak kabul edilmektedir (Rhoderick, 1978; Sze, 1981). Fakat çalışmamızda idealite faktörü 1' den çok büyük çıkmıştır. Bu durumun, diyotların arayüzey oksitlenmesine, arayüzey tabakasından kaynaklandığına ve arayüzeyde oluşan seri dirençten kaynaklandığına atfedilebilir.

Cheung fonksiyonları ve Norde fonksiyonu kullanılarak, S0 ve SMM diyotların idealite faktörleri, engel yükseklikleri ve seri dirençleri hesaplandı. Cheung fonksiyonlarından $[dV/d(\ln I)]-I$ grafiği Şekil 4.5.' de verilmiştir. Denklem 4.11 ve grafikler yardımıyla referans S0 numunesinin idealite faktörleri 1.90 ve SMM numunesinin idealite faktörü 3.12 olarak hesaplanmıştır. Cheung fonksiyonlarından elde edilen bu idealite faktörleri Denklem 3.35 ve 3.36 kullanılarak hesaplanan engel yükseklikleri, referans S0 numunesi için 0.75 eV ve SMM numunesi için 0.82 eV elde edildi. Ek olarak, Cheung fonksiyonlarından R_s seri dirençleri de elde edildi ve değerleri Çizelge 4.2 de verilmiştir. Norde fonksiyonu ile elde edilen engel yüksekliği ve seri direnç değerleri Çizelge 4.3.' te ve $F(V)-V$ grafiği Şekil 4.7.' de verilmiştir. Bu çalışmada Norde fonksiyonu yöntemi ile elde edilen seri direnç değerleri Cheung fonksiyonu ile elde edilen seri direnç değerlerinden daha büyük olduğu görülmüştür. Bu durumun üretilen diyotların ideal olmadığına ve hesaplamaya yöntemlerinin karakteristik özelliklerinin farklı oluşuna atfedilebilir.

Üretilen kontakların arayüzey durumlarını incelemek için kapasite-voltaj grafiği Şekil 4.8.' de verilmiştir. S0 referans numunesi ve SMM numunelerinin sabit frekansta ve -4.0 V ile +4,0 V voltaj aralığında alınan C-V ölçümlerinden elde edilen ters beslem $C^{-2}-V$ grafiği Şekil 4.9 ile Denklem 4.16 yardımıyla elde ettiğimiz engel yükseklik değerleri de Çizelge 4.2 de verilmiştir. Bu engel yükseklik değerleri de diğer I-V ve Cheung fonksiyonlarından elde ettiğimiz engel yükseklikleri ile uyum içinde olduğu

görülmüştür. Ayrıca 100 kHz, 150 kHz ve 200 kHz sabit frekans altında C-V grafiği Şekil 4.10.' da verilmiştir.

Üretilen S0 ve SMM numuneleri için 1 kHz ile 1 MHz arasında ve 0.2 V, 0.4 V, 0.6 V, 0.8 V ve 1 V luk sabit voltaj altında C-f grafikleri Şekil 4.11.' de verilmiştir. Bu grafikten anlaşılacağı gibi organik arayüzeyli SMM numunesinin sığası S0 numunesinin sığasından daha büyüktür. Üretilen diyotların $C-f$ karakteristiklerinde düşük frekanslarda artık kapasite gözlenmiştir. Artık kapasitenin düşük frekanslarda a.c. sinyali takip edebildiğinden, yüksek frekanslarda arayüzey halleri a.c. sinyali takip edemediklerinden etkisi azalmaktadır. Bundan dolayı artan frekansla diyotların sığa değerleri azalmaktadır.

Mevcut çalışmamızda, Sn/p-Si Schottky diyotları üretilmesinin yanında arayüzey malzemesi olarak metil moru organik malzemesi kullanarak elde edilen diyotların parametrelerinden yararlanarak organik arayüzey tabakalı doğrultucu kontak üretilbildiği gösterilmiştir. Organik arayüzey tabakalı SMM diyotun idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direncinde metal/yarıiletken diyotlar ile karşılaştırıldığında artıcı bir etki yaptığı görülmüştür. Diyotların engel yüksekliğinin organik bileşenler ile artırılabilceği görülmüştür. Ayrıca üretilen diyotların fotovoltaiik özelliklerinin incelenmesi daha sonraki çalışmalarda planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Akkılıç, K., Aydın, M. E., Uzun, I., Kılıçoğlu, T., 2006. The calculation of electronic parameters of an *Ag/chitin/n-Si* Schottky barrier diode. ***Synthetic Metals***, 156:958-962.
- Andrew, J. M., Lepselter, M.P., 1970. Reverse current-voltage characteristics of metal-silicide Schottky diodes. ***Solid State Electronics***, 13: 1011.
- Ashok, S., Borrego, J. M., Gutmann, R. J., 1979. Electrical characteristics of GaAs MIS Schottky diodes. ***Solid State Electronics***, 22: 621-631.
- Aydın, M. E., 2003. ***Metal/Yarıiletken ve Metal/Oksit/yarıiletken Pb/p-Si ve Pb/n-Si Schottky Engel Diyotların Karakteristik Parametreleri ve Arayüzey Hallerinin Enerji Dağılımının Belirlenmesi.***, (doktora tezi basılmamış), D. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.
- Aydoğan, Ş., Güllü, Ö., 2010. A study of the rectifying behaviour of aniline gren-based Schottky diode. ***Microelectronic Engineering***, 87:187-191.
- Aydoğan, Ş., İncekara, Ü., Türüt, A., 2010. Determination of contact parameters of *Au/Carmine/n-Si* Schottky device. ***Thin Solid Films***, 518:7156-7160.
- Barret, C., Maaref H., 1993. Study of Cleaved Metal-Inp(n) Contacs. ***Solid State Electronics***, 36: 879.
- Bati, B., 1999. ***İdeal ve İdeal Olmayan Omik ve Doğrultucu Kontaklı Au/n-Si Schottky Diyotlarında Doğru Beslem Kapasite-Voltaj-Frekans Karakteristikleri***, (doktora tezi basılmamış), A.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Bati, B., 2016. The electrical properties of *Al/methylene-blue/n-Si/Al* Schottky diodes. ***Journal of Modern Physics***, 7:1-6.
- Bethe, H. A., 1942. Theory of the boundry layer of crystal rectifiers. ***Mass Inst. Technol. Radiat Lab. Rep.***, 43
- Bethe, H. A., 1981. Theory of the boundry layer of crystal rectifiers. ***Mass Inst. Technol. Radiat Lab. Reba.***, 1942, 43-12.
- Bolotnikov, A.E., Boggs, S.E., Hubert Chen, C.M., Cook Walter, R., Harrison, F.A. and Schindler, S.M., 2002, Properties of Pt Schottky type contacts on high-resistivity

- CdZnTe detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **482**: 395-407.
- Bozkurt, H., 2009. *Metal-Yarıiletken Kontaklarda Kapasitenin Arayüzey Hallerine Bağlı İncelenmesi*, (yüksek lisans tezi basılmamış), Y.Y.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- Cafer, T., 2000. *Katıhal Elektronik*. YTÜ Vakıf Yay., İstanbul. 233.
- Card, H. C., Rhoderick, E.H., 1971. Studies of tunnel MOS diodes I. interface effects in silicon schottky diodes. *J. Phys. D, Appl. Phys.*, **4**: 1589.
- Chattopadhyay, P., Das, K., 1991. Control of barrier height of MIS tunnel diodes using deep level impurities. *Solid State Electronics*, **34(4)**: 367.
- Chattopadhyay, P., Raychaudhuri, B., 1993. Frequency dependence of forward capacitance-voltage characteristics of Schottky barrier diodes. *Solid-State Electron*, **36(4)**: 605-610.
- Cheung, S.K., Cheung, N. W., 1986. Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Appl Phys.Let.* **49(2)**: 85-90.
- Crowell, C.R., Sze, S. M., 1965. Electron optical phonon scattering in the emitter and collector barriers of semiconductor-metal semiconductor structures., *Solid State Electronics*, **8(12)**: 979-990.
- Crowell, C.R., Sze, S. M., 1966. Current transport in metal-semiconductors, barriers. *Solid State Electronics*, **9**: 1035-1048.
- Ghandi, S. K., 1983. *VLSI Fabrication Principles*, Jhon Willey and Sons. Inc, New York.
- Güllü, Ö., Kilicoglu, T., Türüt, A., 2010. Electronic properties of the metal/organic interlayer/inorganic semiconductor sandwich device. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, **71**:351-356.
- Karataş, Ş., Çakar, M., 2009. Temperature dependence of the electrical and interface states of the Sn/Rhodamine-101/p-Si Schottky structures. *Synthetic Metals*, **159**: 347-351.
- Kılıçoğlu, T., 2008. Effect of an organic compound (Methyl Red) interfacial layer on the calculation of characteristic parameters of an Al/Methyl-Red/p-Si sandwich Schottky barrier diode. *Thin Solid Films*, **516**:967-970.
- Kittel, C., 1996. *Katıhal Fizikine Giriş*, Bilgi Tek Yayıncılık, İstanbul.

- Kumta, A., Rusli, C., Tin, C., Ahn, J., 2006. Design of field-plate terminated 4H-SiC Schottky diodes using high-k dielectrics. *Microelectronic Reliability*, **46**: 1295-1302.
- Mott, N. F., 1938. Note on the contact between a metal and an insulator or semiconductor. *Proc. Cambridge Philos. Soc.* **34**: 548.
- Ocak, Y. S., Kulakci, M., Kılıçoğlu, T., Turan, R., Akkılıç, K., 2009. Current-voltage and capacitance-voltage characteristics of a Sn/Methylene Blue/p-Si Schottky diode. *Synthetic Metals*, **159**: 1603-1607.
- Ocak, Y.S., 2010. *Organik, İnorganik Hibrit Yapıların Elektriksel ve Fotoelektriksel Karakterizasyonu*. (doktora tezi basılmamış), D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.
- Ozerden, E., Ocak, Y. S., Tombak, A., Kilicoglu, T., Turut, A., 2015. Electrical and photoelectrical properties of Ag/n-type Si metal/semiconductor contact with organic interlayer. *Thin Solid Films*, **597**:14-18.
- Ohl, R. S., 1941. *Light-sensitive Electric Device*. U.S. Patent No:2, 402,662.
- Rhoderick, E. H., Williams, R. H., 1988. *Metal-semiconductor contacts*. Claredon Press, Oxford.
- Schottky, W., Stormer, R., Waibel, F., 1931. Rectifying action at the boundary between CuProus oxide and applied electrodes. *Zeits Hoch Frequenztechnik*, **37**: 162-165.
- Schottky, W., 1938. Halbleitertheorie der sperrschicht. *Naturwissenschaften*, **26**: 843.
- Selçuk, A. B., 2007. On the dielectric characteristics of Au/SnO₂/n-Si capacitors. *Physica B*, **396**: 181-186.
- Sharma, L. H., 1984. *Metal Semiconuctor Schottky Barrier Junctions Their Applications*, Plenum Pres, New Yok and London, 176.
- Sigh, A., 1985. Characterization of Interface States at Ni/nCdF₂ Schottky Barrier Type Diodes and The Effect of CdF₂ Surface Preparation. *Solid State Electronics*, **28**: 223.
- Sze, M. S., 1981. *Physics of Semiconductor Devices*, Willey, New York.
- Tataroğlu, A., Altındal, S., 2006. Caracterizastion of current-voltage (I-V) and capacitance-voltage–frequency (C-V-f) features of Al/SiO₂/p-Si (MIS) Schottky diodes, *Microelectronic Engineering*, **83**: 582-588.

- Temirci, C., 2000. *Anodik Oksidasyon Metoduyla Yüksek Engelli ve Yüzey Pasivasyonlu Sn/p Si Schottky Diyotlarının Fabrikasyonu*, (doktora tezi basılmamış), A.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Temirci, C., Batı, B., Sağlam, M., Türüt, A., 2001. High-barrier height Sn/p-Si Schottky diodes with interfacial layer by anodization process. *Appl. Surf. Sci*, **172**:1-7.
- Türüt, A., Sağlam, M., 1992. Determination of the density of Si-metal interface states and excess capacitance caused by them. *Physica B*, **179**: 285.
- Ugur, A., Gencer Imer, A., Ocak, Y. S., 2015. Electrical and photoelectrical characterization of an organic-inorganic heterojunction based on quinoline yellow dye. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **39**:569-674.
- Werner, J. H., Levi, A., Tung, R. T., Anzlowar, M., Pinto, M., 1988. Origin of excess capacitance at intimate Schottky contacts. *Phys. Rev. Let.*, **60**: 53.
- Werner, J. H., Rau, U., 1994. *Springer Series In Electronics and Photonics*, Springer Press, **32**: 89.
- Wilmsen, C. W., 1985. *Physics and Chemistry of III- V Compound Semiconductor Interfaces*. Plenum Press, New York.
- Wittmer, M., Freeouf, J. L., 1992. Ideal Schottky diodes on passivated silicon., *Physics Review Letters*, **69**: 2701.
- Wittmer, M., Freeouf, J. L., 1993. Interface states and the barrier height of Schottky diodes, *Physics Letters A*, **173**: 190-194.
- Yakuphanoglu, F., 2007. Electronic and photovoltaic of Al/p-Si/copper phthalocyanine photodiode junction barrier. *Solar Energy Materials*, **91**: 1182-1186.
- Yıldız, D.E., Altındal, Ş., Tekeli, Z., Özer, M., 2010. The effects of surface states and series resistance on the performance of Au/SnO₂/n-Si and Al/SnO₂/p-Si (MIS) Schottky barrier diodes. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **13**: 34-40.

ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında Erbil/Irak'ta doğmuştur. İlk ve orta öğrenimini Erbil'de tamamlamıştır. 2007-2011 yılları arasında Zaxo Üniversitesi, Fen Bilimler Fakültesi Fizik Bölümü'nde okumuştur ve 2011 yılında mezun olmuştur. Eylül/2014 tarihinde Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başlamıştır.