

T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



**SENSÖR UYGULAMALARI İÇİN FARKLI KALINLIKLARDA
OLUŞTURULAN ZNO NANO İNCE FİLMLEİN SCHOTTKY
ENGEL DİYOTLAR ÜZERİNE ETKİSİ**

ATAKAN BEKAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOÇ. DR. OSMAN ÇİÇEK

HAZİRAN - 2022

KASTAMONU

TEZ ONAYI

Atakan BEKAR tarafından hazırlanan “**SENSÖR UYGULAMALARI İÇİN FARKLI KALINLIKLARDA OLUŞTURULAN ZNO NANO İNCE FİMLERİN SCHOTTKY ENGEL DİYOTLAR ÜZERİNE ETKİSİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **29.06.2022** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir

Danışman	Doç. Dr. Osman ÇİÇEK Kastamonu Üniversitesi
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Özgür ÖZTÜRK Kastamonu Üniversitesi
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Yosef BADALI İstanbul Ticaret Üniversitesi

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü V. Prof. Dr. İzzet ŞENER

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde 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, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Atakan BEKAR

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SENSÖR UYGULAMALARI İÇİN FARKLI KALINLIKLARDA OLUŞTURULAN ZNO NANO İNCE FİMLERİN SCHOTTKY ENGEL DİYOTLAR ÜZERİNE ETKİSİ

ATAKAN BEKAR

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN:DOÇ. DR. OSMAN ÇİÇEK

Tez çalışması kapsamında, Schottky engel diyotu olarak bilinen AuPd/n-GaAs ve Ag/n-GaAs metal-yarıiletken yapılara çeşitli kalınlıklarda ZnO oksit tabakası kaplandı. Ayrıca, AuPd ve Ag kontaklı olarak iki grup halinde üretilerek elektriksel özellikleri incelendi. *n*-GaAs alttaş üzerine RF kopartma yöntemi kullanılarak çeşitli kalınlıklarda (25, 50, 100, 175 ve 250 nm) ZnO ince film kaplandı. İki farklı Schottky kontağı oluşturuldu. İlk Schottky kontak olarak DC kopartma yöntemi kullanılarak AuPd Schottky ve omik kontaklar oluşturuldu. Diğer Schottky kontak için ise gümüş pasta damlatılarak Ag kontak oluşturuldu. ZnO filmin kalınlıkları SEM ölçümleri ile tespit edildi. Akım-gerilim (I-V) ölçümleri gerçekleştirildi ve Schottky diyot performansı incelendi. I-V ileri ve geri bölgelerini termiyonik emisyon teorisi, Ohm yasası, Cheung ve Cheung metodu ve modifiye edilmiş Norde metoduna göre analiz eden Labview tabanlı yazılım geliştirildi. Bu sayede doyma akımı (I_o), idealite faktörü (n), potansiyel engel yüksekliği (ϕ_B), seri direnç (R_s) ve şönt direnci (R_{sh}) parametreleri hesaplandı. 25 nm ve 50 nm ZnO kaplı Schottky diyotların en iyi performansı gösterdiği gözlemlendi.

ANAHTAR KELİMELER: *n*-GaAs, Schottky Kontakları, ZnO, İnce Filmler, I-V Karakteristikleri

Haziran 2022, 69 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

THE EFFECT OF DIFFERENT THICKNESSES ZNO NANO THIN FILMS ON SCHOTTKY BARRIER DIODES FOR SENSOR APPLICATIONS

ATAKAN BEKAR

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. OSMAN ÇİÇEK

In this study, various thicknesses of ZnO oxide layer were coated on AuPd/*n*-GaAs and Ag/*n*-GaAs metal-semiconductor structures known as Schottky barrier diodes. In addition, it was produced in two groups as AuPd and Ag contacts, and its electrical properties were investigated. ZnO thin films of various thicknesses (25, 50, 100, 175, and 250 nm) were coated on the *n*-GaAs substrate using the RF sputtering method. Two different Schottky contacts were formed. As the first Schottky contact, AuPd Schottky and ohmic contacts were formed by using DC sputtering method. For the other Schottky contact, Ag contact was formed by dropping silver paste. The thicknesses of the ZnO film were determined by SEM measurements. The current-voltage (*I-V*) measurements were carried out and Schottky diode performance was investigated. A Labview-based software was developed that analyzes the forward and reverse regions of *I-V* according to thermionic emission theory, Ohm's law, Cheung and Cheung method, and modified Norde method. Thus, the saturation current (I_0), ideality factor (n), potential barrier height (ϕ_B), series resistance (R_S), and shunt resistance (R_{SH}) parameters were calculated. It was observed that 25 nm and 50 nm ZnO coated Schottky diodes performed the best performance.

KEYWORDS: *n*-GaAs, Schottky contact, ZnO, Thin films, *I-V* Characteristics

June 2022, 69 Page

TEŞEKKÜR

Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne sunduğum tez çalışmam boyunca değerli katkılarıyla beni yönlendiren, bilgi birikiminden yararlandığım her türlü desteğini esirgemeyen değerli danışmanım Sayın Doç. Dr. Osman ÇİÇEK'e sonsuz teşekkür ederim. Tez çalışması boyunca değerli ilgi ve önerilerini eksik etmeyen ve bana yol gösteren Sayın Prof. Dr. Özgür ÖZTÜRK'e ve tüm süreç boyunca bilgi ve tecrübeleri ile bana sürekli destek olan Sayın Öğr. Gör. Sedat KURNAZ'a teşekkürlerimi sunarım. Desteklerinden dolayı Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarına teşekkür ederim.

Bu süreç boyunca benden desteğini esirgemeyen eşim Gizem BEKAR'a ve aileme de sonsuz sevgilerimi sunarım.

ATAKAN BEKAR

Kastamonu, 2022

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. TEORİK ALTYAPI	6
2.1 Yarıiletkenler	6
2.2 Çinko Oksit (<i>ZnO</i>).....	8
2.3 Galyum Arsenide (<i>GaAs</i>)	10
2.4 İnce Film Teknolojisi	10
3. METAL/YARIİLETKEN (MS) YAPILAR	13
3.1 Metal – Oksit – Yarıiletken Yapısı.....	23
3.1.1 İdeal MOS Yapı	24
3.1.2 Yığılma Bölgesi	26
3.1.3 Tüketim Bölgesi.....	27
3.1.4 Terslenim Bölgesi	27
3.2 MS Doğrultucu (Schottky) Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları	27
3.2.1 Engel Üzerinden Termiyonik Emisyon (TE) ile Akım İletimi	28
3.2.2 Engel İçinden Kuantum Mekaniksel Olarak Tünelleme.....	32
3.3 Schottky Diyotlarda Seri Direnç (R_s) Etkisi.....	33
3.4 Norde Fonksiyonları ile Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi.....	33
3.5 Cheung Fonksiyonları ile SBDs Parametrelerinin Belirlenmesi	36
4. YÖNTEM	39
4.1 Aygıtların Üretimi	39
4.1.1 Kristallerin Temizlenmesi ve Hazırlanması	39
4.1.2 İnce Film Tabakanın RF Kopartma Yöntemiyle Üretilmesi	39
4.1.3 DC Kopartma Yöntemiyle Omik ve Schottky Kontakların Oluşturulması.....	40
4.2 Karakterizasyon	42
4.2.1 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi	42
4.3 Elektriksel Ölçüm.....	43
5. BULGULAR	45
5.1 <i>ZnO</i> Nanoçubukların Morfolojisinin SEM ile incelenmesi.....	45
5.2 Schottky Kontaklarda Akım-Gerilim Ölçümleri	45
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	60
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	69

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Yalıtkan, yarıiletken ve iletken maddeler için bant yapısı modellemesi	6
Şekil 2.2 ZnO kristal yapılarının stick and ball gösterimi.....	9
Şekil 3.1 $\phi_m > \phi_s$ durumu için Metal - n -tipi bir yarıiletken kontakın enerji bant diyagramları. (a), Birbirinden ayrı nötral malzemeler (b) Kontak oluşuktan sonraki denge durumu	16
Şekil 3.2 Metal - n -tipi doğrultucu kontak (a) Doğru polarma durumunda (b) Ters polarma durumunda.....	18
Şekil 3.3 Metal - n -tipi omik kontak (a) Kontak durumundan önce (b) Kontak durumundan sonra	21
Şekil 3.4 Metal - n -tipi yarıiletken omik kontakların yarıiletken tarafına negatif ve pozitif gerilim uygulanması durumunda enerji-band diyagramı (a) Doğru polarma durumunda (b) Ters polarma durumunda.....	21
Şekil 3.5 Farklı katkılama polaritelerine ve değişen ϕ_m 'na sahip yarıiletkenler üzerindeki MS kontakların bant yapıları.....	22
Şekil 3.6 Bir MOS yapının şematik gösterimi	23
Şekil 3.7 İdeal bir MOS – n -tipi yapısının enerji bant diyagramı ($V=0$)	24
Şekil 3.8 MOS kapasitans eşdeğer devresi	25
Şekil 3.9 Doğru polarma altındaki bir metal- n -tipi yarıiletken Schottky engelli kontakın farklı akım iletim mekanizmalarını (a)Engel üzerinden Termiyonik emisyon (b)Engelin içinden kuantum mekaniksel tünelleme (c)Deplasyon bölgesi içinde taşıyıcıların rekombinasyonu (elektron ve deşiklerin birleşmesi) veya jenerasyonu (elektron ve deşiklerin oluşması) d)Azınlık taşıyıcı enjeksiyonuna eşit olan, yarıiletken nötral (bant bükülmesinin olmadığı) bölgesinde taşıyıcı rekombinasyonu	28
Şekil 4.1 İnce Film Kaplama Sistemi (Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı).....	40
Şekil 4.2 DC Koparma Cihazı (Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı).....	41
Şekil 4.3 n -GaAs altlık üzerine ZnO ince filmin kaplaması ve Schottky kontakların oluşturulmasının şematik olarak gösterilmesi.....	41
Şekil 4.4 Taramalı elektron mikroskobu (FEI, Quanta FEG 250)	42
Şekil 4.5 Keithley 2400 elektriksel ölçüm cihazı (Kastamonu Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Laboratuvarı).....	43
Şekil 4.6 I - V ölçümlerinin LabVIEW tabanlı bir program kullanılarak (a) TE, (b) Ohm yasası, (c) Cheung metodu ve (d) modifiye edilmiş Norde metoduna göre SBDs parametreleri hesaplanmaktadır.	44
Şekil 5.1 ZnO ince film kalınlıkları (a)25 nm, (b)50 nm, (c)100 nm, (d)175 nm ve (e)250 nm.....	45
Şekil 5.2 Farklı kalınlıklarda ZnO kaplanan $AuPd$ grubu numunelerin I - V grafiği ...	46
Şekil 5.3 Farklı kalınlıklarda ZnO kaplanan Ag grubu numunelerin I - V grafiği	47
Şekil 5.4 $AuPd$ grubu numunelerin ZnO ince film kalınlığa bağlı olarak (a) ϕ_B ve n , (b) RR	50

Şekil 5.5 <i>Ag/ZnO/n-GaAs/Au-Pd</i> numunelerin <i>ZnO</i> ince film kalınlığına bağlı olarak (a) ϕ_B ve n , (b) RR	50
Şekil 5.6 Ohm yasasına göre <i>ZnO</i> ince filmlerin kalınlığına bağlı olarak (a) <i>AuPd</i> grubu numunelerin ve (b) <i>Ag</i> grubu numunelerin R_i - V_i grafikleri	52
Şekil 5.7 Oda sıcaklığında <i>AuPd</i> grubu numunelerin (a) $dV/dIn(I)$ - I , (b) $H(I)$ - I grafikleri	54
Şekil 5.8 Oda sıcaklığında <i>Ag</i> grubu numunelerin (a) $dV/dIn(I)$ - I , (b) $H(I)$ - I grafikleri	54
Şekil 5.9 Oda sıcaklığında <i>AuPd</i> grubu numunelerin $F(V)$ - V grafikleri	56
Şekil 5.10 Oda sıcaklığında <i>Ag</i> grubu numunelerin $F(V)$ - V grafikleri	57



TABLULAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1 Yaygın olarak kullanılan bazı yarıiletkenlerin Richardson sabitleri	31
Tablo 4.1 Üretilen numunelerin ölçümlere göre isimleri.....	42
Tablo 5.1 <i>AuPd</i> grubu numunelerin TE ile hesaplanan parametreleri	48
Tablo 5.2 <i>Ag</i> grubu numunelerin TE ile hesaplanan parametreleri	49
Tablo 5.3 <i>AuPd</i> ve <i>Ag</i> grubu numunelerin Ohm yasası ile hesaplanan parametreleri.....	52
Tablo 5.4 <i>AuPd</i> grubu numunelerin Cheung metodu ile hesaplanan parametreleri.....	54
Tablo 5.5 <i>Ag</i> grubu numunelerin Cheung metodu ile hesaplanan parametreleri.....	55
Tablo 5.6 <i>AuPd</i> grubu numunelerin Norde metodu ile hesaplanan parametreleri.....	57
Tablo 5.7 <i>Ag</i> grubu numunelerin Norde metodu ile hesaplanan parametreleri	57
Tablo 5.8 Literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılması.....	59

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

\AA	: Angström
A	: Doğrultucu kontak alanı
A^*	: Richardson sabiti (n -tipi GaAs için $8.16 Acm^{-2}K^{-2}$)
cm	: Santimetre
E_g	: Yasak enerji (band) aralığı
E_v	: Valans bant kenarı enerjisi
E_c	: İletkenlik bant kenarı enerjisi
E_F	: Fermi enerjisi
E_0	: Vakum enerjisi
E_{FM}	: Metalin fermi enerjisi
E_{FS}	: Yarıiletkenin fermi enerjisi
eV	: Elektron-volt
I_o	: Doyma akımı
I_F	: Doğru polarma akımı
I_R	: Ters polarma akımı
k	: Boltzmann sabiti ($8,625 \times 10^{-5} eV/K^{-1}$)
n	: idealite faktörü
N_A	: Alıcı katkı atomlarının yoğunluğu
N_D	: verici katkı atomlarının yoğunluğu
N_{SS}	: arayüz durumları
R_S	: Seri direnç
R_{SH}	: Kısa devre direnci
T	: Kelvin cinsinden Mutlak sıcaklık
q	: Elektron yükü ($1.6 \times 10^{-19} C$)
V_D	: Difüzyon potansiyeli
V_F	: Doğru polarma gerilimi
V_R	: Ters polarma gerilimi
W_D	: Tüketim tabakası genişliği
ρ_c	: Özgül kontak direnci
\hbar	: Planck sabiti
m_n^*	: Elektronun etkin kütlesi
ϵ_o	: Boşluğun elektrik geçirgenliği
ϵ_i	: Yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti
ϵ_s	: Yarıiletkenin dielektrik sabiti
γ	: İdealite faktöründen büyük bir tamsayı (boyutsuz)
ϕ_{bo}	: Sıfır polarma engel yüksekliği
ϕ_B	: Potansiyel engel yüksekliği
ϕ_m	: Metal iş fonksiyonu
ϕ_s	: Yarıiletken iş fonksiyonu
Ω	: Ohm
χ_s	: Elektron ilgisi (yakınlığı)
δ	: Yalıtkan arayüzey tabaka kalınlığı
ξ	: İletkenlik bandı ile Fermi enerjisi arasındaki enerji farkı

Kısaltmalar

LEDs	: Işık yayan diyotlar
SBDs	: Schottky engel diyotu
LDs	: Lazer diyotlar
FETs	: Alan etkili transistörler
SCs	: Güneş hücreleri
MS	: Metal-yarıiletken
MOS	: Metal-oksit-yarıiletken
TE	: Termiyonik Emisyon
TED	: Termiyonik Emisyon-Difüzyon
TFE	: Termiyonik Alan Emisyonu
FE	: Alan Emisyonu
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
BH	: Engel Yüksekliği
RR	: Doğrultma oranı
HF	: Hidroflorik asit
Ga	: Galyum
Al	: Alüminyum
Ar	: Argon
In	: İndiyum
As	: Arsenik
P	: Fosfor
N	: Azot
Sb	: Antimon
GaAs	: Galyum Arsenik
GaN	: Galyum Nitrür
GaP	: Galyum Fosfit
InP	: İndiyum Fosfit
InSb	: İndiyum Antimon
Cd	: Kadmiyum
C	: Karbon
Zn	: Çinko
S	: Kükürt
O	: Oksijen
Se	: Selenyum
Si	: Silisyum
SiC	: Silisyum Karbür
Ge	: Germanyum
ZnO	: Çinko Oksit
ZnS	: Çinko sülfat
ZnSe	: Çinko Selenit
CdSe	: Kadmiyum Selenit
CdO	: Kadmiyum Oksit
Au	: Altın
Pd	: Paladyum
n-GaAs	: <i>n</i> -tipi Galyum arsenide
RF	: Radyo Frekans

DC
I-V

: Doğru Akım
: Akım – Voltaj



1. GİRİŞ

Günlük yaşantımızda elektronik cihazların hayatımızın vazgeçilmez bir parçası olduğu ve artarak da olmaya devam edeceği kuşku götürmez bir gerçektir. Bu elektronik cihazların tamamına yakınında yarıiletken tabanlı malzemeler kullanılmaktadır. Yarıiletkenler kuşkusuz insanlığın en önemli buluşlarından biridir. Yarıiletkenler; radyo, televizyon, radar ve telefon gibi cihazlardaki teknolojiye elektronik vakum tüpleri hakim iken, katıhal yarı iletken teknolojisinin gelişmesiyle yerini bu teknolojiye devretmiştir. Günümüz elektronik devre elemanı endüstrisinin yapı taşı olan yarıiletken; ışık yayan diyotlar (LEDs), Schottky engel diyotu (SBDs), Lazer diyotlar (LDs), foto diyotlar, transistörler, alan etkili transistörler (FETs), dedektörler, termistör, mikrodalga diyotlar, güneş hücreleri (SCs), entegre devre (Chip) gibi elektronik devre elemanlarının üretimindeki ana yapı taşı oluşturmaktadır. Bu tip elektronik elemanlarda sürekli gelişmekte olan bilgisayar teknolojisi, optik iletişim teknolojisi, medikal teknolojisi ve askeri savunma sanayisini etkilediği için (yarıiletken malzemeler) üzerinde yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. SBDs olarak bilinen metal-yarıiletken yapılar ile metal-oksit/yalıtkan-yarıiletken (MOS) yapılar ise, elektronik endüstrisindeki bu tür mikroelektronik elemanların ana bileşeni olup potansiyel uygulamaları nedeniyle kimyagerler, fizikçiler ve elektronik mühendisleri tarafından hala araştırılmaktadır (Eroğlu, 2021; Gürkan Aydın, 2010; Özavcı, 2014; Rhoderick ve Williams, 1988; Sharma, 1984; Sze ve Ng, 2006).

Metal-Yarıiletken (MS) kontaklara ilişkin bilgilerde yaklaşık bir asırdan fazla bir zaman dilimine dayanmaktadır. Yapılan birçok deneysel ve teorik çalışmalar olsa da bildiklerimiz henüz yeterli değildir. Bu yapılarda akımın iletim mekanizması ve metal ile yarıiletken arasındaki engelin biçimi hakkında net bir fikir birliği sağlanamamıştır. Bir MS yapının veya SBDs in akım iletim mekanizması diyotun sıcaklığı, alıcı veya verici katkı atomlarının yoğunluğu (N_A , N_D), arayüz durumlarının (N_{SS}) yoğunluğu, diyotun seri ve kısa-devre dirençleri (R_S , R_{SH}), MS yapı arasında oluşan veya oluşturulan yalıtkan arayüzey tabakası ve uygulanan voltaj gibi faktörlere bağlıdır. Ayrıca doğru ve ters polarma durumlarında da iletim oldukça farklıdır (Özavcı, 2014).

MS yapıları anlamaya yönelik adım 1931' de atılmış; Waibel, Störmer ve Schottky, akımın akmaya başlamasıyla kontakın tamamında gerilimin düştüğünü gözlemleyerek bir çeşit engel yüksekliğinin olduğunu öne sürmüşlerdi. Aynı yıl Wilson katıların band teorisini temel alarak yarıiletkenlerin akım iletim teorisini formüle etmiştir. Sonralarda ise MS kontaklara bu teori uygulanmıştır. 1938 yılına gelindiğinde, Walter H. Schottky kimyasal bir tabaka olmayan metal yarıiletken formundaki bu yapının potansiyel engelinin, sadece yarıiletken içerisindeki sabit uzay yüklerinden kaynaklandığını ileri sürdü. Bu model Schottky tarafından açıklandığı için O'nun ismine atfen Schottky engeli olarak adlandırılır. (Abbasoğlu, 2013; Boylu, 2019; Crowell ve Sze, 1966; Ertuğrul, 2011; Mott, 1938; Özavcı, 2014; Rhoderick ve Williams, 1988).

Yine 1938 yılında Mott MS kontaklar için uygun bir teorik model geliştirdi. Geliştirilen bu model Mott engeli olarak bilinmektedir. Mott'a göre; metal ve yarıiletken iş fonksiyonları (ϕ_m ve ϕ_s) arasında var olan fark nedeniyle bir potansiyel engel ortaya çıkmaktadır. Yüklü safsızlık atomlarının arayüz bölgesinde olmadığını ve elektrik alanının sabit olduğunu, bununla birlikte elektrostatik potansiyelin ise metale kadarki uzaklıkla doğrusal olarak değiştiğini kabul etti. Schottky ise; arayüzeyde safsızlık atomlarının bulunduğunu ve elektrik alanının doğrusal şekilde arttığını, elektrostatik potansiyelin ise metal sınırına kadar Poisson denklemi ile uyumlu bir şekilde kuadratik olarak değiştiğini ifade etmiştir. 1942 yılında elektriksel davranışın daha doğru bir şekilde açıklanabilmesi amacıyla Bethe tarafından, termiyonik emisyon teorisi modeli geliştirildi. Bu teoriye göre; metaldeki elektronların vakum ortamına geçişi ile elektronların engelden geçişi aynı şekilde gerçekleşmektedir. Daha sonraları Crowell ve Sze, Schottky'nin difüzyon teorisiyle, Bethe'nin termiyonik emisyon (TE) teorisini birleştirerek, ideal Schottky diyotlarda akım iletim mekanizmasını termiyonik emisyon difüzyon (TED) teorisi olarak açıklamışlardır (Abbasoğlu, 2013; Boylu, 2019; Crowell ve Sze, 1966; Ertuğrul, 2011; Mott, 1938; Özavcı, 2014; Rhoderick ve Williams, 1988).

1939 yılında, Schottky ve Spence tarafından doğrultma teorisi geliştirildi. Bu teori enerji engelinden taşıyıcı difüzyon olayını esas almaktadır. Willson metal/yarıiletken

diyotlar için kuantum mekaniksel tünelleme teorisini hemen bir yıl sonra geliştirerek doğrultma için ters polariteyi açıkladı. (Güzel, 2012; Sze ve Ng, 2006).

Bethe'nin yaptığı araştırmalar elektrondaki serbest yolun engelin maksimum yüksekliğinden kT kadar aşağıda oluşan mesafeden büyük olması gerektiğini göstermiştir. Bardeen yaptığı çalışmalar sonucunda 1947 senesinde kovalent yarıiletkenlerin yüzeyinde Fermi seviyesi üzerinde yer alan yüzey hallerinin varlığını ifade ederek engel yüksekliğinin sabit olduğu fikrini sundu (Abbasoğlu, 2013; Ertuğrul, 2011; Rhoderick ve Williams, 1988; Rideout, 1978).

1947 yılı, William Shockley, Walter Brattain ve John Bardeen yarıiletken tabanlı ilk transistörü bu yılda yaptıklarından dolayı yarıiletken teknolojisinin başlangıcı olarak kabul edilmektedir. 1950'ler ve 1960'larda yüksek bir vakum sisteminde, metal filmlerin buharlaştırılmasının nokta kontaklardan çok daha kararlı ve yeniden üretilebilir kontaklar olmasının gözlemlenmesiyle birlikte sahip olduğumuz kapsamlı bilgilerimizin temeli oluştu. Bu çalışmalar, yarıiletken teknolojisinde kontakların önemini ortaya koydu (Bardeen, 1947; Güllü, 2008; Özavcı, 2014; Sze ve Ng, 2006).

1964'de Baird yaptığı çalışmada silikon bipolar transistör ile Schottky engel diyotunu aynı yapı üzerinde birleştirerek metal yarıiletken alan etkili transistör (MESFET) olarak patent almıştır (Abbasoğlu, 2013).

1970'li yıllarda çalışmalar iki yönlü olarak gerçekleşerek ticari hayata geçirilmiştir. Çalışmaların birincisi Ar-Ge faaliyetlerinden elde edilen bilgilerin Schottky engelleri kullanan cihazların endüstriyel üretimde faydalı hale gelmesi için odaklanmak iken ikincisi, MS arayüzeyinin daha iyi anlaşılması için ortaya konulan çalışmalardan oluşmuştur (Sharma, 1984). 1971'de Card ve Rhoderick, ince bir yüzey film ile ayrılmış metal ve yarıiletken kontaklarda arayüzey hal yoğunluğunu belirleyerek arayüzey hal yoğunluğunun ve arayüzey tabakasının akım gerilim ($I-V$) karakteristiklerinin idealite faktörü (n) üzerine etkilerini açıklamışlardır (Card ve Rhoderick, 1971; Kansız, 2014). Deneuille ve Gerard 1974'de; Card ve Rhoderick'in yaptıkları çalışmalarını geliştirerek doğru ve ters polarma $I-V$ karakteristiklerinden arayüzey hallerinin enerji dağılımını ve arayüzey tabakasının kalınlığını elde ettiler

(Akcan, 2015; Deneuville vd., 1974). 1977 yılında Varma vd., MS kontaklar üzerinde arayüzey kirliliklerinin etkisini araştırarak arayüzey kirliliklerinin metal ile yarıiletken arasındaki yapışmanın mekanik şiddetini azalttığını bildirmişlerdir (Lapa, 2014; Varlıbaş, 2006; Varma vd., 1977).

SBDs tercih edilmelerinin en önemli sebepleri yüksek frekanslardaki performansı ve çok yüksek anahtarlama hızlarıdır. Tek kutuplu entegre devrelerindeki kesim-doyum arasındaki süreleri azaltması sayesinde bilgisayar ve diğer anahtarlama sistemlerinde önemli uygulamaları vardır. Bunlardan başka mikrodalga iletişim sistemlerindeki amplifikatör devreleri ve sinyal algılama devreleri için yüksek frekans elemanı olarak birçok uygulamada kullanılmıştır (Ertuğrul, 2011; Önal, 2007).

SBDs temel parametreleri olan idealite faktörü (n), seri direnç (R_s) ve sıfır polarma engel yüksekliği (ϕ_B) değerlerini hesaplamak için $I-V$ ve kapasite-gerilim ($C-V$) ölçümleri kullanılmaktadır. Arayüzey durumlarının yeterince yüksek ve seri direncin çok büyük olduğu durumlarda $I-V$ ve $C-V$ karakteristikleri ideal durumlara göre sapmalar gösterdiği bilinmektedir. Temel parametrelerin elde edilebilmesi amacıyla ideal olmayan duruma sahip bu SBDs, yeni yöntemler geliştirilmiştir.

Norde 1979'da, ideal durum ($n=1$) için R_s ve ϕ_B değerlerini $F(V)$ fonksiyonunu tanımlayarak elde edilmesini amaçlamıştır. Bu yöntem, R_s ve ϕ_B 'nin sıcaklıkla değişmediği durumlarda uygulandığı için sadece bir sıcaklıkta alınan $I-V$ eğrisine ihtiyaç vardır (Norde, 1979). Daha sonra Sato ve Yasamura, SBDs'in $I-V$ ölçümünden elde edilen idealite faktörü değerinin $1 < n < \gamma$ (γ idealite faktörü değerinden büyük bir tamsayı) olması durumunda R_s ve ϕ_B 'nin belirlenebileceğini gösterdiler (Sato ve Yasamura, 1985). Benzer bir metot ise Mclean tarafından geliştirilmiştir. Bu metot R_s ve ϕ_B 'nin sıcaklık ile değiştiği durumlarda uygulanabilmekle birlikte iki farklı sıcaklık eğrisine ihtiyaç duymaktadır (McLean, 1986). Bohlin tarafından ise, yüksek n faktörüne sahip R_s 'li bir SBDs'de $I-V$ ölçümünden elde edilen n , R_s ve ϕ_B 'nin hesaplanabilmesi için Norde fonksiyonunun modifiye edilmiş bir modelini ileri sürülmüştür. Ancak bu metotta bazı parametreleri belirlemek oldukça zordur (Bohlin, 1986; Çiçek, 2016). Cheung'ler ise (1986), $F(V)$ fonksiyonunun minimum noktasını belirlemede karşılaşılan dezavantajlardan dolayı bu minimum noktayı tanımlama

işlevini hesaba katmamıştır. Bunun yerine $I-V$ karakteristiklerinden türetilen $dV/d\ln(I)-I$ ve $H(I)-I$ gibi iki fonksiyondan diyotun temel parametrelerinin hesaplanabileceğini göstermiştir (Cheung ve Cheung, 1986). Bu fonksiyon Norde ve Bohlin'nin yöntemlerindeki olumsuz yanları içermemektedir.

Tung (1991), dairesel alanlı Schottky engel kontaklar için bir $I-V$ ilişkisi ve alan parametresine bağlı bir gauss dağılımı yapmıştır. Bunun sonucu olarak toplam alan üzerinden integrasyon yoluyla TE akım iletimi ifadesini vermiştir (Güzel, 2012; Tung, 1991).

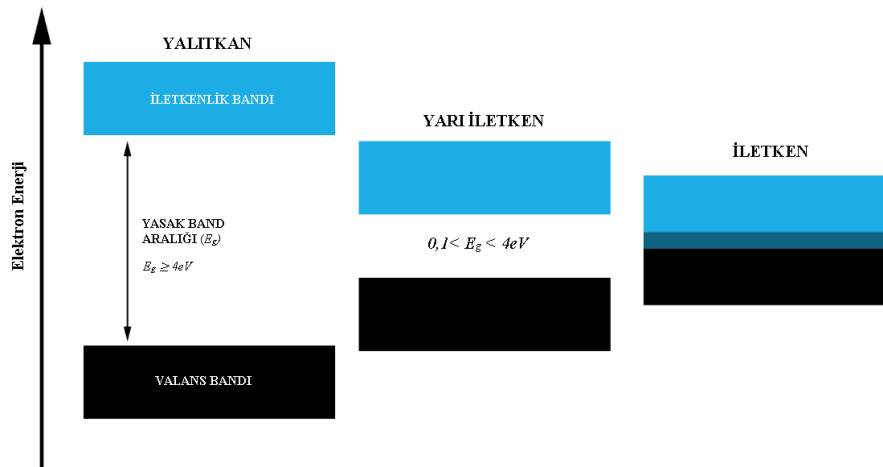
Schottky diyotların oda sıcaklığında $I-V$ değerlerinin analizi, iletim süreçleri haricinde metal ile yarıiletken arayüzey de engel oluşumu hakkında bize bilgi vermekle birlikte MS kontakta taşıyıcı yoğunlukları hakkında tam bir açıklama yapılamamıştır. SBDs'in $I-V$ karakteristiklerinin analizi TE teorisine bağlı olarak, sıcaklığın azalması nedeniyle n faktörünün artışı ve ϕ_B 'deki büyük bir azalmayla açıklanabilmektedir. Gauss dağılımı, ϕ_B 'deki azalma ve TE mekanizmasıyla düşük sıcaklıklardaki n faktöründeki artış başarılı bir şekilde açıklanmıştır (Güzel, 2012). Çok sayıda hem teorik hem de deneysel çalışmalar o zamandan beri yürütülüyor olmasına rağmen, MS kontakların tam olarak anlaşılması hala uzaktır.

Bu çalışmada $n-GaAs$ yarıiletken alttaş üzerine RF kopartma yöntemi kullanılarak farklı kalınlıklarda ZnO doğrultucu kontaklar kaplandı. $AuPd$ ve Ag kullanılarak iki farklı Schottky kontağı oluşturulmuştur. DC kopartma yöntemi ile numunelerin bir kısmı $AuPd$ Schottky kontağı oluşturulurken yine bu yöntem kullanılarak tüm numunelerin omik kontaklar da oluşturuldu. Diğer numunelerin Schottky kontakları için gümüş pasta damlatma yöntemi kullanılarak Ag kontak oluşturuldu. $I-V$ ölçümleri gerçekleştirilerek, SBDs performansı incelendi. $I-V$ ölçümleri TE teorisi, Ohm yasası, Cheung ve Cheung metodu ve modifiye edilmiş Norde metoduna göre analiz edilerek I_o , n faktörü, ϕ_B , R_S ve R_{sh} parametreleri hesaplandı. ZnO kaplı SBDs hangi kalınlıklarda en iyi performansı gösterdiği detaylı olarak karşılaştırılmıştır.

2. TEORİK ALTYAPI

2.1 Yarıiletkenler

İyi yalıtkanlar 10^{22} Ω -cm kadar büyük direnç değerlerine sahipken, tipik bir iletken ortalama 10^{-6} Ω -cm civarındadır. Yarıiletken malzemelerdeki iletkenlik metallere yalıtkanlar arasında olmakla birlikte, yarıiletkenlerin öz direnci 10^9 ile 10^{-2} Ω -cm arasında değişmektedir. $T=0$ K' de yarı iletkenler mükemmel yalıtkanlardır, ancak sıcaklık arttıkça öz direnç azalır ve iletme neden olur. Yarıiletkenler elektriksel iletkenlikleri metallere çok düşük yalıtkanlarda ise fazla olan malzemelerdir. Son yörüngelerinde (valans bandı) 4 elektron bulunduran maddelere yarıiletken denir. Alternatif olarak, bu maddeler Şekil 2.1'de gösterildiği gibi iletim ve valans bantları arasındaki enerji boşluğu veya bant aralığı ile karakterize edilebilir. Yalıtkan bir malzemenin 0 K' de valans bandı (değerlik bandı) dolu iken iletim bandı ise boştur. Valans bandı ile iletim bandı arasında geniş bir yasak enerji aralığı vardır. Ancak iyi bir iletkende valans bandı ile iletim bandı neredeyse iç içe geçmiş durumdadır. Bu durum yarıiletkenlerde incelendiğinde ise bant aralıklarının yalıtkanların sahip olduğu bant aralığından çok daha küçük olduğu görülmektedir. Bu nedenle valans bandındaki elektronlar bir uyarı ile (termal, optik gibi) iletim bandına kolayca geçebilir. Bu durum da iletkenliği artırır (Dinçer, 2017; Karabulut, 2014).



Şekil 2.1 Yalıtkan, yarıiletken ve iletken maddeler için bant yapısı modellemesi

Yarıiletken malzemeler 0 K' de temel olarak yalıtkanlarla aynı bant yapısına sahiptir. Her iki bandın enerji eğrilerini " k -uzayında" görüntüleyerek yarı iletkenin doğrudan veya dolaylı bir bant aralığına sahip olup olmadığını dikkate almak önemlidir. Hem valans hem de iletim bandı sırasıyla aynı dalga vektörü k üzerinde yer alan maksimum ve minimum enerjilere sahipse, yarı iletken doğrudan bir bant aralığına sahiptir. Bununla birlikte, yanlış hizalanmış k dalga vektörlerine sahiplerse, yarı iletken dolaylı bir bant aralığına sahiptir. Yarıiletken mutlak sıfırda bir iletim gerçekleşmez, valans bandı dolu ve iletkenlik bandı boştur. Yarıiletken, termal olarak uyarıldığında valans bandında bulunan elektronlar iletim bandını uyarabilir ve böylelikle elektron ve deşik çiftleri oluşturulur. Elektriksel iletkenliği sıcaklığın bir fonksiyonu olarak hızla artar ve kontrollü bir şekilde katkılama yapılarak malzemenin iletkenlik özellikleri geliştirilebilir. Bu katkı maddeleri, sırasıyla iletim bandına ilave elektronlar veya valans bandına ilave deşikler sağlayarak donör veya alıcı konsantrasyonuna katkıda bulunur. Safsızlık konsantrasyonundaki değişiklik, bir elektronu iletim bandına veya deşiği valans bandından taşımak için gereken enerji miktarını azaltır. Bu nedenle yarıiletkenlere safsızlık atomları ile katkılama yapılarak yük taşıyıcılar oluşturulabilir. Bu işlem sonucu oluşan yarıiletkene de katkılı yarıiletken olarak adlandırılır. Katkılama sonucu olarak yasak bant aralığı içinde yeni enerji seviyeleri oluştuğu görülmüştür (Colinge ve Colinge, 2002; Michaels, 2021).

Si ve Ge en iyi bilinen yarıiletkenler olarak periyodik cetvelin IV. grubunda bulunmaktadır. Tek cins atomdan oluşan bu yarıiletkenler, elementel yarıiletkenler olarak isimlendirilir. Periyodik cetveli III (Ga , Al , In) ve V (As , P , N , Sb) grup elementlerinin birleştirilmesi ile elde edilen $GaAs$, GaN , GaP ve InP gibi III-V yarıiletkenlerle, II. (Cd , Zn) ve VI. (S , O , Se) grup elementlerinden elde edilen ZnO , ZnS , $ZnSe$, $CdSe$ ve CdO gibi II-VI yarıiletkenler ise bileşik yarıiletkenler olarak isimlendirilir (Asıl, 2010; Boylu, 2019).

Elementel Si ve Ge yarıiletkenlerinin birçok uygulama için yetersiz kalması, bileşik yarıiletkenlerin önemini artırmıştır. Bu bileşik yarıiletkenlerden uzak kızıl ötesi (far infrared) dedektör olarak kullanılan $InSb$ (0,17 eV) düşük bant aralığına sahip iken, $GaAs$ (1,43 eV), GaP (2,1 eV) ve InP (1,35 eV) $InSb$ 'ye göre daha geniş bant aralıklı bileşik yarıiletkenlerdir. GaP 'nin bant aralığının elektromanyetik spektrumun görünür

bölgesine karşılık gelmesi özellikle LED'lerin (light emitting diode) gelişmesinde önemli katkı sağlamıştır. Ancak dolaylı bant yapısına sahip olması ışıma verimini azaltmaktadır. (Asıl, 2010; Boylu, 2019)

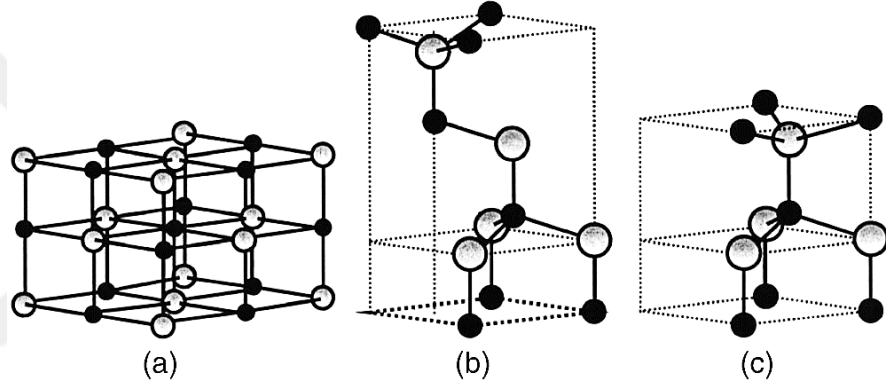
Bununla birlikte başka katkılama teknikleriyle ışıma veriminin artırılması da mümkündür. *Si* ve *Ge* ile karşılaştırıldıklarında *InP* ve *GaAs* yüksek mobiliteli elektronlara sahiptirler. Bu özellikle birlikte yüksek hız ve frekanslarda çalışan devre elemanlarının gelişiminde oldukça katkı sağlamıştır. Direkt bant yapılı olmaları ve sonuç olarak yüksek ışıma verimine sahip olmaları sayesinde opto elektronik de oldukça önemli bir yer edinmişlerdir. Teknolojinin gelişmesiyle beraber *SiC* (2,86 eV), *ZnSe* (2,7 eV), *CdO* (2,16 eV) ve *ZnO* (3,37 eV) gibi daha geniş bant aralıklı yarıiletkenler uygulamalarda yerini almıştır. Büyütme tekniklerinin geliştirilmesiyle birlikte istenilen oranlarda alaşımların hazırlanması uygun bant aralığına sahip yarıiletkenlerin elde edilmesine olanak sağlamış ve bu bant modifikasyonu sayesinde elektromanyetik spektrumun geniş bir aralığında çalışan cihazların yapımını mümkün kılmıştır (Asıl, 2010; Boylu, 2019).

2.2 Çinko Oksit (*ZnO*)

Çinko oksit (*ZnO*), optoelektronik için oldukça avantajlı olan, $\sim 3,3$ eV geniş doğrudan bant aralığı ve 60 meV eksiton bağlama enerjisine sahip çok yönlü şeffaf iletken bir oksittir. Bir eksiton, iletim bandı kenarının hemen altında meydana gelen bağlı bir elektron-deşik çiftidir. Bu çiftin yok edilmesi üzerine, bant aralığı eksi eksiton enerjisine eşit bir enerjiye sahip bir foton salınır. Büyük eksiton enerjisi, oda sıcaklığında ve daha yüksek sıcaklıkta emisyonu olanak sağladığı için avantajlıdır ve bu da UV spektrumunda LED'ler ve lazerler için *ZnO* kullanımına imkan tanır. *ZnO*, neredeyse metal benzerinden yalıtkan benzerine kadar geniş bir iletkenlik özellikleri yelpazesine sahip, *n*-tipi yarı iletkendir. Bu çok yönlü aralık, biriktirme teknikleri (hidrotermal büyütme, buhar fazı büyütmesi, kimyasal buhar biriktirme, sol-gel ve püskürtme) safsızlık dopingi ve tavlama ile kontrol edilir, dolayısıyla *ZnO* bazlı malzemelerden üretilen bir elektronik cihaz tamamen şeffaf olabilir (Özavcı, 2014; Shaw, 2018).

ZnO ' nun iletkenliğini katkılama veya alaşımlama yoluyla kontrol etmek, genellikle kafes yapısı içinde Zn atomlarının yerini alan Al , Ga ve In gibi metaller kullanılarak elde edilir. Bununla birlikte, uygun katkı maddelerinin bulunmaması nedeniyle p -tipi ZnO elde etmek oldukça zordur. (Shaw, 2018)

ZnO için kristal yapılar sırasıyla Şekil 2.2 (a-c)'de gösterildiği gibi kaya tuzu (B1), çinko blend (B3) ve wurtzite (B4)'tür. Kaya tuzu kristali sadece nispeten yüksek basınçlar altında büyütülebilirken, çinko blend kristalleri sadece kübik substratlar üzerinde kararlıdır. Çevre koşulları altında ZnO tipik olarak bir wurtzite kristal yapısı ile biriktirilir ve stabildir (Shaw, 2018).



Şekil 2.2 ZnO kristal yapılarının stick and ball gösterimi

Şekil 2.2 (a)'da kübik kaya tuzu (B1), (b)'de kübik çinko blend (B3) ve (c)'de altıgen wurtzite (B4) gösterirken, gölgeli ve siyah küreler sırasıyla Zn ve O atomlarını göstermektedir (Morkoç ve Özgür, 2009). Bu arada, ZnO ince film transistörleri (TFT'ler) esnek elektronik ekran arka panellerinde kullanılabilir. Ek olarak, geçiş metali katkı ZnO araştırmaları, spintronik için seyreltilmiş bir manyetik yarı iletken sağlamada umut vaat etmektedir. ZnO ' nun gaza duyarlı olduğu ve gaz algılama dedektörleri olarak araştırılabileceği de bildirilmiştir (XU, 2013).

ZnO , literatürde ZnO nanoyapılarla ilgili birçok sensör çalışması bulunmakla birlikte, gaz sensörü uygulamalarında kullanılmak üzere keşfedilen ilk malzemelerden biridir (Lapa, 2014).

2.3 Galyum Arsenide (*GaAs*)

Galyum Arsenide (*GaAs*), III. grupta bulunan Galyum (*Ga*) ve V. grupta bulunan Arsenik (*As*) elementlerinden oluşan III-V bileşik yarıiletkeni olup diyot, transistör, güneş hücresi (SCs) gibi yarıiletken elemanlarda kullanılan önemli bir malzemedir.

Yapılan çalışmalarda, yarıiletkenler içerisinde *GaAs* tabanlı elemanların yüksek hızlı ve düşük güç tüketimli elemanlar oldukları tespit edilmiştir (Karabulut, 2014; Tung, 2001).

Direkt yasak enerji aralığına sahip olan *GaAs* optik devre elemanlarında yaygın olarak kullanılır. Bununla birlikte yüksek elektron mobilitesine sahip olması yüksek frekans uygulamalarında kullanılmasını sağlamaktadır. *n*-tipi *GaAs*, düşük mobilitesinin elektron mobilitesinden küçük olması *p*-tipi *GaAs*' a göre daha yaygın kullanılması sonucunu doğurmaktadır (Akin, 2015; Ashok vd., 1979).

Gerçekleştirilen çalışmalarda, *GaAs* tabanlı dijital devre elemanlarının silisyum tabanlı yapılara oranla 2 ile 5 kat arasında daha hızlı çalıştığı ve daha düşük güç kaybı gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, *GaAs*'ın yük taşıyıcı sürüklenme hızı avantajının yanı sıra yarıyalıtkan taban malzeme olarak üretilme özelliğinden dolayı yarıiletken endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu özelliğiyle devre elemanları arasında yalıtım görevi göreceğinden, elektronik devrelerde karşımıza çıkan gürültünün azaltılması ve eksiksiz tümleşik bir devre üretimini sağlamaktadır (Güllü, 2008; Karabulut, 2014; Özerli, 2013).

2.4 İnce Film Teknolojisi

Günümüzde yarıiletkenlerin üretiminde yaygın olarak kullanılan, katıhal elektronüğının ilgi gören dalları arasında öne çıkan ince film teknolojisi ve bu teknolojiyle birlikte üretilen aygıtların özelliklerinin incelenmesi oldukça önem taşımaktadır. İmal edilen bu yarıiletkenler çok küçük hacimler içinde birden fazla işleve sahiptirler ve hızlı ve yüksek frekanslı elektronik devre elemanlarını meydana getirirken, teknolojinin gelişmesine katkıda bulunmaktadır (Güllü, 2008; Saları, 2018; Tozlu, 2011).

İnce film ve cihazlar, modern bilimin gelişmesinde önemli bir rol oynamaktadır. İnce film, bir boyutu kalınlık olarak adlandırılan, diğer iki boyuttan çok daha küçük olan katı malzemenin iki boyutlu bir şeklidir. İnce film, atomdan atoma veya molekülden moleküle yoğunlaştırma işlemiyle oluşturulur. Teknik açıdan, filmlerin kalınlığı, filmin imal edildiği belirli elektronik taşıma işlemine katılan taşıyıcıların ortalama serbest yolunun sırası ile sınırlandırılmalıdır. Uygulama alanına bağlı olarak kalınlık sınırı bir nanometreden birkaç mikrometreye kadar değişebilir (Chaliha, 2008).

İlk aşamalarda, ince filmler üzerindeki araştırmalar, özellikle aynı malzemenin toplu haldeki özelliklerinden önemli ölçüde farklı özellikleri nedeniyle bilimsel meraktan yapılmıştır. Ancak sonraki yıllarda ince filmlerin özelliklerini kontrol etme yeteneğinin kazanılması, ince filmlerin elektronik, opto-elektronik ve diğer cihazlarda kullanılmasına büyük ölçüde yardımcı olmuş ve bunun sonucunda elektronik endüstrisi, ince film teknolojisinden en fazla yararlanan sektör haline gelmiştir. Öte yandan ince film teknolojisi, yarı iletken cihazların boyutlarını iki boyuta indirerek mikro elektroniğin gelişimine katkıda bulunur (Chaliha, 2008).

Aktif ve pasif elektronik bileşenlerin yapımında ince filmlerin kullanılması, VLSI ve mikrobilgisayar üretmeyi mümkün kıldı. İnce film teknolojisinin kullanılması sayesinde, artık üç boyutlu toplu görüntü üniteleri düz hale gelmesine imkan sağlamıştır. Kompaktlık nedeniyle, daha iyi performans ve güvenilirlik ile düşük üretim maliyeti sağlayan ince film cihazları ve bileşenleri, toplu muadillerine göre tercih nedeni haline gelmiştir (Chaliha, 2008).

İnce film teknolojisinin gelişimi, mikro elektronikten optiğe, uzay biliminden uçaklara, süper iletkenlikten fotovoltaiklere kadar çeşitli alanlarda uygulanmasına yol açmıştır. İnce filmlerin en önemli uygulamalarından biri fotovoltaik cihazlarda ve diğer SCs'de yer alır. Fotovoltaik cihazlarda, ince filmler veya kalın filmler (2-3 μm kalınlığında) yalnızca malzeme maliyetlerinden tasarruf sağlamakla kalmaz, aynı zamanda büyük alana sahip cihazlarının nispeten düşük maliyetle üretilmesini de sağlar. İnce filmlerle ilgili araştırmalar, yeni tip aktif cihazların ve pasif bileşenlerin, farklı sensör türlerinin, güneş enerjisinin saklanması ve diğer formlara dönüştürme, manyetik bellekler, süper iletken filmler, optik görüntü depolama cihazları, gerinim

ölçer gibi elektromekanik cihaz, gaz algılama sensörü, parazit filtresi, yansıma önleyici ve yansıma önleyici kaplama ve pek çok diğerlerini geliştirilmesine imkan sağladı (Chaliha, 2008; Francombe, 2000; Maissel ve Glang, 1970).



3. METAL/YARIİLETKEN (MS) YAPILAR

Yarı iletken tabanlı elektronik cihazlara yapılan elektriksel bağlantıların çoğu MS kontaklar tarafından sağlanır. Bir metal ile yarıiletken sistemin doğrultma davranışının arkasındaki fiziksel izah, 1938 yılında Schottky ve Mott tarafından bağımsız olarak önerilmiştir. Her ikisi de sırasıyla Schottky engeli ve Mott engeli olarak adlandırdıkları alan yükü birikmesi nedeniyle potansiyel bir engelin ortaya çıkacağını düşündüler (Card ve Rhoderick, 1971; Rhoderick ve Williams, 1988; Sze ve Ng, 2006).

Metal ve yarıiletken kontak bir yapı arada başka bir madde olmaksızın, metalin vakum ortamında buharlaştırılıp, eş zamanlı olarak yarıiletken yüzeyine biriktirilmesi ile üretilmektedirler. Kontakın ideal olmasını, kontak haline getirilen yüzeylerin oksitsiz, temiz, pürüzsüz ve parlak olması aynı zamanda kontak yapılan metalin cinsi doğrudan etkiler (Card ve Rhoderick, 1971; Rhoderick ve Williams, 1988). Yarıiletken tabanlı cihazların temel elektriksel özelliklerinin anlaşılması açısından bu kontaklar önem arz etmektedir.

En genel anlamda bir metal ile p -tipi veya n -tipi yarı iletkenin elektriksel kontak yapılması ile (bir metalin bir yarıiletken üzerine kaplanması gibi) oluşan ve doğrultma özelliği gösteren, akımın sadece bir yönde akmasını izin veren yapılara doğrultucu (Schottky) kontak olarak adlandırılmaktadır. Bu tür bir yapının fiziği ilk olarak Schottky tarafından açıklandığı için onun ismi ne atfen Schottky kontak ismi kullanılmaktadır. Metal ve yarıiletkenin birbiriyle nasıl temas ettiği engelin sonucu için çok önemlidir. Örneğin ara yüz yapısının düzgün ve hatasız olup olmadığı veya iki malzeme arasında karışım olup olmadığı kontakın sonucunu etkileyecektir. MS kontakların davranışını incelemeye başlamadan önce iş fonksiyonu kavramını açıklamak gerekir. Bir metalin iş fonksiyonu (ϕ_m) metalin Fermi seviyesinden bir elektron çıkarmak için gereken minimum enerji olarak tanımlanır. Benzer şekilde yarıiletkenin iş fonksiyonu (ϕ_s) valans seviyesinde bulunan bir elektronu çıkarmak için gereken enerjidir. Metal – n -tipi yarıiletken alt tabaka kontak için $\phi_m > \phi_s$ ise doğrultucu kontak yada Schottky kontak adı verilmiştir (Kasap, 2017; Neamen, 2003; Sze ve Ng, 2006).

İş fonksiyonunu (ϕ) açıklayabilmek için önce Fermi Enerji Seviyesini (E_F) açıklamalıyız. E_F 'nin T=0 K' de önemi yarıiletkenlerde çok büyüktür, bu sıcaklıkta valans bandının sahip olabileceği en büyük enerji, E_F olarak tanımlanabilir. Ayrıca yarıiletkenlerde balans ve iletkenlik bandındaki taşıyıcı sayısına ve sıcaklığına bağlı olarak, yasak enerji bölgesinde yer alan göreceli seviye E_F olarak açıklanır. p -tipi yarıiletkenlerde E_F , valans bandından itibaren ölçülürken n -tipinde ise iletim bandından itibaren ölçülür (Durumlu, 2017; Sze ve Ng, 2006). Vakum seviyesi ise bir elektronun sıfır kinetik enerjiye sahip olacak şekilde belirli bir katıdan serbest halde bulunabilmesi için gerekli olan minimum enerjiyi tanımlar (Kasap, 2017).

ϕ_m , bir birim elektron yükü fermi seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gereken enerji olarak tanımlanmaktadır. Buna göre, (Habanyama, 2018)

$$\phi_m = \frac{E_0 - E_{FM}}{q} \quad (3.1)$$

Burada q elektriksel yüküdür, E_0 ise vakum enerjisi ve E_{FM} metalin fermi enerjisini temsil eder. (Habanyama, 2018)

Bir yarıiletkenin iş fonksiyonu (ϕ_s) ise metale benzer şekilde tanımlanır ve bir birim elektronik yükü Fermi seviyesinden vakum seviyesine taşımak için gereken enerji olarak tanımlanır. Buna göre, (Habanyama, 2018)

$$\phi_s = \frac{E_0 - E_{FS}}{q} \quad (3.2)$$

olarak gösterilebilir.

Yarıiletkendeki E_{FS} değişken bir nicelik olup katkılamaya göre değişkenlik göstermektedir. χ_s elektron ilgisidir ve bir elektronun iletkenlik bandının tabanı ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkı olarak tanımlanır. χ_s katkı konsantrasyonuna bağlı değildir. ϕ_m , ϕ_s ve χ_s enerji birimden olup genellikle elektron volt (eV) cinsinden kullanılır (Sharma, 1984). χ_s , ϕ_m gibi yüzey dipollerine karşı hassastır. Eğer yarıiletken içinde hiç elektrik alanı yoksa yani bantlar düz ise, χ_s ve ϕ_s birbirine olan bağlantısı

$$\phi_s = \chi_s + \zeta \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilir. Burada ζ iletkenlik bandı tabanı ile E_F arasındaki enerji farkını ifade etmektedir (Habanyama, 2018; Atçeken, 2018).

$$\chi_s = \frac{E_0 - E_C}{q} \quad (3.4)$$

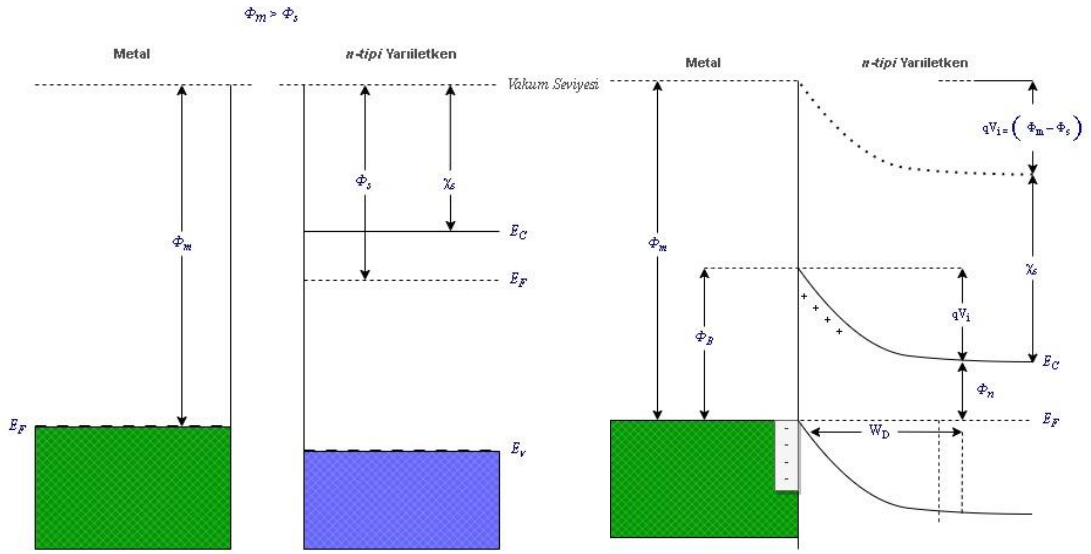
Son olarak ifademiz bir elektronu, valans bandından uzaklaştırmak için gerek duyulan en düşük iyonlaşma enerjisi (I) ise;

$$I = \chi_s + E_g \quad (3.5)$$

bağıntısı ile verilir. E_g yük geçişi sırasında yasak enerji aralığıdır. (Rhoderick ve Williams, 1988; Atçeken, 2018)

Bir metalde E_C 'ı kısmen doludur ve E_F seviyesi E_C 'nin içinde yer alır. Bu durumda MS kontak denge durumunda alışverişi olmaksızın bir sabit değerde olur. Elektronlar için ϕ_B sadece $E_C - E_F$ farkı kadarlık küçük bir engeldir. Bu tür bir kontak yapısında elektronlar rahatlıkla yarıiletkenden metale geçebilirler. Ancak metallerdeki elektronların yarıiletkenleri geçmeleri için ϕ_B kadarlık bir enerji engelini aşması gerekir. Bir metal ile yarıiletkenin kontak yapılması ile oluşan potansiyel engeli kaynağı bu iki malzeme arasındaki yüklerin ayrılmasıdır. Şekil 3.1.(a)'da ϕ_m olan metal ile ϕ_m 'dan küçük olan ϕ_s bir n -tipi bir yarıiletkenin kontak oluşmadan önceki enerji bant diyagramları gösterilmektedir. Şekil 3.1.(b)'de bir metal ile n -tipi yarıiletkenin kontak oluşturduktan sonraki denge durumunu göstermektedir. Bu yapıda $\phi_s < \phi_m$ düşük olduğu için başka bir deyişle yarıiletkenin elektronları metalinkinden daha yüksek enerjiye sahip olduğundan elektronlar yarıiletkenden metale geçerler. Bu geçiş her iki malzemenin E_F seviyeleri eşit oluncaya kadar devam eder. Yarıiletkenden metale elektron geçişi olduğundan dolayı yarıiletkenin yüzeyi civarındaki elektron konsantrasyonu azalacaktır. Yarıiletkendeki elektron konsantrasyonunun azalması yarı iletkenin E_C , E_F ve E_V seviyelerinin düşmesine yol açarken metalin birim hacimdeki elektron konsantrasyonu çok yüksek olmasından dolayı metaldeki değişim ihmal edilecek kadar azdır. Denge durumuna ulaşıldığında

yalnızca bir tane fermi seviyesi olacağından dolayı MS sistemin bir tane sabit E_F seviyesi olacaktır. Bu duruma ulaşıldığında yarıiletkenden metalle geçen elektronlar yarıiletkenin yüzeyine yakın yerde iyonize olmuş katkı atomları bırakırlar. Yarıiletkenin n -tipi özelliğini kazandıran bu katkı atomları elektronlarını kaybettiklerinden dolayı yarıiletkenin yüzeyinde, bükülmenin olduğu arayüzeyde serbest yükte bulunmayacağından bu bölge yüksek dirençli, pozitif yüklü ve yalıtkan bir bölge olur (Habanyama, 2018; Rhoderick ve Williams, 1988; Sharma, 1984).



Şekil 3.1 $\phi_m > \phi_s$ durumu için Metal - n -tipi bir yarıiletken kontak için enerji bant diyagramları. (a), Birbirinden ayrı nötral malzemeler (b) Kontak oluştuktan sonraki denge durumu. (Sze ve Ng, 2006)

Bir metal n -tipi yarıiletken kontakta, $\phi_m > \phi_s$ ise elektronlar denge kurmak için yarıiletkenden metale doğru yayılırlar. Elektron difüzyonu, metalin ve yarıiletkenin fermi seviyelerinin arayüz bölgesi boyunca aynı seviyede hizalanması neden olur. n -tipi yarıiletkenden metale yayılan elektronlar geride dengelenmemiş katkı iyonları bıraktığında birleşme noktasının yarıiletken tarafında bir pozitif yüklü W_D tükenme bölgesi oluşur. Birleşimin metal tarafına karşılık gelen kısmı negatif yük ile yüklenmiş olur. Tükenme bölgesindeki dengelenmemiş katkı iyonlarından kaynaklanan pozitif yük, metal üzerinde indüklenen negatif yük ile eşleşir ve yarıiletkendeki pozitif yükten metaldeki negatif yüke doğru yönlendirilen bir elektrik alanı ile sonuçlanır. Bu W_D tükenme bölgesi boyunca yarı iletken bant yapısında sürekliliği korunmak için yarıiletkenin enerji iletim bandı E_C ve değerlik enerji bandı E_V 'nin bükülmesine neden olur. Elektrik alanı, bağlantı noktası boyunca elektron difüzyonunu durdurduğu ve

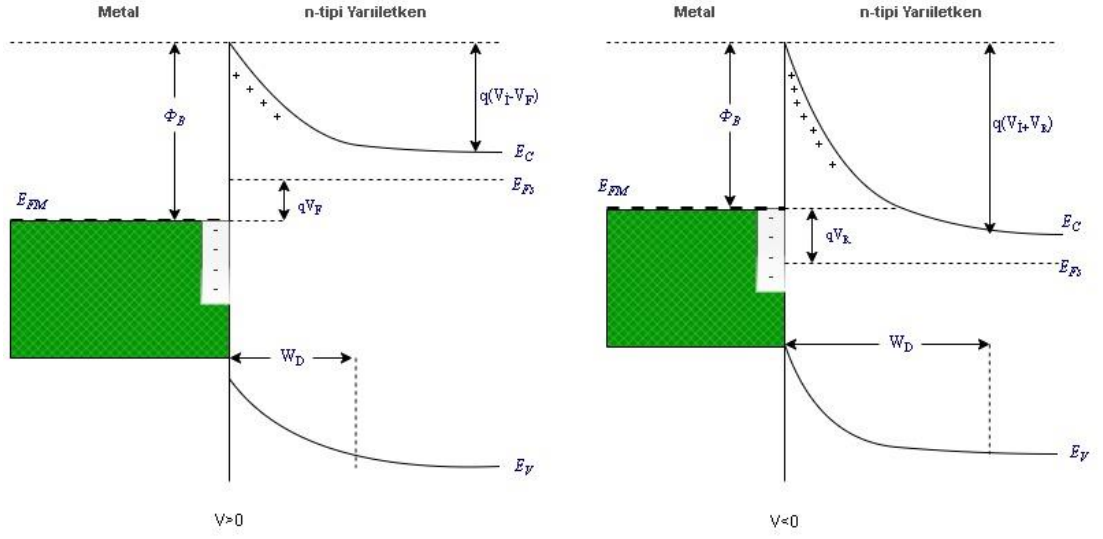
dolayısıyla bir denge noktasına ulaştığı bir büyüklüğe kadar artar. Yarıiletkenden metale daha fazla elektron difüzyonunu engelleyen bağlantı noktası boyunca karşılık gelen indüklenmiş denge temas potansiyeli V_D , $\phi_m - \phi_s$ arasındaki farktır. Yani bir elektronun yarı iletkenden metale geçmesi için $q(\phi_m - \phi_s)$ enerjisi gereklidir. Bu engelin yarıiletken tarafındaki yüksekliği, (Sharma, 1984; Habanyama, 2018; Rhoderick ve Williams, 1988)

$$qV_D = \phi_m - \phi_s \quad (3.6)$$

metal tarafındaki yüksekliği ise

$$q\phi_B = q(\phi_m - \chi_s) \quad (3.7)$$

kadardır. Burada q elektronun yükü ve V_D difüzyon potansiyelidir. V_D engeli, bağlantı noktası boyunca bir voltaj uygulanarak yükseltilebilir veya alçaltılabilir. Metale bir doğru polarma öngerilim voltajı $+V$ uygulandığında, Şekil 3.2.(a) 'da gösterildiği gibi temas potansiyeli V_D' dan $V_D - V$ 'ye düşürülür. Yarıiletkenin Fermi seviyesi (E_{FS}) E_{FM}' ye göre yükselir, ϕ_B azalır ve W_D daralır. Bu, uygulanan voltaj arttıkça akım akışının arttığı doğru polarmadadır. Sonuç olarak, yarı iletkenin iletim bandındaki elektronlar tükenme bölgesi boyunca metale yayılabilir. Elektron akış yönü, ilişkili akım yönünün tersi olduğundan bu bize metalden yarı iletkene doğru ileri akımı verir. Metale negatif bir voltaj uygulandığında E_{FS} seviyesi düşer ve bant bükülmesi artar dolayısıyla elektronların bağlanma enerjisi artar. Bağlanma enerjisindeki artış, engelin daha yüksek olduğu ve elektronun bunun üstesinden gelmek için daha fazla enerjiye ihtiyaç duyduğu anlamına gelir, bu daha az akımın aktığı ters polarmadır (Habanyama, 2018; Rhoderick ve Williams, 1988; Sharma, 1984).



Şekil 3.2 Metal - n -tipi doğrultucu kontak (a) Doğru polarma durumunda (b) Ters polarma durumunda (Sze ve Ng, 2006)

MS ve benzeri cihazların önemli olan ortak özellikleri doğrultma oranıdır. Doğru polarmada çekilen akımın, benzer değerdeki ters polarmadaki akıma oranı olarak söylenebilir. Bu oranın iyi diyotlarda 10×10^6 dan daha büyük olması beklenir. İdeal diyotlarda ise bu oran sonsuz olarak kabul edilir. Doğrultma oranının yüksek olması aynı zamanda R_{sh} yüksek ve R_s düşük olması demektir. R_s değerinin sıfıra yaklaşması ve R_{sh} değerlerin ise 10×10^8 den daha büyük olması iyi bir diyot için beklenen değerlerdir (Sharma, 1984; Habanyama, 2018; Rhoderick ve Williams, 1988; Sze ve Ng, 2006).

Çoğu cihazda, akımın her iki yönde de serbestçe akabilmesi için şarj enjeksiyonuna minimum dirençli kontaklar üretmek gerekir. Omik kontaklar, cihazın aktif bölgesi üzerindeki düşüşe kıyasla akım uygulaması ile nispeten küçük bir voltaj düşüşü sergiler. Bu kontaklar, Ohm Yasasına ($V=IR$) uyan $I-V$ tepkileri veya uygulanan voltajın bir fonksiyonu olarak sabit bir direnç nedeniyle omik kontaklar olarak adlandırılır (Neamen, 2003; Sze ve Ng, 2006).

Schottky-Mott modeline göre, MS arayüzündeki ϕ_B , ϕ_m azaltılmasıyla en aza indirilebilir. $\phi_s \geq \phi_m$ ise otomatik olarak omik kontak davranışı ortaya çıkar. Bu tür bir kontakta yük taşıyıcılarının akışında herhangi bir kısıtlama yoktur. Metal ve yarı iletken arasında yakın bir temas sağlandıktan sonra, metal üzerindeki elektronlar yarı iletkenin E_C 'ına akar. Bu kontak yapısında yarıiletkeninde deplasyon bölgesi oluşmaz

ve bu yüzden yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene geçmek isteyen elektronlar için bir potansiyel engeli yoktur. Bu elektronlar sınır bölgesinin yakınında bir yüzey yükü olarak birikir ve metalin sınırında pozitif yükler bırakırlar. Bu pozitif yükler aynı zamanda yüzey yükleridir ve MS arayüzünden yaklaşık 0,5 Å uzaklıkta ince bir seviye oluştururlar. Tükenme yerine yük birikimi (metalden yarıiletkene) ihmal edilebilir bir voltaj düşüşü ile gerçekleşir (Rhoderick ve Williams, 1988; Yao, 2017).

Üç şekilde omik kontak elde edilebilir. Doğrultucu olamayan engel (non-rectifying barrier), tünelleme engeli (tunnelling barrier) ve termal difüzyon yöntemiyle omik kontak oluşturulabilir. İlk olarak doğrultucu engel yüksekliği küçük bir kontak ile elektronların her yöne geçiş yapabileceği bir omik kontak oluşturmak. İkinci olarak, doğrultucu engel yüksekliği büyük olsa da yarıiletken yüzeyine katkılama yapılarak elektronların tünelleme yapabileceği dar potansiyel engeli oluşturmak. Üçüncü olarak da termal difüzyon ile dar bant aralıklı ve tabanla aynı özellikte bir tabaka oluşturarak omik kontak elde edilir (Korkut, 2009).

Teorik olarak, bu kontaklar sinyal bozulması olmadan akım ve uygulanan voltaj arasında doğrusal bir ilişki sergilemeli ve tam akım aktarımı nedeniyle hiçbir güç tüketmemelidir. Omik kontaklardaki beklenti, yarıiletkene en düşük dirençte akım almak veya yarıiletkenden akım vermektir. Kontak direncinin değeri ise kontak kalitesini belirleyen en önemli parametredir. Omik kontaklar, akım ve uygulanan voltaj arasındaki fark olarak tanımlanan özgül kontak direnci (ρ_c) ile karakterize edilir. ρ_c arayüzün hemen üstünde, altında ve içinde (veya içinden) direnci tanımlayan bir karma bir terimdir. Sıfır ön gerilimde ρ_c denklemi ise; (Shaw, 2018)

$$\rho_c = \left(\frac{\partial I}{\partial V} \right)_{V=0}^{-1} \quad (3.8)$$

Burada ρ_c , $\Omega \cdot \text{cm}^2$ cinsinden tanımlanır. Omik kontaklarda iletim için iki mekanizma göz önünde bulundurulur, tünelleme ve TE. TE, engel küçük olduğunda doğrusal davranışa yol açarak, (Shaw, 2018).

$$\exp\left(\frac{q\phi_b}{kT}\right) \quad (3.9)$$

ile orantılı özgül dirençle sonuçlanabilir. Bu durum idealde, engellerin Fermi seviyesi sabitleme veya iş fonksiyonu farkı ile oluşup oluşmadığına bağlı olarak geniş bant aralıklı malzemeler için uygun olmayabilir. Yarı iletkenin katkısı yeterince yüksekse tükenme bölgesinin küçük olması ve tünelleme akımının oluşması beklenmektedir. Bu şekilde, taşıyıcının engel boyunca tünelleme olasılığını kolaylaştacaktır. Bu nedenle, özgül kontak direnci tünelleme süreci ile orantılıdır ve şu şekilde tanımlanır: (Shaw, 2018)

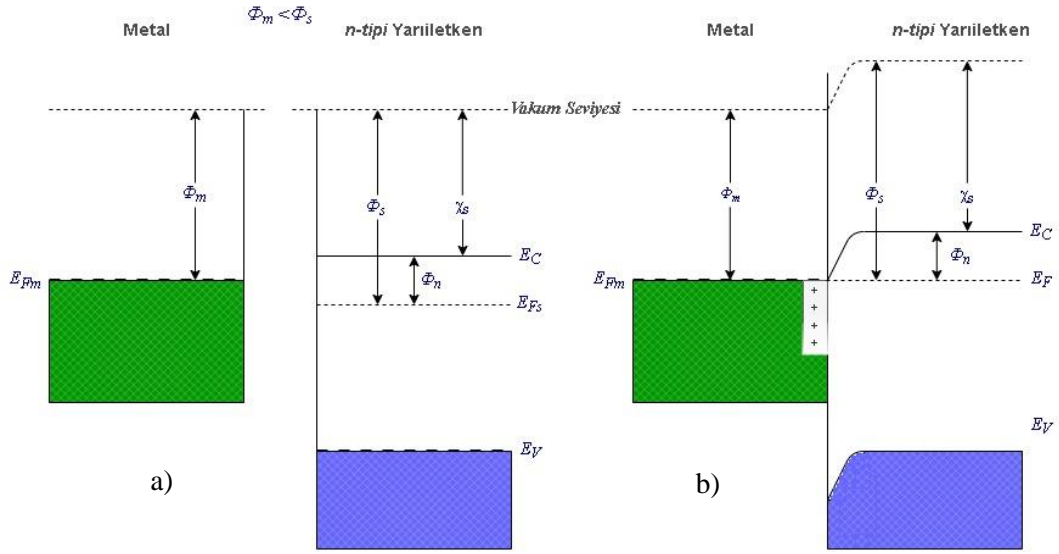
$$\rho_c \propto \exp\left(\frac{q\phi_b}{E_{00}}\right) \quad (3.10)$$

Burada E_{00} , metal-yarıiletken kontaklarda baskın iletim mekanizmasını belirlemek için kullanılacak bir fonksiyondur ve şu şekilde verilir:

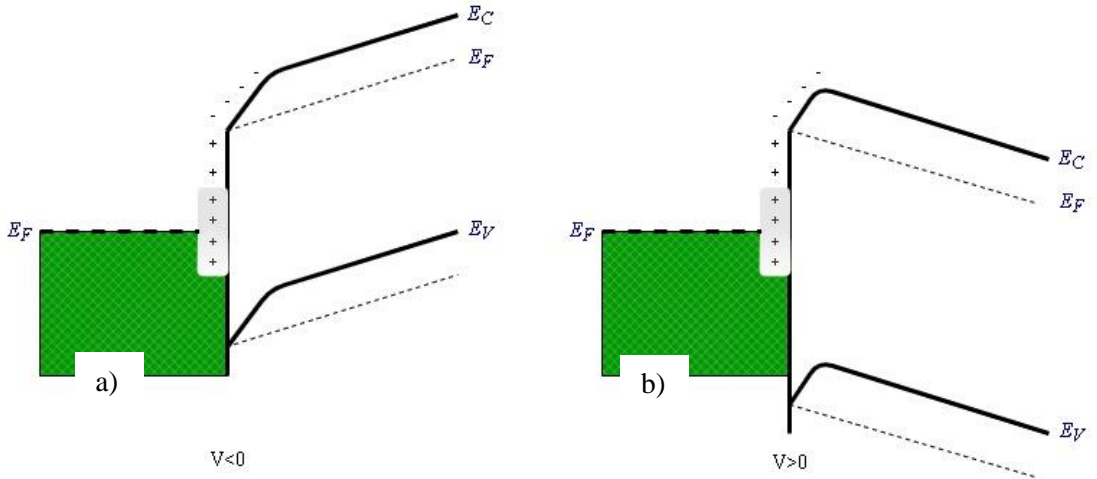
$$E_{00} = \frac{q\hbar}{2} \sqrt{\frac{N_d}{m^*\epsilon_s}} \quad (3.11)$$

Burada \hbar Planck sabiti ve m^* bir elektronun etkin kütesidir. Eğer $kT \ll E_{00}$ ise tünelleme akımının baskın olduğu söylenir (Shaw, 2018).

Omik kantağa pozitif (+V) voltajı uygulanırsa, potansiyel Schottky kontakta olduğu gibi sadece Schottky bölgesinde değil bütün yarıiletken gövde boyunca dağılacaktır. Negatif (-V) voltaj uygulandığında yarıiletkenin aşırı n-tipililiğinden dolayı elektronların karşılaşacağı engel yine çok küçük olur ve elektronlar kolayca metalden yarıiletkene doğru geçerler (Sze ve Ng, 2006).

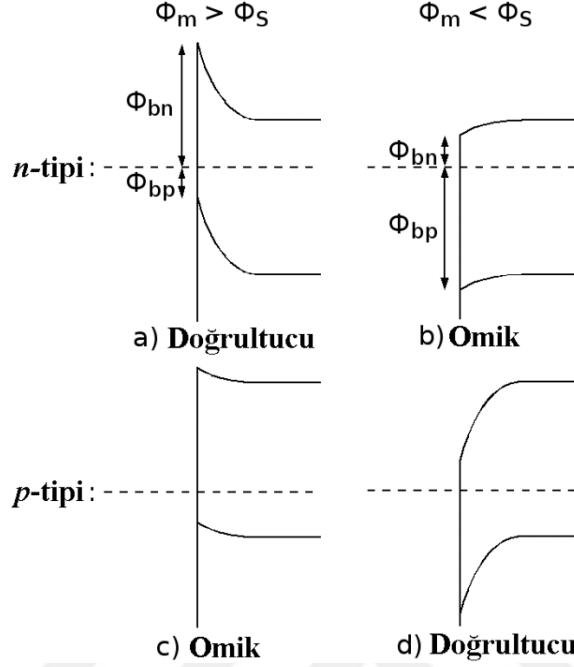


Şekil 3.3 Metal - n -tipi omik kontak (a) Kontak durumundan önce (b) Kontak durumundan sonra



Şekil 3.4 Metal - n -tipi yarıiletken omik kontakların yarıiletken tarafına negatif ve pozitif gerilim uygulanması durumunda enerji-band diyagramı (a) Doğru polarma durumunda (b) Ters polarma durumunda

Referans vakum seviyesinde ϕ_m (metal iş fonksiyonu) ϕ_s (yarıiletkenin iş fonksiyonu) olmak üzere, Metal-yarı iletken kontakların dört olası kombinasyonu mevcuttur.



Şekil 3.5 Farklı katkılama polaritelerine ve değişen ϕ_m 'na sahip yarıiletkenler üzerindeki MS kontakların bant yapıları (Pearman, 2007)

Doğrultucu veya omik kontakların oluşumu, belirtildiği gibi alt tabaka katkısına ve metal ve yarı iletkenin göreceli iş fonksiyonlarına bağlıdır. Şekil 3.5’de gösterilen ikisi n -tipi yarıiletken ve ikisi p -tipi yarıiletken alt tabakalar üzerinde dört olası MS bağlantı kombinasyonu vardır. Her bir alt tabaka tipi için, metal ve yarıiletken iş fonksiyonlarının göreceli büyüklükleri, doğrultucu veya omik bir kontakın oluşup oluşmadığını belirler.

Metal – n -tipi yarıiletken alt tabaka kontak için $\phi_m > \phi_s$ ise doğrultucu kontak, $\phi_m < \phi_s$ ise omik kontak oluşur. Metal – p -tipi yarıiletken alt tabaka kontak için $\phi_m > \phi_s$ ise omik kontak, $\phi_m < \phi_s$ ise doğrultucu kontak oluşur (Pearman, 2007).

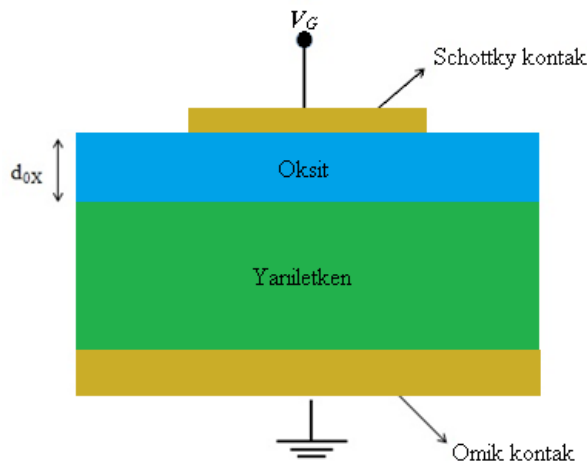
Doğrultucu kontaklarda yük taşıyıcıların metalden yarıiletkene yada yarıiletken metale iletiminin daha kolay olması durumuna doğrultma denir. SBDs’ in ilettime geçmesi için gerekli gerilim değerinde, doğru polarma akımlarının (I_F), ters polarma akımlarına (I_R), oranı doğrultma oranı (RR) olarak adlandırılır (Tan S. , 2016).

$$RR = I_F/I_R \quad (3.12)$$

SBDs' in performansını ve kalitesini belirleyen bu oran idealde yaklaşık 10^8 ile 10^{10} civarındadır (Tan S. , 2016).

3.1 Metal – Oksit – Yarıiletken Yapısı

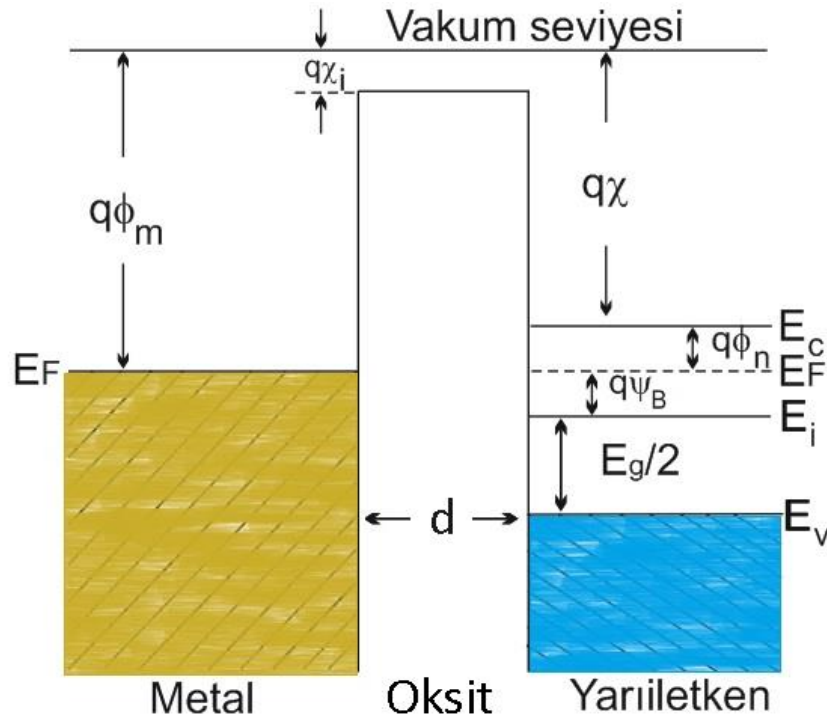
Metal – oksit – yarıiletken (MOS) günümüzde kullanılan en yaygın mikroelektronik yapılardandır. MOS yapıları oluşturmak MS yapılarına benzer ancak MOS yapı, yarıiletken alttaş üzerine ince bir yarıiletken-oksit malzeme kaplanır ve üzerine doğrultucu metal kontak oluşturulur. Yarıiletkenin diğer yüzeyine ise yine bir metal ile omik kontak oluşturulur. Bu şekilde MOS yapı oluşturulur. MOS yapılar, elektriksel özellikleri yönünden kapasitörlere benzemektedirler. Bunun sebebi metal ile yarıiletken arasındaki dielektrik tabakadır. Oksit tabaka dielektrik özelliğiyle metal ile yarıiletken arasını hem izole eder hem de yük geçişlerini düzenler. Bu nedenle yarıiletken-oksit arayüzündeki arayüz durum yoğunluğuna son derece duyarlıdır. Arayüz durumları mikrofabrikasyon işlemi sırasında veya çalışma sırasında oluşturulabilir. SBDs yapısı içinde arayüz tabakası ve seri direnç olması durumunda üzerine uygulanan gerilim (V_G), seri direnç ve diyot tarafından ($V_G = V_D + V_R + V_i$) bölüşülecektir (Tan S. O., 2016; Xiao ve Huang, 2010).



Şekil 3.6 Bir MOS yapının şematik gösterimi

3.1.1 İdeal MOS Yapı

İdeal bir MOS yapının, $V=0$ durumunda enerji bant diyagramı Şekil 3.7’ de gösterilmiştir. İdeal MOS olarak tanımlanan yapının hem oksit hem de yarıiletken-oksit arayüzeyinde serbest yüklerin ve kusur durumlarının olmadığı varsayılır ve seri direncinin ihmal edilecek kadar düşük seviyede, kısa devre direncinin de $M\Omega$ seviyesinde olması gerekmektedir (Uslu, 2010; Tan S. O., 2016).



Şekil 3.7 İdeal bir MOS – n-tipi yapısının enerji bantdiagramı ($V=0$)

Bir dış ön-gerilim olmadığı durumda, ϕ_m ve ϕ_s arasındaki fark sıfırdır.

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_B \right) = \phi_m - (\chi + \phi_n) = 0 \quad (3.13)$$

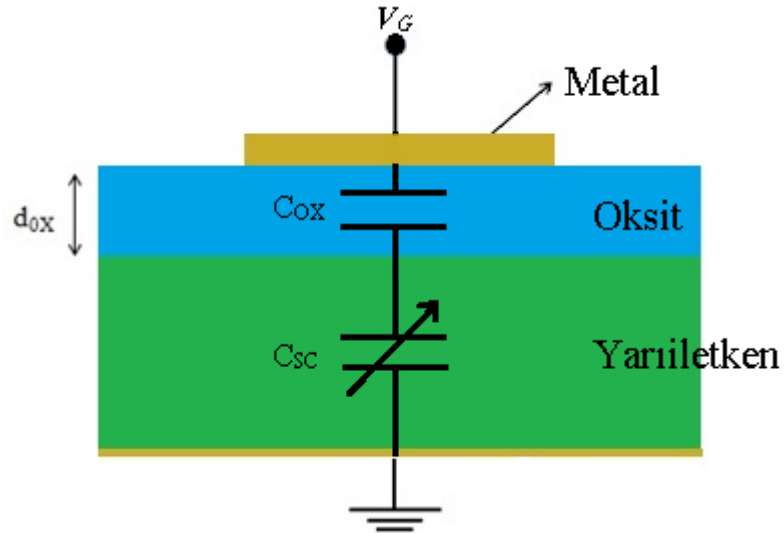
Burada χ_i yalıtkanın elektron ilgisi, E_g yarıiletkenin yasak enerji bant aralığı ve ψ_B ise E_F ile saf fermi enerji seviyesi E_i arasındaki enerji farkıdır (Sze ve Ng, 2006).

Taşıyıcıların DC ön-gerilim şartları altında yalıtkana doğru geçişi mümkün olmadığından yalıtkanın özdirenci sonsuzdur. Oksit tabakaya bitişik olan yarıiletken

ve metal yüzeyindeki yükler herhangi bir ön-gerilim altında eşit sayıda ancak zıt yönde olacaktır (Uslu, 2010; Sze ve Lee, 2012).

İdeal MOS yapıda Schottky kontakta bir dış ön-gerilim uygulandığında yarıiletkende yük değişimi oluşur. Yarıiletkendeki metale oranla serbest hareketli yük yoğunluğu uygulanan voltaja bağlı olarak daha az seviyededir. Yarıiletken arayüzey bölgesindeki bantlarda bükülmeye neden olan Q_{sc} uzay yükü termal dengede potansiyel büyüklüğü ile belirlenmektedir. Yarıiletken katkılama çeşitlerine göre yarıiletkende çoğunluk ve azınlık taşıyıcılar olarak anılan yükler uygulanan voltaja bağlı olarak uzay yükü bölgesini veya arayüzey bölgesindeki yığılmaları oluşturmaktadırlar. Akım iletimi SBDs' da hem elektronlar hem de deşikler tarafından sağlanmaktadır. Bu sebepten akımda çoğunluk taşıyıcı akımı ve azınlık taşıyıcı akımı olarak iki şekilde isimlendirilmektedir (Uslu, 2010; Sze ve Lee, 2012; Tan S. O., 2016).

MS kontaklar paralel plakalı bir kondansatöre benzetilmesindeki sebep metal ile yarıiletken arasındaki bir dielektrik tabakadan dolayı bir kapasitans oluşmasıdır. Bu kapasitans MOS kapasitans olarak adlandırılmaktadır. Bir MOS kapasitansına karşılık gelen eşdeğer elektronik devresi Şekil 3.8' de gösterilmiştir (Uslu, 2010; Sze ve Lee, 2012).



Şekil 3.8 MOS kapasitans eşdeğer devresi (Uslu, 2010)

MOS yapının kapasitansı C , oksit tabakanın kapasitansı C_{ox} ve uzay yükü kapasitansı C_{sc} ’ den oluşur. Bu eşdeğer devrenin çözümünde toplam kapasitansı 3.14 eşitliğinde verilir (Uslu, 2010).

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{1}{C_{ox}} \quad (3.14)$$

MOS yapının eşdeğer kapasitansı, C_{ox} ve C_{sc} kapasitanslarının seri bağlanmasına eşdeğerdir. Yalıtkan veya oksit arayüz tabakanın kapasitansı C_{ox} 3.15 eşitliğinde verilir.

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{d_{ox}} A_{ox} \quad (3.14)$$

Burada ϵ_{ox} yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti, A_{ox} Schottky kontağın alanı ve d_{ox} ise arayüzey tabakanın kalınlığıdır. MOS yapının kapasitansındaki değişimi C_{ox} etkilemeyeceği sadece C_{sc} uzay yükü kapasitansı belirler. Bir MOS kapasitörün uygulanan voltaj durumları için yarıiletkenin yüzeyinde yığılma, tüketim ve terslenim bölgeleri olarak üç bölge bulunabilir (Sze ve Lee, 2012; Uslu, 2010; Tan S. O., 2016).

3.1.2 Yığılma Bölgesi

Zıt yüklerin birbirini çekme prensibinde olduğu gibi metal kontağa uygulanacak negatif voltaj sonucunda oluşan elektrik alan yarıiletkendeki çoğunluk yük taşıyıcıları olandeşikleri yarıiletken arayüzüne çekecektir. E_F ideal diyotta yük akışı olmadığı için yarıiletken tarafında sabit kalacaktır. Taşıyıcı yoğunluğu üstel fonksiyon olarak $E_F - E_V$ enerji farkına bağlı olacağından, bant bükülmesi yarıiletken yüzeyinin yakın yerlerine çoğunluk taşıyıcı olandeşiklerin yığılması sonucu gerçekleşecektir. Çoğunluk taşıyıcıların arayüzeyinde birikimi nedeniyle yığılma ya da yığılım olarak adlandırılır. E_V yarıiletken arayüzeyinde E_F ’ ye yaklaşmakta ve E_C ’ de bunun neticesinde yukarı yöne doğru bükülmektedir. Bu durumda arayüzeyde yığılan yük yüzey yüküdür ve $C_{sc} \rightarrow \infty$ ’ a gider, kapasitansı $C \rightarrow C_{ox}$ olmaktadır (Sze ve Lee, 2012; Tan S. O., 2016).

3.1.3 Tüketim Bölgesi

Metal kontağa uygulanacak olan küçük bir pozitif voltaj ile oksit içinde oluşacak elektrik alan yarıiletken arayüzeyindekideşikleri aynı yüklerin birbirlerini itmesi prensibinde olduğu gibi yüzeyden uzaklaştırır. Bu durumda yarıiletken yüzeyindedeşiklerin yoğunluğu azalmaya başlar ve bant bükülmesi aşağı yöne doğru gerçekleşir. E_C ' nin yarıiletken yüzeyine yakın bölgelerinde elektronlar toplanmaya başlar ve tüketim bölgesi olarak adlandırılan uygulanan voltaj ile değişen W_d genişliğindedeşiklerin azaldığı bir bölge yarıiletken yüzeyinde oluşmuş olur (Sze ve Lee, 2012; Tan S. O., 2016).

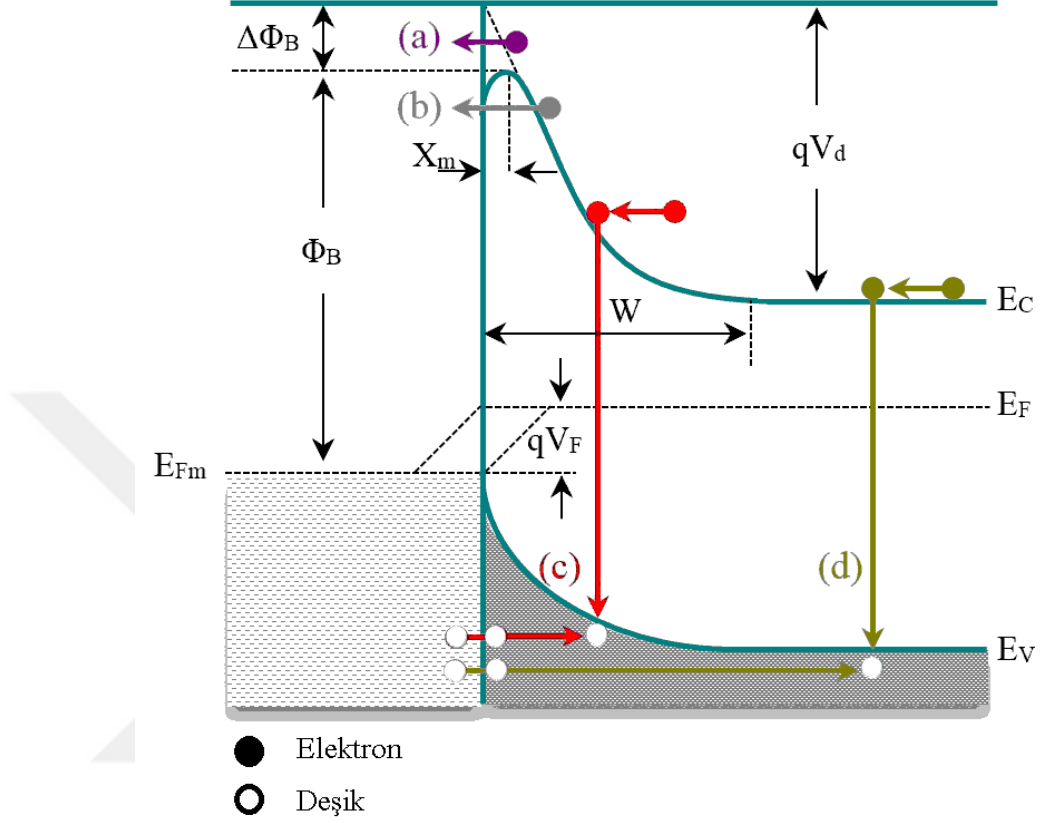
3.1.4 Terslenim Bölgesi

Tüketim bölgesi oluşurken uygulanan voltaja oranla çok daha büyük bir pozitif voltaj metal kontağa uygulandığında bantlardaki bükülme aşağı yönde olacaktır. Yarıiletken yüzeyindeki ve azınlık taşıyıcılar durumundaki elektronların sayısının artmaya başlamasıyla elektron yoğunluğudeşik yoğunluğundan büyük olacaktır. Bu aşamada yarıiletken yüzeyi artık p -tipi değil de n -tipi yarıiletken gibi davranmasını sağlar ve yarıiletken yüzeyindeki yüklerin işaret değiştirmesinden dolayı terslenim olarak isimlendirilir (Sze ve Lee, 2012; Tan S. O., 2016).

3.2 MS Doğrultucu (Schottky) Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları

MS kontaklarda, harici bir elektriksel alan altındaki akım iletim mekanizmalarının (CCMs) belirlenmesi oldukça önemli olmakla birlikte akım iletimi azınlık yük taşıyıcılarından ziyade genellikle çoğunluk yük taşıyıcıları tarafından oluşturulur. Sıcaklık, R_s , gerilimin polaritesi, yarıiletken tipi, katkı atomlarının yoğunluğu (N_A veya N_D) ve arayüzey durumları (N_{ss}) gibi elektriksel parametreler akım iletim mekanizmalarını belirlemede oldukça önemli olmakla birlikte tayinlerini zorlaştırır. MS veya MOS tipi SBDs' de akım bir malzemeden diğerine yük hareketinden dolayı akar. Bu yük hareketinin temelinde; engel üzerinden TE, Difüzyon Teorisi, TED, engelin içinden Kuantum Mekaniksel Tünelleme, deplasyon bölgesi içinde elektron vedeşğin birleşmesi (taşıyıcıların rekombinasyonu) veya elektron vedeşiklerin oluşması (taşıyıcıların jenerasyonu) ve Azınlık taşıyıcı enjeksiyonuna eşit olan, yarıiletken

nötral (bant bükülmesinin olmadığı) bölgesinde taşıyıcı rekombinasyonudur (Aydoğan, 2015; Çiçek, 2016; Özavcı, 2014).



Şekil 3.9 Doğru polarma altındaki bir metal-*n*-tipi yarıiletken Schottky engelli kontağın farklı akım iletim mekanizmalarını (a)Engel üzerinden Termiyonik emisyon (b)Engelin içinden kuantum mekaniksel tünelleme (c)Deplasyon bölgesi içinde taşıyıcıların rekombinasyonu (elektron ve deşiklerin birleşmesi) veya jenerasyonu (elektron ve deşiklerin oluşması) d)Azınlık taşıyıcı enjeksiyonuna eşit olan, yarıiletken nötral (bant bükülmesinin olmadığı) bölgesinde taşıyıcı rekombinasyonu (Çiçek, 2016)

Şekil 3.9’da doğru polarma altındaki bir metal-*n*-tipi yarıiletken Schottky engelli kontağın farklı akım iletim mekanizmalarını gösteren enerji band diyagramı bulunmaktadır.

3.2.1 Engel Üzerinden Termiyonik Emisyon (TE) ile Akım İletimi

Sıcak bir yüzeyden termal enerji nedeniyle taşıyıcıların (elektron veya deşik) salınması olayına termiyonik emisyon (TE) denir. Bu durum, metal-*p*-tipi yarıiletken yapılarda deşikler, metal-*n*-tipi yarıiletken yapılarda elektronlar yani çoğunluk taşıyıcılar tarafından gerçekleştirilir. SBDs veya MS kontaklarda TE, taşıyıcıların yeterince

kazanacağı termal enerji nedeniyle potansiyel engeli aşarak metalden yarıiletkene veya yarıiletkenden metale geçmesi esnasındaki akım iletim mekanizmasını açıklamaya çalışmaktadır (Tan S. O., 2016).

Engel üzerinden TE işlemi genellikle *Si* ve *GaAs* ile yapılan Schottky kontaklarda baskın olan bir akım iletim mekanizmasıdır. İdeal diyotlarda baskın olan mekanizma TE'dir. Engelin içinden kuantum mekaniksel tünelleme ile deplasyon bölgesi içinde taşıyıcıların rekombinasyonu veya jenerasyonu mekanizmaları ideal olmayan durumları ifade ederler. Uygulanan polarma, kontak bölgesinde oluşacak elektrik alan ve yüzey durumları MS kontaklarda hangi akım iletim yönteminin geçerli olduğunu belirleyen parametredir (Aydoğan, 2015; Tan S. O., 2016).

Bir elektronun engel üzerinden yarıiletkenden metale geçişi, deplasyon bölgesindeki yüksek elektrik alanla gerçekleşir. Elektronun bu bölgeden karşıya geçişi, sürüklenme ve difüzyon işlemleri ile gerçekleşir. Elektronların metale geçişleri metaldekideşik yoğunlukları tarafından kontrol edilir. Bu yüzden üzerinden emisyon ile deplasyon bölgesindeki difüzyon ve sürüklenme işlemleri arka arkaya etkili olurlar ve daha yüksek direnç veren işlem akımı belirlemektedir (Aydoğan, 2015).

Difüzyon teorisi ile TE mekanizmaları arasındaki fark, deplasyon bölgesindeki kuazi-Fermi seviyelerinin konumları ile gösterilmiştir. Difüzyon teorisine göre kontağa doğru polarma gerilimi uygulansa da elektronlar dengededirler. Bu Şekil 3.9'da noktalı çizgilerle gösterildiği gibi arayüzeyde kuazi-Fermi seviyeleri metalin E_F 'si ile uyumludur. Ancak TE teorisinde metale geçen elektronlar metalin elektronlarından daha büyük enerjiye sahiptirler ve Şekil 3.9'da kesikli çizgilerle gösterildiği gibi deplasyon bölgesi boyunca E_F seviyeleri hemen hemen yataydır (Aydoğan, 2015).

TE deplasyon bölgesinde sürüklenme ile difüzyonun etkilerini ihmal edilir ve kT enerjisi ile karşılaştırıldığında engel yüksekliğinin daha büyük olduğunu öngörülmektedir. Şekil 3.9'a bakıldığında sadece kinetik enerjisi potansiyel engel yüksekliğini aşanların engelin tepesine çıkabileceği görülmektedir. Kontakta herhangi bir gerilim uygulanmasa bile metalden yarıiletkene veya yarıiletkenden metala az sayıda yük taşıyıcısının geçeceği istatistiki olarak bilinmektedir. Ancak, karşılıklı

olarak geçen taşıyıcıların sayısı ortalama birbirine eşit olduğu için uygulanan bir gerilim yoksa aygıttan geçen net akım sıfır olur (Aydoğan, 2015).

Kontağa bir pozitif V gerilimi uygulandığı zaman metalden yarıiletkene geçmek isteyen elektronların gördüğü engel yüksekliği değişmez. Ancak yarıiletkenin metale doğru geçen akım uygulama geriliminin polaritesine ve büyüklüğüne göre değişir. Akım (I) ile gerilim (V) arasındaki ilişki; (Aydoğan, 2015; Cowley ve Sze, 1965)

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.15)$$

ile verilir. Denklemdaki I_0 gerilim uygulanmadan ($V=0$) önceki termal etki vb. nedenlerden var olan sızıntı akımı, k Boltzmann sabiti ($8,625 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$) ve T de K cinsinden sıcaklıktır. I_0 akımı (Aydoğan, 2015; Cowley ve Sze, 1965)

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \quad (3.16)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlikteki A kontağın etkin alanı, A^* yarıiletkenin Richardson sabiti olarak bilinir ve

$$A^* = \frac{4\pi e m_n^* k^2}{\hbar^3} \quad (3.17)$$

eşitliğiyle verilir. Eşitlikteki \hbar Planck sabiti, m_n^* bir elektronun etkin kütlesi ve e elektronik yüküdür. Buna göre m_n^* dışındaki tüm parametrelerin sabit olduğu göz önünde bulundurulursa, yarıiletkenin Richardson sabiti elektronun etkin kütlesi ile değişir. Etkin kütle yarıiletkenin cinsine ve doğrultuya bağlı olduğu için her yarıiletken için farklı bir Richardson sabiti değeri olmalıdır. Yaygın olarak kullanılan bazı yarıiletkenlerin Richardson sabitleri Tablo 3.1'de verilmiştir (Aydoğan, 2015; Cowley ve Sze, 1965).

Tablo 3.1 Yaygın olarak kullanılan bazı yarıiletkenlerin Richardson sabitleri

Yarıiletken	$A^*(A.cm^{-2}K^{-2})$
<i>n</i> -Si	112(±6)
<i>p</i> -Si	32(±2)
<i>n</i> -GaAs	8,16
<i>p</i> -GaAs	74,4
<i>n</i> -InP	9,4
<i>p</i> -InP	60

TE' nin sonucuna göre verilen denklemi yüksek mobiliteli yarıiletkenlerde deplasyon bölgesindeki elektron çarpışmalar ihmal ederek yazılır. Bu eşitlikler birleştirildiğinde I ile uygulama V arasındaki eşitliğin genel hali; (Aydoğan, 2015; Cowley ve Sze, 1965)

$$I = \left[AA^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_B}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.18)$$

olur.

Crowell ve Sze gibi bazı araştırmacılar TE ile difüzyonu birleştirip TED olarak vermektedir. Bu teoride, engelin olduğu deplasyon bölgesi içinde elektronların Maxwell dağılımına uyduklarını ve bu bölgede klasik sürüklenme ve difüzyon denklemlerinin kullanılabileceğini kabul etmişlerdir. Engelin tepesine yakın bölgede elektrik alanı çok büyüktür ve bir ortalama serbest yol içinde dağılım fonksiyonu önemli ölçüde değişir. Bu durumda akımı artık sürüklenme ve difüzyon diye iki kısma ayırmak mümkün olmaz. Ayrıca engelin tepesine yakın yerlerde Maxwell dağılımını anizotropik almak gerekir çünkü metal tarafına geçen elektronlar geri dönmeyecektir (Aydoğan, 2015; Cowley ve Sze, 1965).

1942'de Bethe'ye göre engelin üzerinden geçen elektronlar artık yarıiletkene geri dönmezler. Crowel ve Sze'de metaldeki optik fonon saçılmanın etkilerini ve engelden kuantum mekaniksel yansımaların etkilerini dikkate alarak Bethe'nin teorisini ele almışlardır. Engelden geçerek metale geçen bir elektron emisyon veya bir optik fonon soğurmasından sonra diyot akımında bir azalmaya neden olarak yarıiletkene geri dönebilir. Bununla birlikte engele ulaşan tüm elektronlar metale geçmezler. Kuantum mekaniğine göre enerjisi engel enerjisinden daha büyük olan bir elektronun

yarıiletkene dönme ihtimali sıfır değildir. Ayrıca enerjisi engeli aşmaya yetmeyen bir elektronun bile kuantum mekaniksel olarak engeli tünelleme ile geçme ihtimali de vardır (Aydoğan, 2015).

3.2.2 Engel İçinden Kuantum Mekaniksel Olarak Tünelleme

SBDs' de elektronların yarıiletkeniden metale geçişi aynı zamanda kuantum mekaniksel tünelleme ile de mümkün olmaktadır. Kuantum mekaniksel tünelleme daha çok katkı konsantrasyonu yüksek olan yarıiletkenlerle metaller arasında oluşturulan kontaklarda meydana gelir. Çünkü katkı konsantrasyonu arttıkça E_F n -tipi yarıiletkenide iletkenlik bandının tabanına doğru yaklaşır. Katkı konsantrasyonu yarıiletkenin atomlarının konsantrasyonuna yaklaşıncaya E_F , E_C 'nin içine doğru akmaya başlar. Bu tür yarıiletkenler katkılanmış n -tipi yarıiletken olarak adlandırılır. Yarıiletkenlerde difüzyon ve TE mekanizmalarının yanı sıra elektronlar engelin dar olduğu kısımlarda kuantum mekaniksel tünelleme ile engelin içinden geçebilirler. Depstasyon bölgesinin genişliği katkı konsantrasyonu ile ters orantılı olduğu için yüksek katkı durumunda enerjisi E_F civarında olan elektronlar bu bölgesi engeli delemiş gibi tünelleme yolu ile yarıiletkeniden metale geçerler. Bu işlem alan emisyonu (FE) olarak bilinir. Burada alan ile kastedilen kontak bölgesindeki elektrik alanıdır. Bu olay özellikle yüksek katkı durumunda ve düşük sıcaklıklarda gerçekleşir. Daha yüksek sıcaklıklarda fermi enerjisinden daha büyük enerjiye sahip olarak engelin tepesine doğru, daha dar engelli bir bölge ile karşılaşabilirler. Anma enerjileri engeli aşmaya yetmediğinden bu bölge içinden tünelleme yapabilirler. Elektronların termal olarak uyarılması ile enerjilerin artırılmasından dolayı bu işlem termiyonik alan emisyonu (TFE) olarak adlandırılır. Sıcaklık daha da artırılınca elektronların kinetik enerjileri daha da artacak ve engeli aşarak yarıiletkeniden metale TE ile geçeceklerdir. İdeal SBDs' da ölçülen engel yüksekliğinin büyük olması istendiği için saf TE ile iletim istenilen iletim mekanizmasıdır (Aldemir, 2013; Aydoğan, 2015).

Fermi seviyesinin üzerindeki enerjilere sahip olan elektronların sayısı hızlı bir şekilde, engelin kalınlığı ve yüksekliği azaldığı için TFE' nun katkısının maksimum olduğu bir E_M enerjisi olacaktır. Sıcaklık kademeli olarak biraz daha arttırılırsa tüm elektronların engelin zirvesine ulaşacağı yani TE' nin baskın iletim mekanizması olduğu bir limit değerine ulaşır (Aldemir, 2013; Aydoğan, 2015).

3.3 Schottky Diyotlarda Seri Direnç (R_S) Etkisi

R_S , SBDs' deki yarıiletken kısmında oluşan tükenim alanı dışında kalan nötral bölgenin akımına karşı gösterdiği dirençtir. R_S etkisi gerilim değeri artmaya başladıkça görünmeye başlayarak geçen akımın azalmasına sebep olur. Seri dirençli bir SBDs' e TE teorisine göre ele alındığındaki geçen akımın denklemi; (Ocak, 2010; Sze ve Lee, 2012)

$$I = \left[AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.19)$$

olur. R_S etkisi göz önüne alındığında uygulanan V , R_S üzerinde oluşan $I.R_S$ kadarlık gerilim nötral bölge üzerinde düşüreceği dikkate alındığında $V-I.R_S$ olarak denkleme eklenerek; (Ocak, 2010; Sze ve Lee, 2012)

$$I = \left[AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{V-I.R_S}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.20)$$

olarak yazılır (Ocak, 2010; Sze ve Lee, 2012).

3.4 Norde Fonksiyonları ile Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi

Doğru polarma altındaki SBDs TE teorisine göre $I-V$ ilişkisi; (Norde, 1979)

$$I = \left[AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{qV_0}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.21)$$

şeklindedir. Burada V_0 engel tabakası boyunca gerilim düşmesidir. SBDs doğru polarma $I-V$ karakteristiklerinde ($n>1$) gibi ideal durumdan bazı sapmalar gösterebilir. Bundan dolayı akım ifadesi; (Norde, 1979)

$$I = \left[AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV_0}{nkT}\right) \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{qV_0}{kT}\right) \right] \quad (3.22)$$

şeklini alır. Buradaki $\exp\left(-\frac{eV_0}{kT}\right) \ll 1$ durumu dikkate alınır ve Schottky engel diyotuna dışarıdan uygulanan V geriliminin bir kısmı R_S üzerinde $V_0=V- I.R_S$ kadar düşeceği dikkate alınır eşitlik; (Norde, 1979)

$$I = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{q(V-IR_S)}{nkT}\right) \quad (3.23)$$

şeklinde düzenlenir.

TE teorisi doğru polarma I - V karakteristiğinin doğrusal bölgesinde kullanılır. R_S değeri yüksek olması nedeniyle doğrusal bölge $kT/e \ll V \ll IR_S$ aralığıyla sınırlanır ve daralma gösterir. Yüksek R_S etkisiyle oluşan bu durumda $\ln(I)$ - V grafiğinin değerlendirilmesi daha karmaşıklaşarak bu bölgedeki ϕ_B ve I_0 doyma akımı değerleri güvenilir bir şekilde hesaplanamaz (Norde, 1979; Rhoderick ve Williams, 1988).

SBDs doğru polarma I - V verilerini kullanarak diyotun R_S ve ϕ_B değerini hesaplamak için geliştirilen yöntemlerin ilki Norde'nin 1979'da ileri sürdüğü yöntemdir. Bu yöntem seri direnç (R_S) ve engel yüksekliğinin (Φ_B) sıcaklıkla değişmediği durumlarda uygulanmakta olduğu için sadece bir sıcaklıktaki akım-gerilim (I - V) eğrisine ihtiyaç duyulmaktadır (Norde, 1979; Rhoderick ve Williams, 1988; Atçeken, 2018).

Norde $n=1$ durumunda ϕ_B ve R_S değerini tanımlayan $F(V)$ fonksiyonunu; (Norde, 1979)

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{I(V)}{AA^*T^2}\right) \quad (3.24)$$

tanımlamıştır.

Bu ifade de β yerine q/kT yazılırsa;

$$F(V) = \frac{V}{2} - \left(\frac{kT}{q}\right) \ln\left(\frac{I(V)}{AA^*T^2}\right) \quad (3.25)$$

şeklinde ifade edilir. Diyot için R_S içeren akım denklemi $n=1$ için;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{q}{kT}(V_D - IR_S)\right) - 1 \right] \quad (3.26)$$

Burada $I_0 = AA^*T^2 \exp(-q\phi_B/kT)$, dir. $V_D > kT/q$ kabul edersek eşitlik;

$$F(V) = \phi_B + IR_S - \frac{1}{2}V \quad (3.27)$$

denkleminde dönüşür. İdeal bir durumda $F(V)$ nin değişimine karşı R_S 'nin etkisi yoktur yani, $R_S=0$ 'dır. $F(V)$ nin eğimi $-1/2$ olan bir doğru olacaktır ve $F(V)$ eksenine keşiştiği nokta ϕ_B verecektir. R_S var iken; (Norde, 1979)

$$F(V) = F_R(V) = \frac{V}{2} - \left(\frac{kT}{q}\right) \ln\left(\frac{V}{R_{AA}^*T^2}\right) \quad (3.28)$$

olur. Büyük voltajlar için bu eğimi $+1/2$ olan bir doğru çizgiye yaklaşacaktır. $F(V)$ küçük akım değerleri için ideal duruma yakın olacak ve büyük akım değerleri için $F_R(V)$ eğrisine yaklaşacaktır. Bu iki nokta arasında bir yerde $F(V)$ minimum olacaktır ki bu da dikkat edilmesi gereken noktadır (Norde, 1979).

Denklemin 3.27'nin gerilime göre türevi alındığı zaman,

$$\frac{dF}{dV} = R_S \left(\frac{dI}{dV}\right) - \frac{1}{2} \quad (3.29)$$

olur.

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV_D} \left[1 + R \left(\frac{dI}{dV_D}\right)\right]^{-1} \quad (3.30)$$

$$\frac{dI}{dV_D} = \frac{d}{dV_D} \left[I_0 \exp\left(\frac{q}{kT} V_D\right) \right] = \frac{qI}{kT} \quad (3.31)$$

V_D diyot üzerine düşen gerilimdir. dI/dV_D gerilime göre türevi alınırsa, (Norde, 1979)

$$\frac{dF}{dV} = \left(\frac{\frac{q}{kT} R_S I}{1 + \frac{q}{kT} R_S I}\right) - \frac{1}{2} \quad (3.32)$$

elde edilen bu ifade de $dF/dV=0$ yazarak F 'nin minimum olduğu noktadaki I_0 , (Norde, 1979)

$$I_0 = \frac{kT}{qR_S} \quad (3.33)$$

karşılık gelen voltaj V_D ,

$$V_0 = I_0 R_S + V_D(I_0) = \left(\frac{kT}{q}\right) + \ln\left(\frac{I_0}{AA^*T^2}\right) \quad (3.34)$$

ve minimum $F(V)$ değeri;

$$F(V_0) = \frac{V_0}{2} - \left(\frac{kT}{q}\right) \ln\left(\frac{I_0}{AA^*T^2}\right), \quad (3.35)$$

şeklinde bulunur. I_0 , V_0 , $F(V_0)$ doğru polarmadaki ölçülen değerleri kullanılarak R_S ; (Norde, 1979)

$$R_S = \frac{kT}{qI_0} \quad (3.36)$$

ve ϕ_B ;

$$\phi_B = F(V_0) + \frac{V_0}{2} - \frac{kT}{q} \quad (3.37)$$

ifadeleri bulunur. Norde tarafından geliştirilen bu yöntem daha sonra bilim insanları tarafında geliştirilmiş $n=1$ 'den farklı olduğu durumlarda da ϕ_B ve R_S değerlerinin hesaplanabileceği gösterilmiştir. Sato ve Yasamura, ϕ_B ve R_S değerlerinin sıcaklığın değiştiği durumlarda da uygulanabileceğinden en az iki farklı sıcaklıktaki $I-V$ eğrisine ihtiyaç olduğunu benzer şekilde Mc Lean tarafından da belirtilerek literatüre eklenmiştir (Sato ve Yasamura, 1985). Cibils ve Buitrago ise $F(V)=V-V_A \ln I$ yardımcı fonksiyonu kullanarak $F(V)$ nin bulunmasında farklı bir yaklaşım geliştirdiler burada V den bağımsız rastgele bir V_A gerilimi kullanmıştır (Cibils ve Buitrago, 1985). Bohlin ise SBDs $I-V$ ölçümünden elde edilen verileri kullanarak diyotun R_S , n ve ϕ_B değerini hesaplamak için iki farklı fonksiyon tanımlamıştır (Bohlin, 1986).

3.5 Cheung Fonksiyonları ile SBDs Parametrelerinin Belirlenmesi

Tek bir $I-V$ ölçümünden, ϕ_B , n , R_S gibi SBDs parametrelerinin bulunabilmesi için alternatif yaklaşımlardan birini de 1986'da Cheung ve Cheung'ler tarafından ileri sürülmüştür (Göksu, 2013).

Diyot R_S ' nin etkisi genellikle bir diyot ve içinden I akımının aktığı R dirençli bir direncin seri kombinasyonu ile modellenir. Diyot üzerindeki V_D gerilimi daha sonra diyot ve direncin seri kombinasyonu üzerindeki toplam V gerilim düşüşü cinsinden ifade edilebilir. Böylece, $V_D = V - IR_S$ ve $V_D > 3kT/q$ için Eşitlik (3.15) şu hale gelir; (Göksu, 2013; Cheung ve Cheung, 1986)

$$I = I_0 \exp\left(\frac{q(V-IR_S)}{nkT}\right) \quad (3.38)$$

denklemden akım yoğunluğu I/A cinsinden yazıldığında

$$V = IR_S + n\phi_B + \left(\frac{kT}{nq}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (3.39)$$

bu denklemde $\ln I$ ya göre diferansiyeli alınırsa;

$$\frac{dV}{d\ln I} = \frac{nkT}{q} - IR_S \quad (3.40)$$

eşitliğine ulaşırız. Bu denkleme birinci Cheung fonksiyonu adı verilmiştir. Buradaki $dV/d\ln I$ 'nin I 'ya göre grafiği çizildiğinde oluşan doğrunun eğimi R_S yi, düşey eksenini kestiği noktası n ' yi verecektir. SBDs'in ϕ_B 'sini bulmak içinde bir $H(I)$ fonksiyonu tanımlamıştır (Göksu, 2013; Cheung ve Cheung, 1986; Sze ve Lee, 2012).

$$H(I) = V + \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (3.41)$$

eşitliğinde denklem 3.39 daki V gerilimi yerine yazılırsa;

$$H(I) = IR_S + n\phi_B \quad (3.42)$$

denklemini elde ederiz. Bu denkleme de ikinci Cheung fonksiyonu adı verilmiştir. Buradaki $H(I)$ 'nin I ya göre grafiği çizildiğinde oluşan doğrunun düşey eksenini kestiği noktası $n\phi_B$ 'yi verecektir. Bu grafiğin eğimi, bu yaklaşımın tutarlılığını kontrol etmek için kullanılabilir. İkinci bir R belirlemesi de sağlar. Böylece, bir ölçümden elde edilen $I-V$ verilerinin iki farklı grafiğini eşitlik 3.40 ve eşitlik 3.42 kullanılarak

gerçekleştirilebilir ve üç temel diyot parametresini n , ϕ_B ve R_S değerlerinin tümünü belirleyebilir (Cheung ve Cheung, 1986; Sze ve Lee, 2012).



4. YÖNTEM

4.1 Aygıtların Üretimi

Aygıtların hazırlanmasındaki aşamaları sırasıyla aşağıda verilmiştir.

1. Kristallerin temizlenmesi ve hazırlanması
2. İnce film tabakanın RF kopartma yöntemiyle üretilmesi
3. DC kopartma yöntemiyle Omik ve Schottky kontakların oluşturulması

4.1.1 Kristallerin Temizlenmesi ve Hazırlanması

Bu çalışmada, [100] doğrultusuna sahip, Si (silisyum) katkılandırılmış $\rho = 1-10 \Omega \cdot \text{cm}$ öz dirençli, *n*-tipi GaAs (galyum arsenik) alttaşları $1 \times 1 \text{ cm}^2$ ebatlarında kesilip, etil alkol içerisinde bekletilmiştir. Üretime hazır hale getirebilmek için kullanılan temizlik işlem basamakları sırasıyla aşağıda verilmiştir.

1. Aseton ile 3 dakika ultrasonik yıkama
2. İsopropil alkol ile 3 dakika ultrasonik yıkama
3. De-iyonize su ile durulama-yıkama
4. Seyreltik hidroflorik asit ($\text{HF}+10\text{H}_2\text{O}$) solüsyonu içerisinde 1 dakika bekletilerek doğal oksit tabakası önlenmiştir
5. Argon gazı ile kurutma işlemi yapılarak doğal oksit tabakası önlenmeye çalışılmış ve vakum ortamında bekletme işlemi gerçekleştirilmiştir.

4.1.2 İnce Film Tabakanın RF Kopartma Yöntemiyle Üretilmesi

ZnO ince film tabakayı oluşturmak için Şekil 4.1'deki ince film kaplama sistemi kullanılmıştır. Termal buharlaştırma, RF ve DC kopartma olmak üzere 3 farklı modu bulunmaktadır. RF kopartma modu kullanılarak, $1 \times 1 \text{ cm}^2$ ebatlarındaki *n-GaAs* alttaş üzerine farklı kalınlıklarında (25-250 nm) *ZnO*, 200°C alttaş sıcaklığında kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. 1×10^{-6} Torr basınca getirilen ince film kaplama sistemi içerisinde plazma oluşturmak için $\text{Ar}:\text{O}_2$ (%60:%40) oranında gaz kullanılarak kısmi

basıncı 20 mTorr'a ayarlanmıştır. Alttaş dönüş hızı 10 rpm ve RF gücü 75 W'a ayarlanarak kaplama gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1 İnce Film Kaplama Sistemi (Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı)

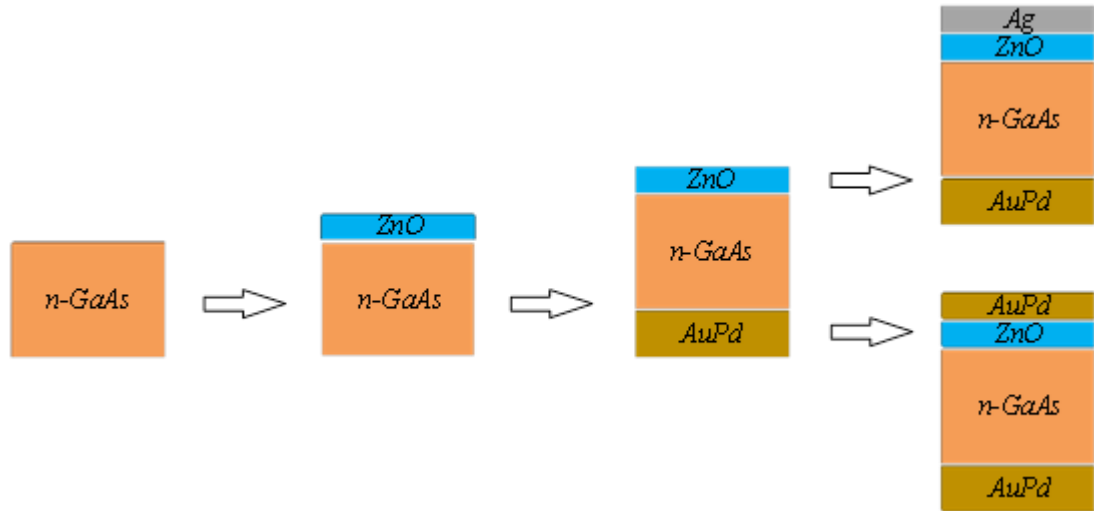
4.1.3 DC Kopartma Yöntemiyle Omik ve Schottky Kontakların Oluşturulması

ZnO ince film ile kaplı *n-GaAs* alttaş ters çevrilerek, Şekil 4.2'deki DC kopartma cihazında (Sputter Coater 108 Auto, Cressington) 500 nm kalınlıkta omik *Au-Pd* (altın-paladyum (%40-%60)) kaplama gerçekleştirmiştir. Hem kaplanan *ZnO* filmin kristal yapısının oluşması için hemde *AuPd* kontakın omik davranış sergilemesi için 630°C'de 30 dakikalık ısıl işleme tabi tutulmuştur. Argon gazı ile soğutma işlemi yapılarak doğal oksit tabakası oluşması önlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 4.2 DC Koparma Cihazı (Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı)

Alttaş tekrardan ters çevrilerek, ZnO ince film üzerine yarıçapı 1 mm olacak şekilde dairesel olacak şekilde 500 nm kalınlığında $AuPd$ Schottky kontağı oluşturulmuştur. Ayrıca, 1 mm yarıçapında ve 10-80 μm kalınlıkta gümüş boya dökülerek, gümüş (Ag) kontak elde edilmeye çalışılmıştır. Her iki işlem için ısıl işleme tabi tutulmamıştır. Üretilen numuneler Schottky kontakta kullanılan $AuPd$ veya Ag 'e göre Tablo 4.1'deki gibi gruplandırılmıştır. Şekil 4.3'de ZnO tabanlı Schottky diyodun üretim aşamaları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.3 n -GaAs altlık üzerine ZnO ince filmin kaplaması ve Schottky kontaktların oluşturulmasının şematik olarak gösterilmesi

Tablo 4.1 Üretilen numunelerin ölçümlere göre isimleri

Üretilen numune	ZnO Kalınlığı (nm)	Numune Adı
<i>AuPd / ZnO / n-GaAs / AuPd</i>	25	AuPd-25
	50	AuPd-50
	100	AuPd-100
	175	AuPd-175
	250	AuPd-250
<i>Ag / ZnO / n-GaAs / AuPd</i>	25	Ag-25
	50	Ag-50
	100	Ag-100
	175	Ag-175
	250	Ag-250

4.2 Karakterizasyon

4.2.1 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

Kaplanılan *ZnO* ince filmlerin yan kesit görüntülerini incelemek üzere taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yüksek çözünürlükte görüntüleri alınmıştır (Şekil 4.4).



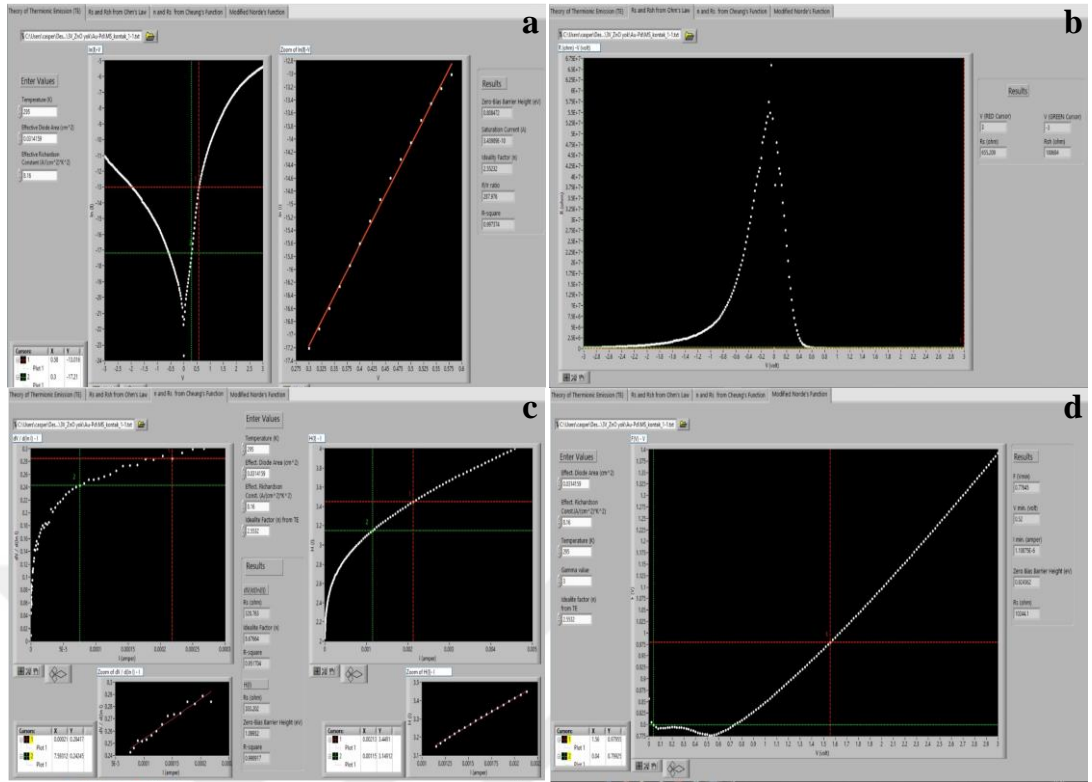
Şekil 4.4 Taramalı elektron mikroskobu (FEI, Quanta FEG 250)

4.3 Elektriksel Ölçüm

Kastamonu Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Laboratuvarı bünyesinde bulunan Keithley 2400 elektriksel ölçüm cihazı kullanılarak, Labview tabanlı program ile ± 3 V aralığında 20 mV artış ile I - V ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.5’ de ölçümlerin yapıldığı düzenek gösterilmiştir. I - V ölçümleri TE, Ohm yasası, Cheung metodu ve modifiye edilmiş Norde metoduna göre analiz edilmesi LabVIEW tabanlı bir program yazılarak I_o , n , ϕ_B , R_s ve R_{sh} değerleri elde edilebilmektedir. Şekil 4.6’ da LabVIEW ekran çıktıları görünmektedir. LabVIEW’deki sanal araçlar bir grafik arayüzü oluşturarak zaman tasarufu sağlar. LabVIEW tabanlı yazılım sayesinde parametrelerin hesaplanması, elde edilen sonuçlarının değerlendirilmesi ve grafiklerin çizilmesi düzgün ve güvenilir bir şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.5 Keithley 2400 elektriksel ölçüm cihazı (Kastamonu Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Laboratuvarı)

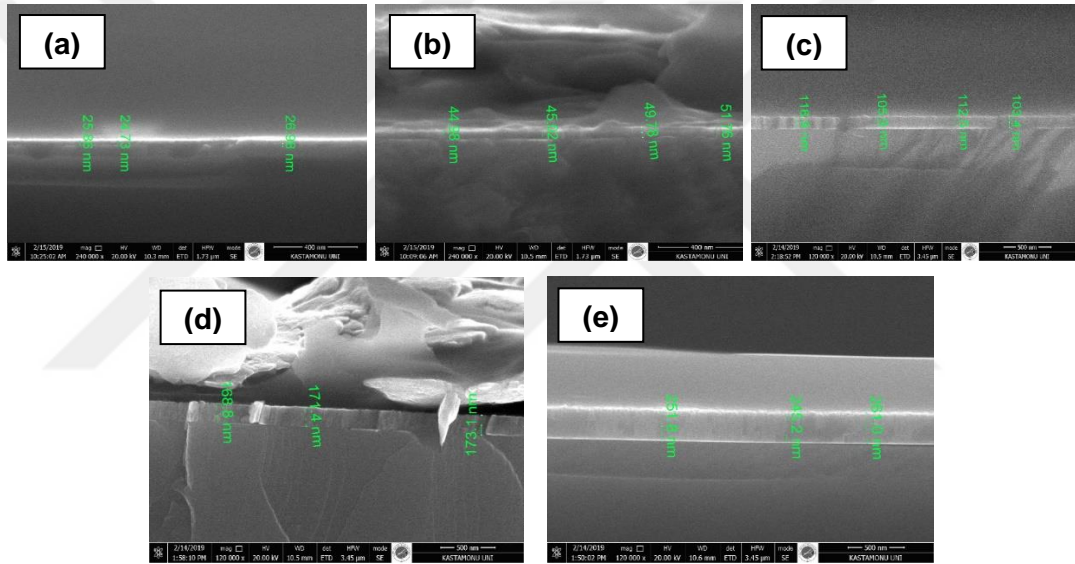


Şekil 4.6 I - V ölçümlerinin LabVIEW tabanlı bir program kullanılarak (a) TE, (b) Ohm yasası, (c) Cheung metodu ve (d) modifiye edilmiş Norde metoduna göre SBDs parametreleri hesaplanmaktadır.

5. BULGULAR

5.1 ZnO Nanoçubukların Morfolojisinin SEM ile incelenmesi

Farklı kalınlarda (25; 50; 100, 175 ve 250 nm) üretilen ZnO ince filmlerin yanıl kesitlerinin SEM görüntüleri Şekil 4.1’de verilmiştir. Şekil 4.1 (a)(c)(e)’deki SEM görüntüleri AuPd kontaklı numunelerden alınmış olup, diğer SEM görüntüleri de Ag kontaklı numunelerden alınmıştır. ZnO ince filmlerinin kalınlıkları 22-28 nm, 44-55 nm, 100-117 nm, 165-185 nm ve 240-270 nm aralıklarında değişmektedir.



Şekil 5.1 ZnO ince film kalınlıkları (a)25 nm, (b)50 nm, (c)100 nm, (d)175 nm ve (e)250 nm

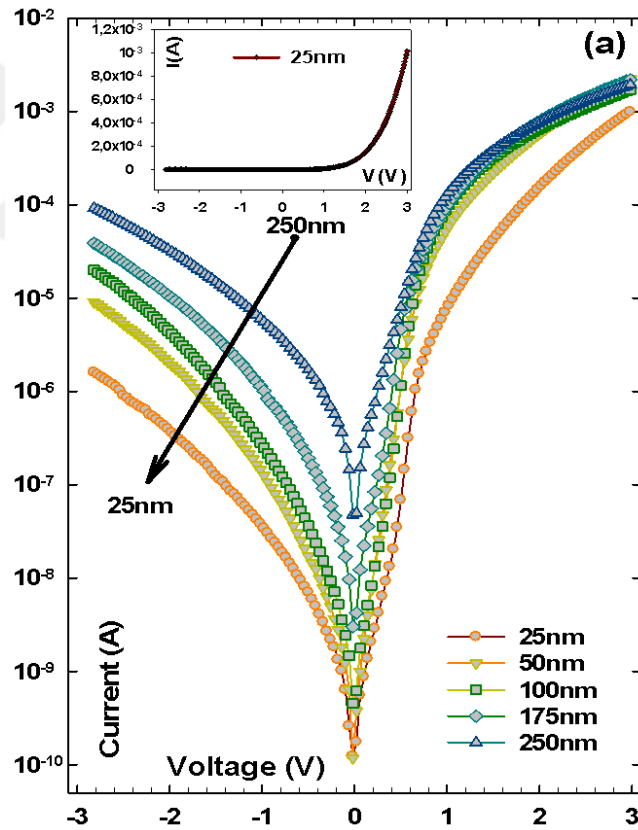
5.2 Schottky Kontaklarda Akım-Gerilim Ölçümleri

Bu çalışmada farklı kalınlarda ZnO kaplanan AuPd/ZnO/n-GaAs/AuPd ve Ag/ZnO/n-GaAs/AuPd SBDs’ lerin oda sıcaklığında ± 3 V aralığında 20 mV artış ile I - V ölçümleri gerçekleştirildi. I - V ölçümleri TE, Ohm yasası, Cheung metodu ve modifiye edilmiş Norde metoduna göre analiz edilmesi ile I_0 , n , ϕ_B , R_s ve R_{sh} değerleri elde edildi. Elde edilen bu değerler, literatürdeki değerler ile karşılaştırıldı.

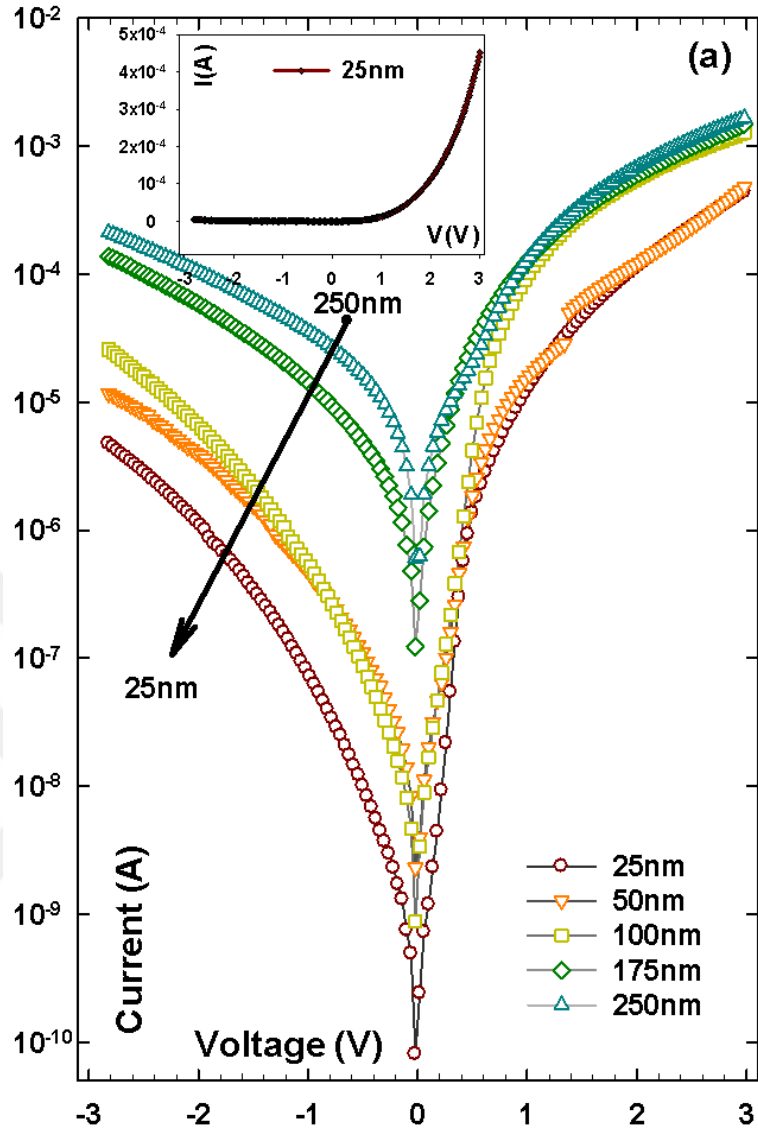
Farklı kalınlarda ZnO kaplanan AuPd grubu ve Ag grubu numunelerin yarı logaritmik I - V grafikleri Şekil 5.2 ve 5.3’te verilmektedir. AuPd grubu ve Ag grubu numunelerin doğru polarma akımlarının ters polarma akımlarından büyük olması sonucu doğrultucu

davranış gösterdiği görülmektedir. *ZnO* ince filminin kalınlığının artışı ile ters polarma akımlarının arttığı görülmektedir. Bu duruma metal tarafında görülen engel yüksekliğinin azalması neden olmaktadır (Dökme vd., 2008). Aynı zamanda, *Au-Pd* (~5.1 eV) ve *Ag* (~4.3 eV) ϕ_M farklılıklarda ϕ_B düşmesine neden olmaktadır (Sharma, 1984). Ayrıca, *AuPd* kontaktlarının kalınlıklarının 500 nm ve *Ag* kontaktlarının kalınlıklarının 10-80 μm aralığında olması sonucu kontaklardan gelen direnç katkısı da ileri ve ters polarmada aynı kalınlıklarındaki numunelerde birbirinden farklı akım değerliklerinin görülmesine neden olmaktadır.

ZnO ince filminin kalınlıklarının, *AuPd* ve *Ag* doğrultucu kontaktların SBDs etkisini anlamak için I_0 , n , ϕ_B , R_s , R_{sh} parametreleri doğru polarma $\ln(I)-V$ grafiklerinin lineer bölgesinden elde edilebilmektedir.



Şekil 5.2 Farklı kalınlıklarda *ZnO* kaplanan *AuPd* grubu numunelerin $I-V$ grafiği



Şekil 5.3 Farklı kalınlıklarda ZnO kaplanan Ag grubu numunelerin I-V grafiği

İdeal bir SBDs doğru polarma akımı I-V karakteristiği $V \geq 3kT/q$ için TE teorisine göre,

$$I = I_o \left[\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad 5.1$$

Burada V diyot üzerine düşen gerilim, n idealite faktörü, k Boltzmann sabiti, T Kelvin cinsinden sıcaklık ve IR_s terimi ise diyotun seri direnci üzerine düşen voltajdır. I_o ise ters doyum akımı olup,

$$I_o = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{B0}}{kT}\right) \quad 5.2$$

eşitliği ile verilir. Burada ϕ_B metal ile yarıiletken arasında oluşan sıfır-polarma potansiyel engel yüksekliği, A diyotun doğrultucu kontak alanı ve A^* etkin Richardson sabiti olup değeri n -GaAs için $8.16 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$ dir (Rhoderick ve Williams, 1988).

n Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 grafiğinden faydalanılarak doğru polarma $\ln(I)$ - V eğrisinin eğimi alınarak elde edilir. n hesabı için kullanılan ifade, Denk. 5.3'te tanımlanmaktadır.

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d(\ln I)} \right) \quad 5.3$$

Yarıiletken-oksit arayüzeyinde oluşan ϕ_B hesabı Denk. 5.4 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\phi_B = \frac{kT}{q} \exp\left(\frac{AA^*T^2}{I_o}\right) \quad 5.4$$

Diyodun performansını etkileyen faktörlerden birisi de doğrultma oranıdır (RR). Diyotun $RR = I_F/I_R$, doğru polarma akımlarının (I_F) ters polarma akımlarına (I_R) bölünmesi ile elde edilebilmektedir.

Tablo 5.1 AuPd grubu numunelerin TE ile hesaplanan parametreleri

Kalınlık (nm)	I_o (A)	n	ϕ_B (eV)	$RR(I_F/I_R)$	R^2
25	$1,15 \times 10^{-11}$	2,24	0,8949	453,19	0,997374
50	$4,21 \times 10^{-10}$	2,49	0,8034	196,98	0,999827
100	$9,62 \times 10^{-11}$	2,10	0,8409	66,62	0,998934
175	$1,68 \times 10^{-09}$	2,49	0,7682	44,51	0,998864
250	$1,46 \times 10^{-07}$	4,91	0,6547	17,61	0,99969

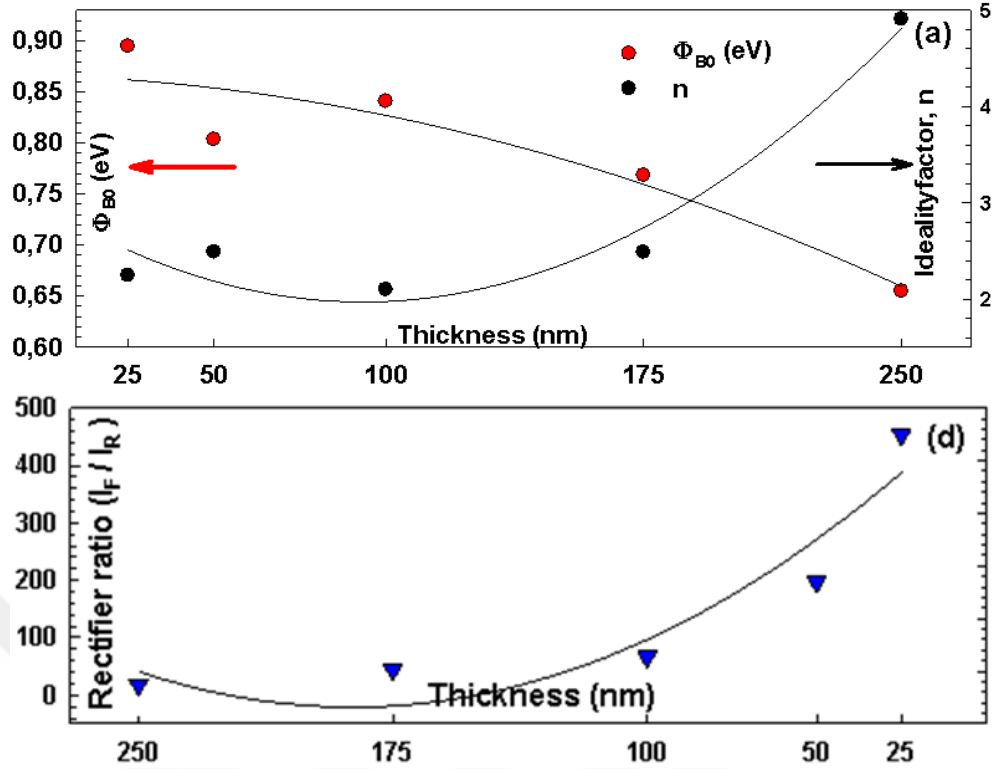
Tablo 5.2 Ag grubu numunelerin TE ile hesaplanan parametreleri

Kalınlık (nm)	I_0 (A)	n	ϕ_B (eV)	$RR(I_F/I_R)$	R^2
25	$7,24 \times 10^{-11}$	1,79	0,8299	72,43	0,998713
50	$3,92 \times 10^{-09}$	3,15	0,7285	33,41	0,99905
100	$3,88 \times 10^{-10}$	2,07	0,7873	33,63	0,999331
175	$1,15 \times 10^{-06}$	5,85	0,5557	9,37	0,994838
250	$2,80 \times 10^{-06}$	9,82	0,5184	6,49	0,998299

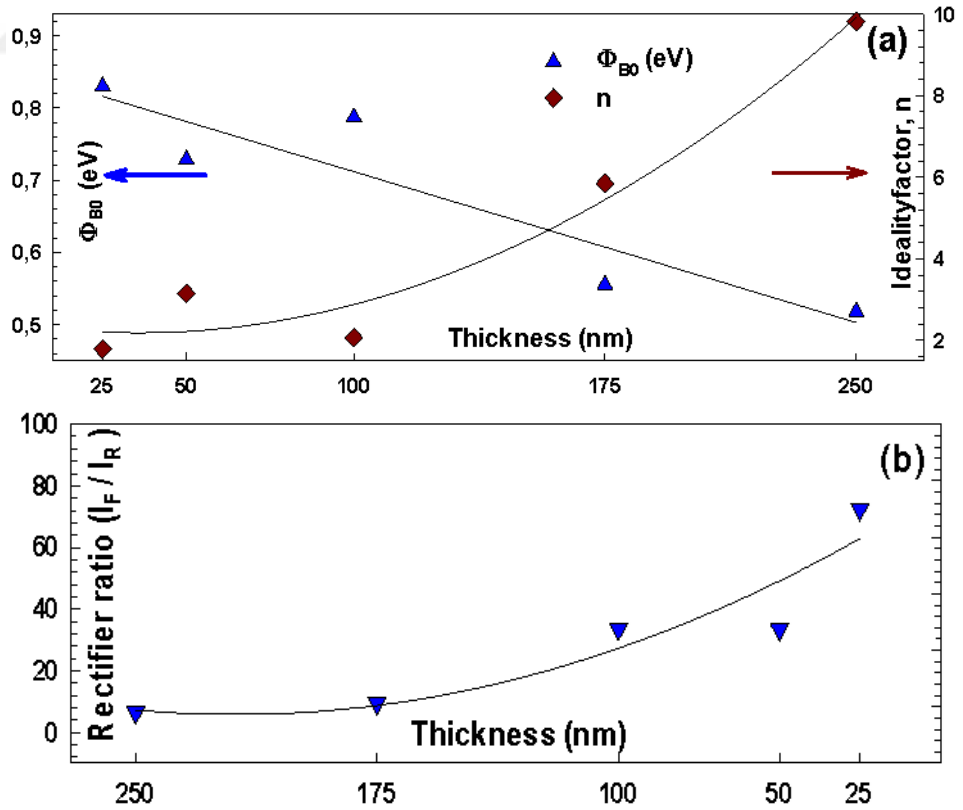
Tablo 5.1’de görüldüğü üzere *AuPd* grubu numuneler için *ZnO* ince film kalınlığının artışı ile I_0 değerlerinin $1,15 \times 10^{-11}$ A’den $1,46 \times 10^{-07}$ A’ya arttığı görülmektedir. ϕ_B ’nin de 0,8949 eV’den 0,6547 eV’ e düştüğü görülmektedir. n değeri de *AuPd*-25 için 2,24 iken *AuPd*-250’de 4,91’e yükseldiği görülmektedir. RR oranı *ZnO* ince film kalınlığının artışı ile 453,19’dan 17,61’e düştüğü görülmektedir (Şekil5.4).

Ag grubu numuneler için Tablo 5.2’de görüldüğü üzere I_0 değerlerinin $7,24 \times 10^{-11}$ A’den $2,80 \times 10^{-06}$ A’ya arttığı, ϕ_B ’nin de 0,8299 eV’ den 0,5184 eV’ e düştüğü görülmektedir. n değeri de 1,79’dan 9,82’ye yükseldiği görülmektedir. RR oranı *ZnO* kaplama kalınlığının artışı ile birlikte 72,43’dan 6,49’a düştüğü görülmektedir (Şekil5.5).

Hem *AuPd* grubu hem de Ag grubu numuneler için *ZnO* ince film kalınlığının artışı ile I_0 ve n değerlerinin arttığı, aynı zamanda ϕ_B değerlerinin düştüğü görülmektedir. Aynı şartlar altında üretilen numunelerde bile I_0 , n ve ϕ_B parametreleri farklılık göstermektedir (Leroy vd., 2005). MS arasındaki arayüzey tabaka ile potansiyel engel yüksekliğinin biçimi ve homojen olmayışı, arayüzey durumlarının yoğunluğu, yapısal kusurlar bu durumlara neden olmaktadır (Sullivan, vd., 1991; Sze ve Ng, 2006).



Şekil 5.4 AuPd grubu numunelerin ZnO ince film kalınlığına bağlı olarak (a) ϕ_B ve n , (b) RR



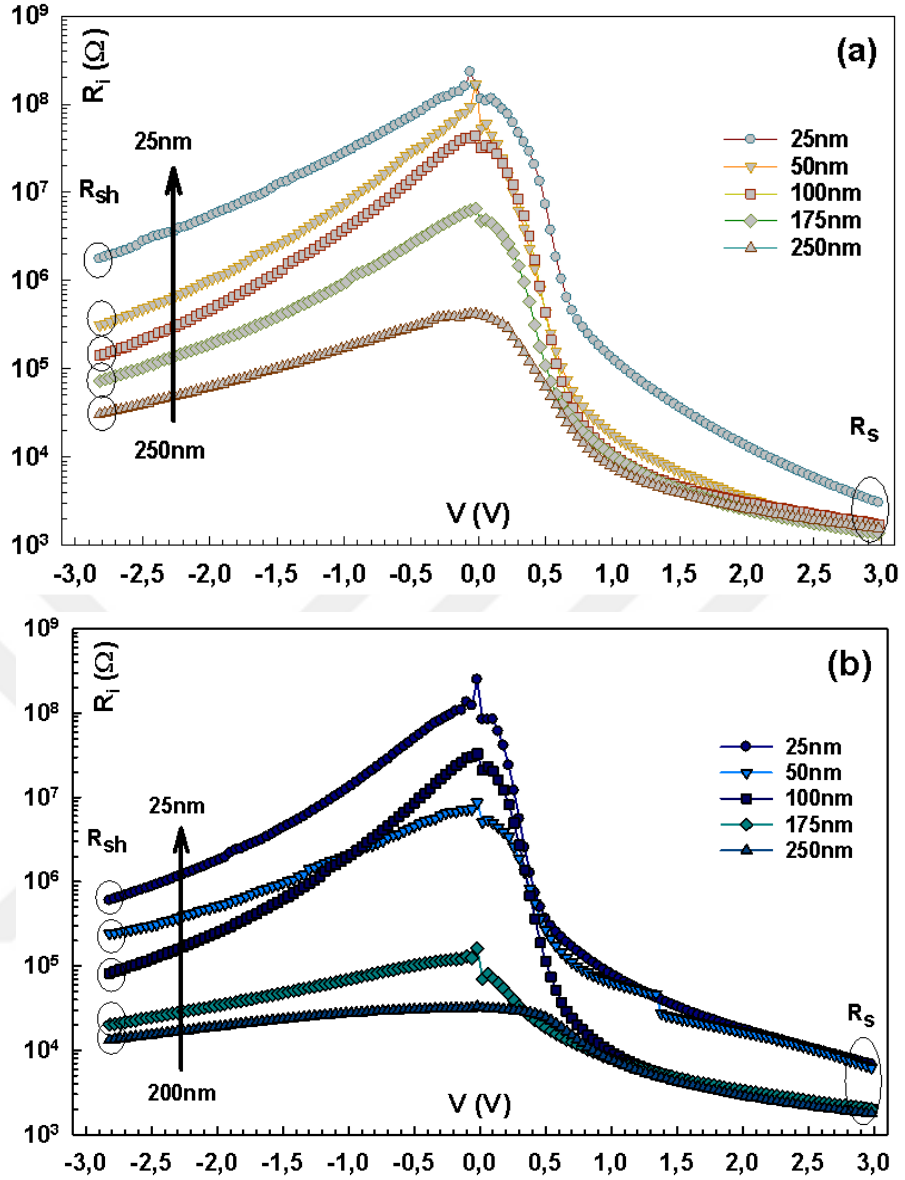
Şekil 5.5 Ag/ZnO/n-GaAs/Au-Pd numunelerin ZnO ince film kalınlığına bağlı olarak (a) ϕ_B ve n , (b) RR

Diyotun R_s ve R_{sh} diyotun kalitesini ve performansını etkileyen önemli iki parametredir (Cheung ve Cheung, 1986; Gupta vd., 1991; Norde, 1979). İdeal durumda R_s ' nin değeri 0 iken R_{sh} ' nin değeri $10^9 \Omega$ olarak bilinir. Bununla birlikte bu değerler pratikte ideal durumdan farklıdır. $AuPd/ZnO/n-GaAs$ ve $Ag/ZnO/n-GaAs$ arayüzey tabakasının R_s ve R_{sh} üzerindeki etkisi diyotun direncine (R_i) karşılık çizilen voltaj grafiği Denk. 5.5'teki ohm kanunu kullanılarak, Şekil 5.6'da görülmektedir.

$$R_i = \frac{dV_i}{dI_i} \quad 5.5$$

Burada V diyota uygulanan gerilim ve I diyotun akım değeridir. Ters polarmada direncin en yüksek değeri R_{sh} 'dir ve bu değer AuPd grubu numunelerde ZnO ince filmin kalınlığının artışı ile birlikte 1.336,310 k Ω 'dan 27,015 k Ω 'a düşmüştür. Ag grubu numuneler için ise 481,442 k Ω 'dan 12,149 k Ω 'a düşmüştür. Bu direnç kaçak akımdan meydana gelir. R_s değeri yeterince yüksek gerilime sahip doğru polarma bölgesinde AuPd grubu numunelerde 2,947 k Ω 'dan 1,534 k Ω 'a düşerken, Ag grubu numunelerde ise 6,647 k Ω 'dan 1,774 k Ω 'a düştüğü görülmektedir (Tablo 4.3).

$AuPd/ZnO/n-GaAs$ ve $Ag/ZnO/n-GaAs$ Schottky engel yapının karakteristiği hem seri direnç hem de şönt direnci direncinin gerilime bağımlı değişiminin üstel olarak azaldığı görülmektedir. Daha yüksek gerilimlerde diyotun arayüzey durumlarının değişimi ile lineer olmayan bir davranış gösterir ki, bu değişiklik kontak bölgesindeki seri dirençten kaynaklanır (Akın, 2015).



Şekil 5.6 Ohm yasasına göre ZnO ince filmlerin kalınlığa bağlı olarak (a) AuPd grubu numunelerin ve (b) Ag grubu numunelerin R_i - V_i grafikleri

Tablo 5.3 AuPd ve Ag grubu numunelerin Ohm yasası ile hesaplanan parametreleri

Kalınlık (nm)	AuPd		Ag	
	R_s (k Ω)	R_{sh} (k Ω)	R_s (k Ω)	R_{sh} (k Ω)
25	2.947	1336.310	6.647	481.442
50	1.324	261.471	6.034	201.585
100	1.713	114.127	1.999	67.218
175	1.350	60.090	1.990	18.645
250	1.534	27.015	1.774	12.149

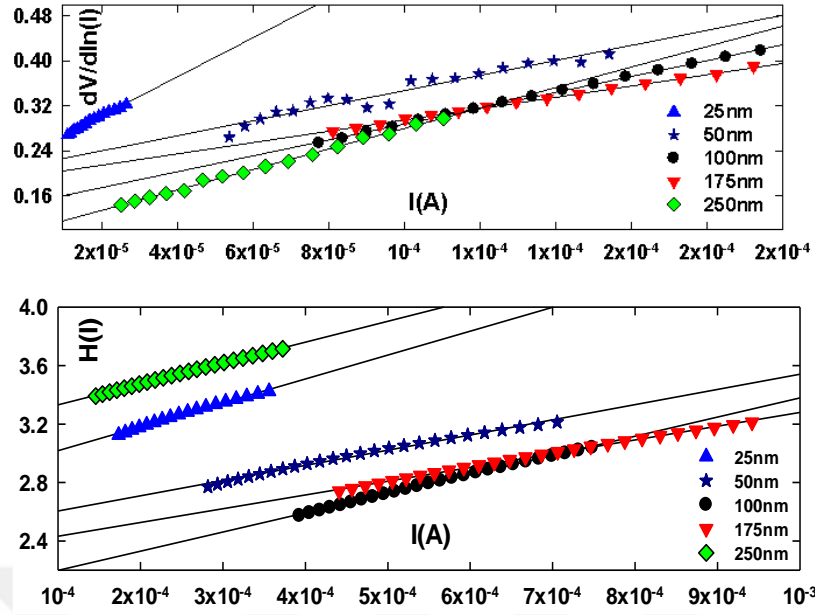
Şekil 5.2 ve 5.3'te görüldüğü üzere logaritmik I - V karakteristiği düşük doğru polarma voltajında lineer bir bölgeye sahipken R_s 'nin etkisi nedeniyle lineerlikten sapmaktadır. R_s , n ve ϕ_B 'nin değerleri Cheung ve Cheung tarafından doğru polarma karakteristiğinin lineer davranış sergilemeyen bölge için başarılı bir şekilde geliştirilmiş ve Denk. 5.6 ve Denk. 5.7 ile ifade edilmiştir (Nicollian ve Brews, 1982).

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = IR_s + \left(\frac{nkT}{q} \right) \quad 5.6$$

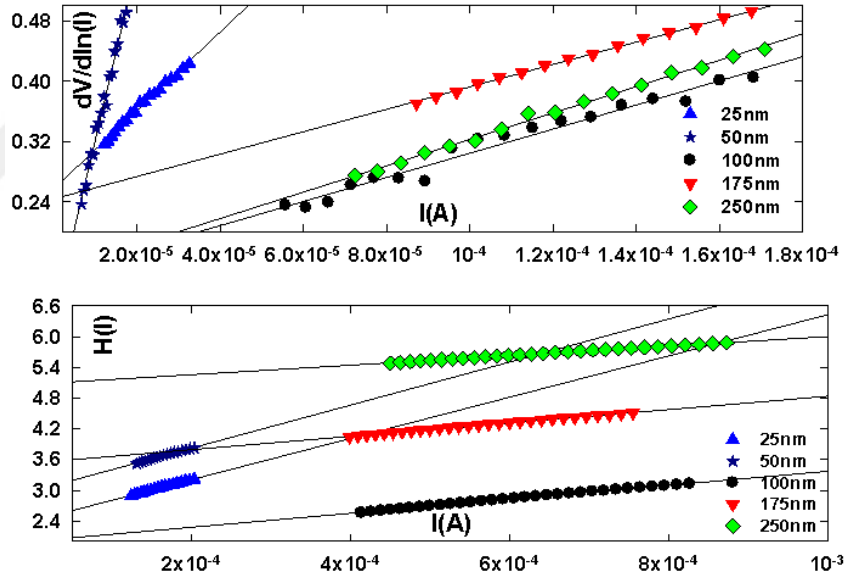
$$H(I) = V - \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) = IR_s + n\Phi_{B0} \quad 5.7$$

Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'te oda sıcaklığında $AuPd$ ve Ag grubu numunelerin sırasıyla $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ 'nin akıma bağlı karakteristiklerini göstermektedir. Bu denklemler kullanılarak R_s ve ϕ_B değerleri Cheung metoduna göre hesaplanır. $AuPd$ numuneleri için R_s değerleri $dV/d\ln(I)$ - I grafiğinde $AuPd$ -25 için 3,47993 k Ω görülüyor iken, $AuPd$ -250 için ise 1,82557 k Ω değerine düştüğü görülmektedir. $H(I)$ - I grafiğinde ise R_s değerleri 1,63427 k Ω 'dan 1,42803 k Ω 'a düşmüştür. Ayrıca, ϕ_B değerleri de 1,27213 eV'dan 0,6496 eV'a düştüğü görülmektedir. Ag numuneleri için ise R_s değerleri $dV/d\ln(I)$ - I grafiğinde Ag -25 için 5,19791 k Ω iken Ag -250 için ise 1,74963 k Ω değerine düştüğü görülmektedir. $H(I)$ - I grafiğinde ise R_s değerleri 4,02898 k Ω 'dan 0,931178 k Ω 'a düşmüştür. Ayrıca, ϕ_B değerleri de 1,3414 eV'dan 0,5165 eV'a düştüğü görülmektedir.

Ohm metodu kullanarak hesapladığımız R_s değerleri ile Cheung ve Cheung metoduna göre hesaplanan R_s değerleri karşılaştırıldığında aynı mertebede direnç değerlerinin bulunduğu görülmektedir. $AuPd$ ve Ag grubu içerisinde R_s değerleri karşılaştırıldığında $AuPd$ kullanılarak oluşturulan doğrultucu kontakın daha düşük direnç değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu da $AuPd$ ile n - $GaAs$ arasındaki mevcut doğal ara yüzey oksit tabakanın varlığının Ag 'ye göre daha düşük olduğundan kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.7 Oda sıcaklığında AuPd grubu numunelerin (a) $dV/d\ln(I)-I$, (b) $H(I)-I$ grafikleri



Şekil 5.8 Oda sıcaklığında Ag grubu numunelerin (a) $dV/d\ln(I)-I$, (b) $H(I)-I$ grafikleri

Tablo 5.4 AuPd grubu numunelerin Cheung metodu ile hesaplanan parametreleri

Kalınlık (nm)	$dV/d\ln I (\Omega)$		$H(I)-I (\Omega)$		
	$R_s (k\Omega)$	R^2	$R_s (k\Omega)$	$\phi_B (eV)$	R^2
25	3,47993	0,985608	1,63427	1,27213	0,994391
50	1,36201	0,943889	1,03933	1,00474	0,992707
100	1,41511	0,999269	1,31188	0,98526	0,998560
175	1,00727	0,997676	0,94082	0,94153	0,997791
250	1,82557	0,997471	1,42803	0,6496	0,99921

Tablo 5.5 Ag grubu numunelerin Cheung metodu ile hesaplanan parametreleri

Kalınlık (nm)	$dV/d\ln I (\Omega)$		$H(I)-I (\Omega)$		
	$R_s (\Omega)$	R^2	$R_s (k\Omega)$	$\phi_B (eV)$	R^2
25	5,19791	0,990975	4,02898	1,3414	0,997388
50	2,33943	0,990330	4,19946	0,9472	0,994960
100	1,60100	0,970563	1,36779	0,9683	0,998830
175	1,48524	0,998393	1,30477	0,6038	0,998382
250	1,74963	0,996001	0,931178	0,5165	0,999081

R_s değeri ve ϕ_B hesaplanmasında Norde alternatif bir metod önermiş olup, bu metoda göre $F(V)$ fonksiyonu Denklem 5.8’de verilmektedir (Norde, 1979).

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad 5.8$$

Burada, $I(V)$ akım ve γ ise n' den büyük bir sabittir. $F(V)$ - V eğrisi genel

olarak Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’daki gibi bir minimum verir ve bu minimumdan ϕ_B ve R_s değerleri Denklem 5.9a ve Denklem 5.9b kullanılarak hesaplanır.

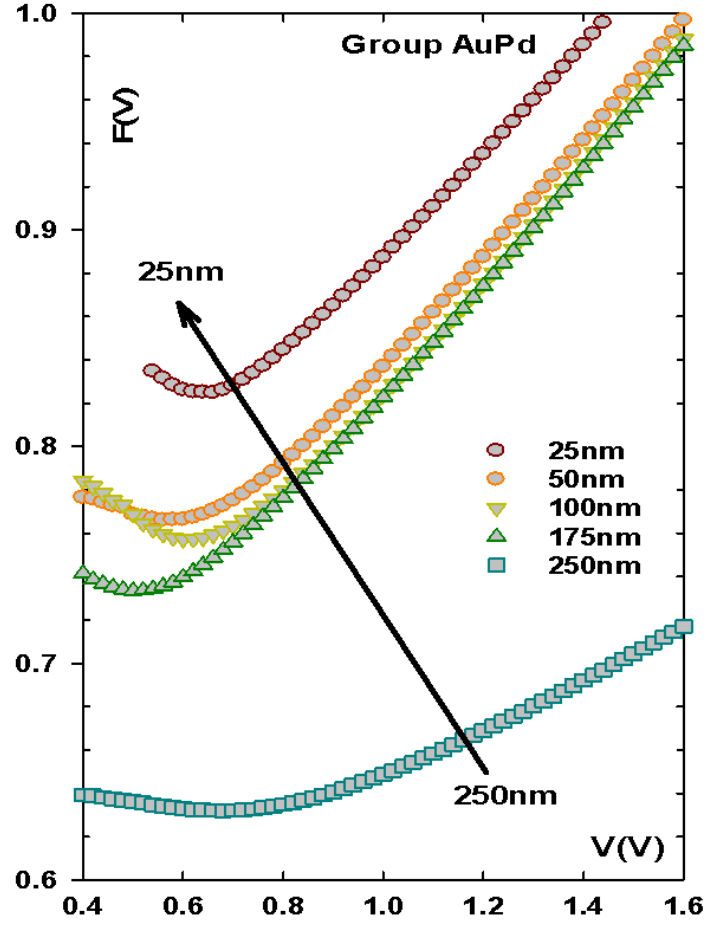
$$\Phi_{B0} = F(V_{min}) + \frac{V_{min}}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad 5.9a$$

$$R_s = \frac{(\gamma - n)kT}{qI_{min}} \quad 5.9b$$

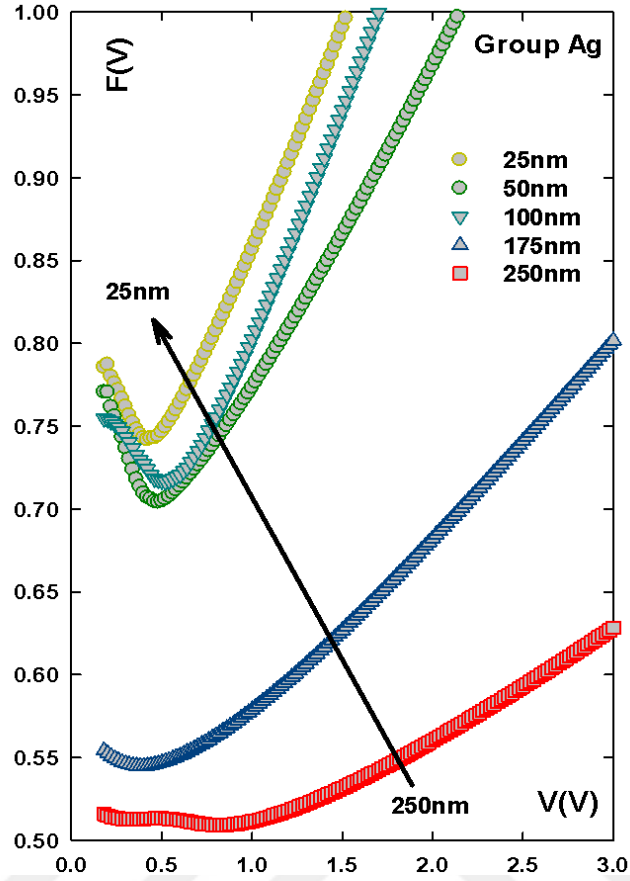
Burada $F(V_{min})$ ve V_{min} değerleri, $F(V)$ - V eğrisinin koordinatları kesen noktalarına denk gelmektedir. I_{min} değeri ise V_{min} değerine karşılık gelen akım değeridir. *AuPd* ve *Ag* grubu numunelerin Norde methoduna göre hesaplanan ϕ_B ve R_s değerleri Tablo 5.6 ve Tablo 5.7’de verilmektedir. *AuPd* grubu için *AuPd-25*’te 1,0193 eV ve 18,4869 k Ω iken *AuPd-250* için 0,7199 eV ve 0,905204 Ω değerlerine düşmektedir (Tablo 5.6). *Ag* grubu için *Ag-25*’te 0,8565 eV ve 53,8878 k Ω iken *Ag-250* için 0,5585 eV ve 0,399816 k Ω değerlerine düşmektedir (Tablo 5.7).

Norde metodu, Cheung metodu ile birbirleriyle karşılaştırıldığında ϕ_B ve R_s değerlerinde farklılık olduğu görülmektedir. Farklılığın sebebi ise Norde fonksiyonu

yalnızca ideal diyotlar için geçerlidir ve doğru polarma I - V eğrisinin tamamı kullanılarak hesaplanır. Cheung ve Cheung metodu ise daha dar bir bölgede hesaplanmaktadır (Aydemir vd., 2013).



Şekil 5.9 Oda sıcaklığında $AuPd$ grubu numunelerin $F(V)$ - V grafikleri



Şekil 5.10 Oda sıcaklığında Ag grubu numunelerin $F(V)$ - V grafikleri

Tablo 5.6 $AuPd$ grubu numunelerin Norde metodu ile hesaplanan parametreleri

Kalınlık (nm)	$F(V_{min})$	V_{min} (V)	ϕ_B (eV)	R_s (k Ω)
25	0,824764	0,66	1,0193	18,4869
50	0,766013	0,56	0,9273	4,59021
100	0,757321	0,6	0,9319	3,41132
175	0,733518	0,5	0,8748	2,83757
250	0,63208	0,68	0,7199	0,905204

Tablo 5.7 Ag grubu numunelerin Norde metodu ile hesaplanan parametreleri

Kalınlık (nm)	$F(V_{min})$	V_{min} (V)	ϕ_B (eV)	R_s (k Ω)
25	0,741899	0,42	0,8565	53,8878
50	0,704905	0,48	0,7987	18,7835
100	0,741899	0,42	0,8565	41,3852
175	0,544934	0,38	0,2738	1,97475
250	0,509325	0,82	0,5585	0,399816

Tablo 5.8’de literatürdeki çalışmalar ile üretilen numunelerin kalınlık, n , ϕ_B , R_s ve R_{sh} parametrelerinin karşılaştırılması yer almaktadır. *AuPd-25* ve *Ag-25*’in benzer kalınlıklardaki çalışmalar ile karşılaştırıldığında ϕ_B değerlerinin biraz yüksek olduğunu ama n değerlerinin yaklaşık değerler olduğunu görülmektedir. R_s değerlerinin literatür ile aynı olduğu görülürken, R_{sh} değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. *AuPd-50*’nin literatür ile karşılaştırıldığında, n değerinin iki kat düşük olduğu, ϕ_B değerinin ise iki kat yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca, R_s değerlerinin oldukça büyük olmasına karşın, R_{sh} değeri ise yaklaşık bir değer olduğu görülmektedir.



Tablo 5.8 Literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılması

Numune	Kalınlık	Temel Elektronik Parametreleri				Referans
		n	$\phi_B(eV)$	$R_s(K\Omega)$	$R_{sh}(K\Omega)$	
1 AuPd/ZnO/n-GaAs (Grup AuPd)	25nm	2,24 ^a	0,895 ^a	2,947 ^a	1.336,310 ^a	Bu çalışmada
			1,272 ^b	3,480 ^b		
Ag/ZnO/n-GaAs (Grup Ag)		1,79 ^a	0,829 ^a	6,647 ^a	481,442 ^a	Bu Çalışmada
			1,341 ^b	5,198 ^b		
			0,857 ^d	4,028 ^b		
2 Pd/WO ₃ /ZnO/Si ^b	50nm	2,55 ^a	0,68 ^a	-	-	(Liu, Yu, ve Lai, 2014)
3 Al/0% In doped ZnO/p-Si	248 nm	4,21 ^a 4,95 ^b	0,79 ^a	15,7 ^b	-	(Yıldırım ve Kocyigit, 2018)
			0,74 ^b	16,7 ^b		
			0,78 ^d	19,7 ^d		
4 Pd/Cu doped p-ZnO/n-Si Ni/Cu doped p-ZnO/n-Si	200nm	2,20 ^a 1,78 ^b 3,16 ^a 2,73 ^b	0,79 ^a	55,0 ^b	-	(Agarwal, Singh, Tripathi, ve Chakrabarti, 2016)
			0,802 ^b			
			0,73 ^a 0,66 ^b	42,6 ^b		
5 Al/ALD-grown ZnO/p-Si (D ₂) ^c	16nm	1,75 ^a 2,54 ^b	0,73 ^a	170,0 ^d		(Kaymak, vd., 2018)
			0,81 ^b	34,8 ^b		
			0,73 ^d	7,0 ^b		
6 Pd/ZnO/n-Si/Ti/Al Pd/ZnO/(Sn seed-layer/n-Si/Ti/Al) Pd/ZnO/(Zn seed-layer/n-Si/Ti/Al)	300nm	2,36 ^a 2,67 ^a 2,10 ^a	0,67 ^a	4,7 ^b	-	(Somvanshi ve Jit, 2014)
			0,67 ^b			
			0,75 ^a 0,76 ^b	4,6 ^b		
7 Au/ALD-grown ZnO/n-Si ^{b,c}	10nm	2,79 ^a 7,52 ^b	0,73 ^a	0,3 ^b	-	(Kocyigit, Orak, ve Çaldıran, 2017)
			0,15 ^b	0,5 ^b		
			0,81 ^d	0,3 ^d		
8 Au/ZnO/n-GaAs	50nm	5,88 ^a	0,41 ^a 0,47 ^d	2,379 Ω ^a 0,989 Ω ^b	1.254 ^a	(Tan, vd., 2016)

^a Thermionic emission model (TE) ^b 300K ^b Cheung -Cheung method ^c Method: Atomic Layer Deposition (ALD) ^d Norde method

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında *n-GaAs* altlık üzerine RF kopartma yöntemiyle 25; 50; 100; 175 ve 250 nm kalınlığında *ZnO* kaplanmıştır. İki farklı Schottky kontağı oluşturulmuştur. DC kopartma yöntemi ile *AuPd* Schottky ve omik kontaklar oluşturulmuştur. Diğer Schottky kontak için gümüş pasta damlatılarak *Ag* kontak oluşturulmuştur. *ZnO* ince filmin kalınlıkları SEM ölçümleri ile tespit edilmiştir. *I-V* ölçümleri gerçekleştirilerek, SBDs performansı incelenmiştir. *I-V* ölçümleri TE, Ohm yasası, Cheung ve Cheung metodu ve modifiye edilmiş Norde metoduna göre analiz edilerek I_o , n , ϕ_B , R_s ve R_{sh} parametreleri hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler, literatürdeki değerler ile karşılaştırıldı. SEM ve *I-V* ölçümlerinden elde edilen veriler ve çeşitli hesaplamalardan ortaya çıkan sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- *n-GaAs* altlık üzerine RF kopartma yöntemiyle 22-28 nm, 44-55 nm, 100-117 nm, 165-185 nm ve 240-270 nm aralığında *ZnO* kaplanılarak, istenilen kalınlıklara ulaşılmıştır.
- *I-V* ölçümlerinin TE, Ohm yasası, Cheung ve Cheung metodu ve modifiye edilmiş Norde metoduna göre analiz edilmesi ile birlikte n , ϕ_B , R_s ve doğrultma oranının, *ZnO* ince film kalınlığının artması ile birlikte azaldığı görülmektedir.
- R_s değerlerinin birbiri ile uyumlu olduğu görülürken, R_{sh} değerleri beklenildiği gibi yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir.
- ϕ_B değerlerinin TE göre modifiye edilmiş Norde metodunda biraz daha yüksek olduğu görülmektedir.
- 25 nm ve 50 nm *ZnO* kaplı SBDs' lerin, diğer numunelere göre en iyi performans gösterdiği görülmektedir.

AuPd SBDs' ler parametreleri *Ag* SBDs' lere elde edilen parametreler ile kıyaslandığında, *AuPd* SBDs' lerin daha iyi performans gösterdiği görülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abbasoğlu, E. (2013). Kimyasal Püskürtme Yöntemiyle Hazırlanan ZnO Mikroçubukların Bazı Yapısal, Optik ve Schottky Diyot Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi . Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Trabzon.
- Agarwal, L., Singh, B. K., Tripathi, S., & Chakrabarti, P. (2016). Fabrication and characterization of Pd/Cu doped ZnO/Si and Ni/Cu doped ZnO/Si Schottky diodes. *Thin Solid Films*, 612, 256-266.
- Agarwal, L., Singh, B., Tripathi, S., & Chakrabarti, P. (2016). Fabrication and characterization of Pd/Cu doped ZnO/Si and Ni/Cu doped ZnO/Si Schottky diodes. *Thin Solid Films*, 612, 259-266. doi:10.1016/j.tsf.2016.06.027
- Ahmad, Z., & Sayyad, M. (2009). Extraction of electronic parameters of Schottky diode based on an organic semiconductor methyl-red. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 41(4), 631-634. doi:10.1016/j.physe.2008.08.068
- Akcan, D. E. (2015). Yarıiletken Polimer (P3DMTFT) Arayüzeyle Au/n-GaAs Schottky Yapının Akım-Gerilim (I-V) ve Kapasite-gerilim-Frekans (C-V-f) Özelliklerinin Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Isparta.
- Akın, B. (2015). Au/ZnO/n-GaAs (MIS) Schottky Engel Diyotların (SBDs) Elektriksel Karakteristiklerinin Frekans ve Voltaja Bağlı İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara.
- Alaie, Z., Mohammad Nejad, S., & Yousefi, M. (2015). Recent advances in ultraviolet photodetectors. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 29, 16-55. doi:10.1016/j.mssp.2014.02.054
- Aldemir, D. (2013). Metal/III-V Yarıiletken n-GaAs Metal Doğrultucu Kontakların Numune Sıcaklığına Bağlı Diyot Karakteristiklerinin Bazı Metotlarla İrdelenmesi. Doktora Tezi . Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Isparta.
- Ashok, S., Borrego, J. M., & Gutmann, R. J. (1979). Electrical characteristics of GaAs MIS Schottky diodes. *Solid-State Electronics*, 22(7), 621-631. doi:10.1016/0038-1101(79)90135-7
- Asıl, H. (2010). Geniş Bant Aralıklı ZnO'nun, Elektrokimyasal Olarak Büyütülmesi, Karakterizasyonu ve Mümkün Elektronik Uygulamalarının Araştırılması. Doktora Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Erzurum.

- Atçeken, H. (2018). Metal/n-GaAs Schottky Diyot Üretimi ve Elektriksel Özelliklerinin I-V, C-V-f, G/ ω -V-f Ölçümlerinden İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi . Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Konya.
- Aydemir, U., Taşçıoğlu, İ., Altındal, Ş., & Uslu, İ. (2013). A detailed comparative study on the main electrical parameters of Au/n-Si and Au/PVA:Zn/n-Si Schottky barrier diodes. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 16, 1865–1872. doi:10.1016/j.mssp.2013.07.013
- Aydoğan, Ş. (2015). Katihal Elektronığı. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.
- Azimirad, R., Khayatian, A., Safa, S., & Almasi Kashi, M. (2014). Enhancing photoresponsivity of ultra violet photodetectors based on Fe doped ZnO/ZnO shell/core nanorods. *Journal of Alloys and Compounds*, 615, 227-233. doi:10.1016/j.jallcom.2014.06.157
- Bardeen, J. (1947). Surface States and Rectification at a Metal Semi-Conductor Contact. *Physical Review*, 71(10), 717-727. doi:10.1103/PhysRev.71.717
- Bohlin, K. E. (1986). Generalized Norde plot including determination of the ideality factor. *Journal of Applied Physics*, 60(3), 1223-1224. doi:10.1063/1.337372
- Boylu, S. (2019). Au-Cu /n-GaAs/In ve Au-Ag/n-GaAs/In Schottky Diyotların Akım-voltaj Ölçümlerinden Elde Edilen Karakteristik Parametreler Üzerine Numune Sıcaklığının Etkileri. Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Erzurum.
- Card, H., & Rhoderick, E. (1971). Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4(10), 1589-1601. doi:10.1088/0022-3727/4/10/319
- Chaliha, S. (2008). Studies of ZnSe and Indium Tin Oxide Based Thin Film Schottky Barriers and Heterojunctions for Their Electrical and Optical Properties. Doktora Tezi. Gauhati University. Guwahati.
- Cheung, S. K., & Cheung, N. W. (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49(2), 85-87. doi:10.1063/1.97359
- Cibils, R. M., & Buitrago, R. H. (1985). Forward I-V plot for nonideal Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 58(2), 1075-1077. doi:10.1063/1.336222
- Colinge, J.-P., & Colinge, C. (2002). *Physics Of Semiconductor Devices*. New York: Kluwer Academic Publishers. doi:10.1007/b117561
- Cowley, A. M., & Sze, S. M. (1965). Surface States and Barrier Height of Metal-Semiconductor Systems. *Journal of Applied Physics*, 36(10), 3212-3220. doi:10.1063/1.1702952

- Crowell, C. R., & Sze, S. M. (1966). Current transport in metal-semiconductor barriers. *Solid-State Electronics*, 9(11), 1035-1048. doi:10.1016/0038-1101(66)90127-4
- Çiçek, O. (2016). Polivinil Alkol Arayüzey Tabakalı Schottky Engel Diyotların Hazırlanması ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Karabük.
- Çiçek, O., & Kurnaz, S. (2019). LabVIEW Based Software System: Quantitative Determination of Main Electronic Parameters for Schottky Junction Structures. *Balkan Journal Of Electrical & Computer Engineering*, 7(3), 326-331. doi:10.17694/bajece.576303
- Çiçek, O., Kurnaz, S., Bekar, A., & Öztürk, Ö. (2019). Comparative investigation on electronic properties of metal-semiconductor structures with variable ZnO thin film thickness for sensor applications. *Composites Part B: Engineering*, 174, 106987. doi:10.1016/j.compositesb.2019.106987
- Çiçek, O., Tecimer, H., Tan, S. O., Tecimer, H., Altındal, Ş., & Uslu, İ. (2016). Evaluation of electrical and photovoltaic behaviours as comparative of Au/n-GaAs (MS) diodes with and without pure and graphene (Gr)-doped polyvinyl alcohol (PVA) interfacial layer under dark and illuminated conditions. *Composites Part B: Engineering*, 98, 260-268. doi:10.1016/j.compositesb.2016.05.042
- Deneuille, A., Keradec, J., Gerard, P., & Mini, A. (1974). D.C. electrical, optical and photoelectrical properties of $GexTe_{1-x}$ amorphous thin films. *Solid State Communications*, 14(4), 341-346. doi:10.1016/0038-1098(74)90914-4
- Dinçer, A. S. (2017). Geçiş Metalleri ile Katkılanmış ZnO Nanoçubuk Sentezi ve I-V Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara.
- Dökme, İ., Durmuş, P., & Altındal, Ş. (2008). Effects of γ -ray irradiation on the C–V and G/ ω –V characteristics of Al/SiO₂/pSi (MIS) structures. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B-beam Interactions With Materials and Atoms - NUCL INSTRUM METH PHYS RES B*, 266, 791-796. doi:10.1016/j.nimb.2008.01.017
- Durumlu, E. (2017). Ag/Azure A/n-Si ve Ag/Azure C/n-Si Yapıların Fotovoltaik ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Bingöl-Batman Üniversiteleri Fen Bilimleri Enstitüsü. Bingöl.
- Eroğlu, A. (2021). Au (MgO-PVP)/n-Si (MPS) Yapıların Hazırlanması, Yapısal ve Frekansa Bağlı Elektrik Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara.
- Ertuğrul, S. S. (2011). Al/Poly(Pentachlorophenyl Methacrylate) Heterojunction Yapıların Elektronik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Yozgat.

- Francombe, M. (2000). Handbook of Thin Film Devices. Burlington: Elsevier Inc. doi:10.1016/B978-012265320-9/50057-X
- Gökçen, M., Altındal, Ş., Karaman, M., & Aydemir, U. (2011). Forward and reverse bias current–voltage characteristics of Au/n-Si Schottky barrier diodes with and without SnO₂ insulator layer. Physica B: Condensed Matter, 406(21), 4119-4123. doi:10.1016/j.physb.2011.08.006
- Göksu, T. (2013). Schottky Metal Kalınlığına Bağlı Olarak Hazırlanan Ti/n-GaAs Schottky Kontakların Sıcaklık Bağımlı Karakteristiklerinin Belirlenmesi. Doktora Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Isparta.
- Gupta, R., Misra, S., Malhotra, B., Beladakere, N., & Chandra, S. (1991). Metal/semiconductive polymer Schottky device. Applied Physics Letters, 58(1), 51-52. doi:10.1063/1.104441
- Güllü, Ö. (2008). H₂ Öntavlama Au/n-GaAs Diyotlarda Elektriksel Karakteristiklerin Schottky Metal Kalınlığı ve Sıcaklığa Bağlı Değişiminin İncelenmesi. Doktora Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Erzurum.
- Gürkan Aydın, S. (2010). Al/PNpCIPhPPy/p-Si/Al Kontakın Elektronik Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Isparta.
- Güzel, A. (2012). Saçırma Yöntemiyle Hazırlanan Ni/n-GaAs Schottky Diyotların Sıcaklığa Bağlı Akım-Voltaj ve Kapasite-Voltaj Karakteristiklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Erzurum.
- Habanyama, A. (2018). Interface Control Processes for Ni/Ge and Pd/Ge Schottky and Ohmic Contact Fabrication: Part One. S. Lee içinde, Advanced Material and Device Applications with Germanium (s. Chapter 4). London: IntechOpen. doi:10.5772/intechopen.73146
- Jagadish, C., & Pearton, S. (2006). Zinc Oxide Bulk, Thin Films and Nanostructures Processing, Properties and Applications. Oxford: Elsevier Science Ltd. doi:10.1016/B978-008044722-3/50017-8
- Kansız, Y. (2014). Au/Yarıiletken Polimer (P3DMTFT)/n-GaAs Schottky yapının Elektriksel Parametrelerinin Sıcaklık Bağımlılığı. Yüksek Lisans Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Isparta.
- Karabulut, A. (2014). Atomik Katman Kaplama Tekniği İle Sentezlenen Nano-Ölçekli Al₂O₃ Ara Katmanlı, Yarıiletken Malzeme Temelli Schottky Diyotların Sıcaklığa Bağlı Elektriksel Karakterizasyonu. Doktora Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Erzurum.
- Kasap, S. .. (2017). Principles Of Electronic Materials and Devices. New York: McGraw-Hill Education.

- Kaymak, N., Efil, E., Seven, E., Tataroğlu, A., Bilge Ocak, S., & Orhan, E. (2018). Atomic Layer Deposition Grown Zinc-Oxide Based MIS-Type Schottky Barrier Diode. Preprints, 2018030125. doi:10.20944/preprints201803.0125.v1
- Kocyigit, A., Orak, İ., & Çaldıran, Z. T. (2017). Current–voltage characteristics of Au/ZnO/n-Si device in a wide range temperature. *J Mater Sci: Mater Electron*, 28, 17177–17184 .
- Koçyiğit, A., Orak, I., Çaldıran, Z., & Turut, A. (2017). Current–voltage characteristics of Au/ZnO/n-Si device in a wide range temperature. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(22), 17177-17184. doi:10.1007/s10854-017-7646-3
- Korkut, H. (2009). Aynı Şartlarda Hazırlanan Cr/n-GaAs Schottky Kontaklarında Numune Sıcaklığına Bağlı T0 Anormalliđinin Isıl Tavlamaıyla İyileştirilmesi. Doktora Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Erzurum.
- Lapa, H. E. (2014). Au/Poli(3-Sübsitüetiyofen) (P3DMTFT)/n-GaAs Schottky Kontakların Fotovoltaik ve Elektriksel Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Isparta.
- Leroy, W., Opsomer, ..., Forment, S., & Van Meirhaeghe, R. (2005). The barrier height inhomogeneity in identically prepared Au/n-GaAs Schottky barrier diodes. *Solid-State Electronics*, 49(6), 878-883. doi:10.1016/j.sse.2005.03.005
- Liu, Y., Yu, J., & Lai, P. (2014). Investigation of WO₃/ZnO thin-film heterojunction-based Schottky diodes for H₂ gas sensing. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(19), 10313-10319. doi:10.1016/j.ijhydene.2014.04.155
- Liu, Y., Yu, J., & Lai, P. (2014). Investigation of WO₃/ZnO thin-film heterojunction-based Schottky diodes for H₂ gas sensing. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(19), 10313-10319.
- Maissel, L., & Glang, R. (1970). *Handbook of Thin Film Technology*. New York: McGraw-Hill.
- McLean, A. B. (1986). Limitations to the Norde I-V plot. *Semiconductor Science and Technology*, 1(3), 177-179. doi:10.1088/0268-1242/1/3/003
- Michaels, M. R. (2021). *Synthesis and Characterization of TiO₂ Nanotube Schottky Diodes*. Yüksek Lisans Tezi. University of Missouri–Columbia. Missouri.
- Morkoç, H., & Özgür, Ü. (2009). *Zinc Oxide Fundamentals, Materials and Device Technology*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH.
- Mott, N. F. (1938). Note on the contact between a metal and an insulator or semiconductor. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 34(4), 568-572. doi:10.1017/s0305004100020570
- Neamen, D. A. (2003). *Semiconductor Physics and Devices*. New York: McGraw-Hill.

- Nicollian, E., & Brews, J. (1982). *MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology*. New York: John Wiley & Sons.
- Norde, H. (1979). A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 50(7), 5052-5053. doi:10.1063/1.325607
- Ocak, Y. S. (2010). *Organik-İnorganik Hibrit Yapıların Elektriksel ve Fotoelektriksel Karakterizasyonu*. Doktora Tezi. Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Diyarbakır.
- Orak, I., Kocyigit, A., & Turut, A. (2017). The surface morphology properties and respond illumination impact of ZnO/n-Si photodiode by prepared atomic layer deposition technique. *Journal of Alloys and Compounds*, 691, 873-879. doi:10.1016/j.jallcom.2016.08.295
- Önal, S. (2007). *Mn/n-GaAs Schottky Diyotunun Hidrostatik Basınç Altında Elektriksel Karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi. Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Tokat.
- Özavcı, E. (2014). *Au/n-GaAs Schottky Diyotların Hazırlanması ve Akım-İletim Mekanizmalarının Geniş Bir Sıcaklık Aralığında İncelenmesi*. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara.
- Özerli, H. (2013). *Au/n-GaAs Schottky Kontakların Elektriksel Karakteristiklerinin Geniş Bir Sıcaklık Aralığında İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Kahramanmaraş.
- Özgür, Ü., Alivov, Y. I., Lui, C., Teke, A., Reschikov, M. A., Doğan, S., . . . Morkoç, H. (2005). A comprehensive review of ZnO materials and devices. *Journal of Applied Physics*, 98(4), 041301. doi:10.1063/1.1992666
- Pearman, D. (2007). *Electrical Characterisation and Modelling of Schottky barrier metal source/drain MOSFETs*. Doktora Tezi. University of Warwick.
- Pür, F., & Tataroğlu, A. (2012). Analysis of the series resistance and interface states of Au/Si₃N₄/n-Si (metal-insulator-semiconductor) Schottky diodes using I-V characteristics in a wide temperature range. *Physica Scripta*, 86(3), 035802. doi:10.1088/0031-8949/86/03/035802
- Rhoderick, E., & Williams, R. (1988). *Metal-Semiconductor Contacts*. Oxford: Clarendon Press.
- Rideout, V. L. (1978). A review of the theory, technology and applications of metal-semiconductor rectifiers. *Thin Solid Films*, 48(3), 261-291. doi:10.1016/0040-6090(78)90007-X
- Roy, A., Gupta, S., Sindhu, S., Parveen, A., & Ramamurthy, P. (2013). Dielectric properties of novel PVA/ZnO hybrid nanocomposite films. *Composites Part B: Engineering*, 47, 314-319. doi:10.1016/j.compositesb.2012.10.029

- Saları, M. A. (2018). Schottky Diyotların Elektriksel Karakteristikleri Üzerine Farklı Enerji Ve Dozlardaki Elektron Ve Gama Radyasyonlarının Etkilerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi. Doktora Tezi . Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Erzurum.
- Sato, K., & Yasumura, Y. (1985). Study of forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 58(9), 3655-3657. doi:10.1063/1.335750
- Sharma, B. (1984). *Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications*. New York: Plenum Press. doi:10.1007/978-1-4684-4655-5
- Shaw, A. (2018). *Atomic Layer Deposition Zinc Oxide Devices For Transparent Electronics*. Doktora Tezi. University of Liverpool, Philosophy in the Faculty of Science and Engineering. Liverpool.
- Somvanshi, D., & Jit, S. (2014). Effects of Sn and Zn Seed Layers on the Electrical Characteristics of Pd/ZnO Thin-Film Schottky Diodes Grown on n-Si Substrates. *IEEE Electron Device Letters*, 35(9), 945-947. doi:10.1109/LED.2014.2334473
- Somvanshi, D., & Jit, S. (2014). Electrical characterization of Au/n-ZnO Schottky contacts on n-Si. *IEEE Electron Device Letters*, 35(9), 945-947.
- Streetman, B., & Banerjee, S. K. (2016). *Solid State Electronic Devices*. Harlow: Pearson Education Limited.
- Sullivan, J. P., Tung, R. T., Pinto, M. R., & Graham, W. R. (1991). Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers: A numerical study. *Journal of Applied Physics*, 70(12), 7403-7424. doi:10.1063/1.349737
- Sze, S. M., & Lee, M.-K. (2012). *Semiconductor Devices: Physics and Technology*. New York: John Wiley & Sons, INC.
- Sze, S., & Ng, K. K. (2006). *Physics of Semiconductor Devices*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. doi:10.1002/0470068329
- Tan, S. O. (2016). ZnO Arayüzey Tabakalı Schottky Engel Diyotların Hazırlanması ve Elektriksel Özelliklerinin Aydınlatma Şiddetine Bağlı İncelenmesi. Doktora Tezi. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Karabük.
- Tan, S. O., Uslu Tecimer, H., Çiçek, O., Tecimer, H., Orak, İ., & Altındal, Ş. (2016). Electrical characterizations of Au/ZnO/n-GaAs Schottky diodes under distinct illumination intensities. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27(8), 8340-8347. doi:10.1007/s10854-016-4843-4
- Tan, S.O., Uslu Tecimer, H., Çiçek, O., Tecimer, H., Orak, İ., & Altındal, Ş. (2016). Electrical characterizations of Au/ZnO/n-GaAs Schottky diodes under distinct illumination intensities. *J Mater Sci: Mater Electron*, 27, 8340-8347.

- Tozlu, N. (2011). ZnO Tabanlı Yarıiletkenlerde Metal Kontak Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Adana.
- Tung, R. (1992). Electron transport at metal-semiconductor interfaces: General theory. *Physical Review B*, 45(23), 13509-13523. doi:10.1103/PhysRevB.45.13509
- Tung, R. T. (1991). Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers. *Applied Physics Letters*, 58(24), 2821-2823. doi:10.1063/1.104747
- Tung, R. T. (2001). Recent advances in Schottky barrier concepts. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 35(1), 1-138. doi:10.1016/S0927-796X(01)00037-7
- Tung, R. T. (2013). The physics and chemistry of the Schottky barrier height. *Applied Physics Reviews*, 1(1), 011304 - 1 - 49. doi:10.1063/1.4858400
- Uslu, H. (2010). Au/(Co, Zn-Katkılı) Polivinil Alkol/N-Si Schottky Engel Diyotlarının Hazırlanması ve Elektriksel Özelliklerinin Aydınlatma Şiddetine Bağlı İncelenmesi, Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Varlıbaş, B. (2006). Metal/n-Si/Au-Sb Schottky Diyot Yapılarında I-V Karakteristiklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Antakya.
- Varma, R., McKinley, A., Williams, R., & Higginbotham, I. (1977). Interface states and the nature of metal-silicon contacts. *Journal of Physics D*, 10, L171-174. doi:10.1088/0022-3727/10/13/003
- Xiao, H., & Huang, S. (2010). Frequency and voltage dependency of interface states and series resistance in Al/SiO₂/p-Si MOS structure. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 395 - 399. doi:10.1016/j.mssp.2011.05.009
- Xu, S. (2013). Modification and Characterization of Optical and Electrical Properties of ZnO Nanostructures for Potential Application. Doktora Tezi. The Hong Kong University of Science and Technology. Hong Kong.
- Yao, Y. (2017). Growth, Characterization and Contacts to Ga₂O₃ Single Crystal Substrates and Epitaxial Layers. Doktora Tezi. Carnegie Mellon University. Pittsburg.
- Yıldırım, M., & Kocyigit, A. (2018). Characterization of Al/In:ZnO/p-Si photodiodes for various In doped level to ZnO interfacial layers. *Journal of Alloys and Compounds*, 768, 1064-1075.
- Yıldırım, M., & Koçyiğit, A. (2018). Characterization of Al/In:ZnO/p-Si photodiodes for various In doped level to ZnO interfacial layers. *Journal of Alloys and Compounds*, 768, 1064-1075. doi:10.1016/j.jallcom.2018.07.295