

**Au/n-Si/Al SCHOTTKY DİYOTLARINDA ARAYÜZEY
HALLERİNİN AKIM-VOLTAJ KARAKTERİSTİKLERİNE
ETKİLERİ**

Mücahide GÖNDÜK

Yüksek Lisans Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Nezir YILDIRIM

2014

Her hakkı saklıdır

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Au/n-Si/Al SCHOTTKY DİYOTLARINDA ARAYÜZEY
HALLERİNİN AKIM-VOLTAJ
KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mücahide GÖNDÜK

Enstitü Anabilim Dalı : FİZİK

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Nezir YILDIRIM

Temmuz 2014

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Au/n-Si/Al SCHOTTKY DİYOTLARINDA ARAYÜZEY
HALLERİNİN AKIM-VOLTAJ KARAKTERİSTİKLERİNE
ETKİLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mücahide GÖNDÜK

Enstitü Anabilim Dalı : FİZİK

Bu tez 11.07.2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr.
Ramazan SOLMAZ
Jüri Başkanı

Doç. Dr.
Nezir YILDIRIM
Üye

Yrd. Doç. Dr.
Kadir EJDERHA
Üye

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Doç. Dr. İbrahim Y. ERDOĞAN
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Kendisini akademisyen olarak örnek olarak benimsediğim, bilimsel anlamda kendisinden çok şey öğrendiğim, tez çalışmalarım süresince yardımlarını ve bilgi birikimini esirgemeyen, çalışmaların tamamlanabilmesi için gerekli desteği veren, tez konusunun belirlenmesinden sonuçlanmasına kadar her aşamada bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren, deneysel çalışmaların yapılması ve yorumlanması esnasında yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bu süreçteki tüm destek ve emeğinden dolayı saygıdeğer hocam ve tez danışmanım Doç. Dr. Nezir Yıldırım'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Laboratuvar çalışmalarım sırasında numunelerin hazırlanmasında ve ölçümlerin alınmasında yardımcı olan Sayın Yrd. Doç. Dr. İkrâm Orak'a çok teşekkür ederim.

Bu çalışma, Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmamda numunelerin hazırlanması ve ölçümlerin alınması konusunda desteklerinden dolayı Atatürk Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

Çalışmamın hazırlanması sırasında benim için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan ve dualarını benden esirgemeyen, gösterdikleri sabır ve her türlü desteklerinden dolayı anneme ve babama teşekkürü bir borç bilirim.

Mücahide GÖNDÜK

Temmuz 2014

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Metal-Yarıiletken Yapısı.....	3
1.1.1. Giriş.....	3
1.1.2. Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontaklar.....	3
1.1.3. Metal n-tipi yarıiletken omik kontaklar.....	7
1.1.4. Metal n-tipi yarıiletken-metal yapısı.....	9
1.2. Schottky Diyotlarda Akım İletimi ve Termiyonik Emisyon Teorisi.....	10
1.3 Tünelleme Yoluyla Akım İletimi.....	15
1.3. Norde Modelinden Seri Direncin Hesaplanması.....	17
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	23
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	29
3.1. Giriş.....	29
3.2. Numunenin Temizlenmesi ve Kontak için Hazır Hale Getirilmesi.....	29
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	32

4.1. Schottky Diyotlarda Akım-Gerilim Ölçümleri ile Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi.....	32
4.2. Norde Modeli Yardımı ile Engel Yüksekliği ve Seri Direncin Hesaplanması.....	44
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	47
KAYNAKLAR.....	51
ÖZGEÇMİŞ.....	58

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A^*	: Richardson sabiti
eV	: Elektron volt
E_C	: İletkenlik bandı tabanının enerjisi
E_V	: Valans bandı tavanının enerjisi
E_{FS}	: Yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi
E_{FM}	: Metalin Fermi enerji seviyesi
E_i	: Oksit tabakasındaki elektrik alan
E_g	: Yasak enerji aralığı
E_{ss}	: Arayüzey hallerinin enerjisi
$F(V)$: Norde fonksiyonu
$f(E)$: Fermi-Dirac ihtimaliyet fonksiyonu
$g_c(E)$: İletkenlik bandındaki hal yoğunluğu
I_0	: Sızıntı Akımı
m_n^*	: Elektronun etkin kütlesi
N_c	: İletkenlik bandı hâl yoğunluğu
N_d	: Donor konsantrasyonu
N_{sa}	: Metal ile dengedeki ara yüzey hâl yoğunluğu
N_{sb}	: Yarıiletken ile dengedeki arayüzey hâl yoğunluğu
N_{ss}	: Arayüzey hâllerinin yoğunluğu
Q_m	: Metal tarafındaki yüzey yükü
Q_{sc}	: Arınma bölgesindeki uzay yükü
Q_{ss}	: Arayüzey yük yoğunluğu
T	: Mutlak sıcaklık
δ	: Metal ile yarıiletken arasındaki uzaklık (tabaka kalınlığı)
ϵ_0	: Boşluğun dielektrik sabiti

ϵ_i	: Oksit tabakasının dielektrik sabiti
ϵ_s	: Yarıiletkenin dielektrik sabiti
Φ_s	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
Φ_m	: Metalin iş fonksiyonu
Φ_{Bn}	: n-tipi yarıiletken için potansiyel engel yüksekliği
χ_s	: Yarıiletkenin elektron ilgisi
X_d	: Uzay yükü bölgesinin kalınlığı
ψ_s	: Yarıiletkenin yüzey potansiyeli
FE	: Alan emisyonu
MIS	: Metal/yalıtkan/yarıiletken
MS	: Metal/yarıiletken
TFE	: Termiyonik alan emisyonu
TE	: Termiyonik emisyon
I-V	: Akım-voltaj

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	$\Phi_m > \Phi_s$ durumu için metal n-tipi yarıiletken kontağın kontakdan önce enerji- band diyagramı.....	4
Şekil 1.2.	$\Phi_m > \Phi_s$ durumu için metal n-tipi yarıiletken kontağa ait kontakdan sonra termal denge durumunda enerji bant diyagramı.....	5
Şekil 1.3.	Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için doğru beslem durumu.....	6
Şekil 1.4.	Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için ters beslem durumu.....	7
Şekil 1.5.	$\Phi_m < \Phi_s$ durumu için metal n-tipi yarıiletken kontağın kontakdan önce oluşan enerji-band diyagramı	8
Şekil 1.6.	Metal n-tipi yarıiletken omik kontağa ait enerji bant diyagramı a) ters beslem altında ($V > 0$) b)doğru beslem altında ($V < 0$).....	9
Şekil 1.7.	n^+nM yarıiletken diyot yapısının termal dengede enerji-bant diyagramı	10
Şekil 1.8.	Düz beslem altındaki metal yarıiletken Schottky kontaktaki imaj azalma etkisine ait enerji–band diyagramı.....	11
Şekil 1.9.	Alan emisyonu mekanizması	15
Şekil 1.10	Termoiyonik alan emisyonu mekanizması.....	16
Şekil 3.1.	Termal buharlaştırma ünitesi.....	31
Şekil 3.2.	Termal tavlama fırını.....	31
Şekil 4.1.	Tavlınmamış 5 adet Au/n-Si Schottky diyodun oda sıcaklığında $\ln I-V$ grafiği.....	34
Şekil 4.2.	200 $^{\circ}C$ tavlınmış 6 adet diyotun oda sıcaklığında $\ln I-V$ grafikleri.....	35
Şekil 4.3.	Bir adet Au/n-Si Schottky diyotu için a)tavlınmamış $\ln I-V$ grafiği ve fit doğrusu, b) 200 $^{\circ}C$ 'de tavlınmış $\ln I-V$ grafiği ve fit doğrusu	36
Şekil 4.4	Tavlınmamış Au/n-Si Schottky diyotlarının sıcaklığa bağlı $\ln I-V$ grafiği.....	37

Şekil 4.5.	200 °C’de tavllanmış Au/n-Si Schottky diyotlarının sıcaklığa bağlı $\ln I-V$ grafiği.....	38
Şekil 4.6.	Schottky diyotların oda sıcaklığında tavlammamış sıcaklığa bağlı $\ln I-V$ ölçümlerinden elde edilen sıcaklığa bağlı engel yükseklikleri grafiği ...	41
Şekil 4.7.	Schottky diyotların oda sıcaklığında tavlammamış sıcaklığa bağlı $\ln I-V$ ölçümlerinden elde edilen sıcaklığa bağlı idealite faktörleri grafiği.....	41
Şekil 4.8.	Schottky diyotların 200 °C’de tavllanmış sıcaklığa bağlı $\ln I-V$ ölçümlerinden elde edilen sıcaklığa bağlı engel yükseklikleri grafiği....	42
Şekil 4.9.	Schottky diyotların 200 °C’de tavllanmış sıcaklığa bağlı $\ln I-V$ ölçümlerinden elde edilen sıcaklığa bağlı idealite faktörleri grafiği.....	43
Şeki 4.10.	Tavlammamış numune için oda sıcaklığında Norde Fonksiyonlarından elde edilen F(V)-V grafiği	45
Şeki 4.11.	200 °C’de tavllanmış numune için oda sıcaklığında Norde Fonksiyonlarından elde edilen F(V)-V grafiği.....	46

TABLolar LİSTESİ

Tablo 4.1.	Al/n-Si/Au Schottky diyotlar için ölçülen 60-400 K sıcaklık aralığında tavlınmamış diyotun idealite faktörünün ve engel yüksekliğinin numune sıcaklığına göre değişimi.....	39
Tablo 4.2.	Al/n-Si/Au Schottky diyotlar için ölçülen 60-400 K sıcaklık aralığında 200 °C'de tavlınmış diyotun idealite faktörünün ve engel yüksekliğinin numune sıcaklığına göre değişimi.....	40

Au/n-Si/Al SCHOTTKY DİYOTLARINDA ARAYÜZEY HALLERİNİN AKIM-VOLTAJ KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİ

ÖZET

Günümüz elektronik teknolojisinde ve elektronik sanayiinde çok fazla kullanılan Schottky kontaklar geniş bir uygulama alanına ve önemli bir yere sahiptir. Bu sebeple bu elemanlar üzerinde çok fazla durulması gerekir ve birçok araştırmanın da konusu olmuştur. Diyotun tavlama ve numune sıcaklığıyla karakteristik parametrelerinin değişip değişmediğinin değişimini görmek için diyotların tavlamaya ve numune sıcaklığına bağlı akım-gerilim karakteristikleri incelendi. Yapılan hesaplamalar sonucunda tavlınmamış diyot için oda sıcaklığında idealite faktörü ve engel yüksekliği I-V ölçümlerinden sırasıyla 1,15 ve 0,74 eV değerleri elde edildi. Yine 200 °C'de tavlınmış diyot için oda sıcaklığında idealite faktörü ve engel yüksekliği sırasıyla 1,11 ve 0,73 eV olarak hesaplanmıştır. Buna göre tavlama neticesinde diyot tavlama sıcaklığına bağlı olarak daha kararlı hale geldiği söylenebilir. Bu durum, metal yarıiletken arayüzeyindeki istenmeyen fazların tavlama sıcaklığına bağlı olarak azaldığının veya büyük ölçüde yok olduğunun bir kanıtıdır.

Tavlınmamış ve 200 °C'de tavlınmış numuneler için idealite faktörü değerlerinin azalan numune sıcaklığı ile arttığı ve engel yüksekliği değerlerinin azalan numune sıcaklığı ile azaldığı gözlemlendi. Metal-yarıiletken arayüzeyinde düşük sıcaklıklarda elektronlar düşük engeli tercih eder.

Au/n-Si/Al Schottky diyotların oda sıcaklığında tavlınmadan önce ve 200 °C'de tavlandıktan sonra seri direnç ve engel yüksekliği değerleri Norde Fonksiyonları kullanılarak hesaplandı. Metal-yarıiletken doğrultucu kontakların seri dirençleri ne kadar düşük olursa akım-gerilim karakteristikleri o kadar lineer olur ve diyot kalitesi de aynı oranda artar.

Anahtar Kelimeler: Schottky diyod, metal-yarıiletken kontaklar, termal tavlama, arayüzey, engel yüksekliği, seri direnç, Norde fonksiyonları.

INTERFACE EFFECTS ON CURRENT VOLTAGE CHARACTERISTICS OF Au/n-Si/Al SCHOTTKY DIODES

ABSTRACT

Schottky contacts electronic technology and electronics industry have an important place. Thus today are more extensively in wide range of applications. Because of this reason they will need to focus a lot of studies and research works. The annealing temperature and the sample temperature characteristic parameters of the diode to see that changed or not depending on current-voltage characteristics were investigated. As a result of the calculation from I-V measurements for as-deposited sample were obtained ideality factor and barrier height of 1,15 and 0,74 eV at room temperature respectively. Likewise the calculation from I-V measurements for 200 °C annealed sample were obtained ideality factor and barrier height 1,11 and 0,73 eV at room temperature respectively. According to this as a result of annealing diode has become more stable. In this case, the metal semiconductor interfacial unwanted phases is evidence that decrease depending of the annealing temperature.

As deposited and 200 °C annealed diodes ideality factor values increased with decreasing sample temperature and the barrier height values were seen to decrease with decreasing sample temperature. Electrons in the metal-semiconductor interfacial at low temperatures low barriers prefer.

As deposited and 200 °C annealed Au/n-Si/Al Schottky diodes at room temperature series resistance and barrier height values were calculated using the function Norde's. Metal-semiconductor rectifier contacts series resistance the lower current-voltage plots are linear and diode quality increases at the same rate.

Keywords: Schottky diode, metal semiconductor contacts, thermal annealing, barrier height, interface, series resistance, Norde function.

1. GİRİŞ

Schottky diyotlar, çağdaş elektronik ve fizik biliminde gerek teorik, gerek deneysel olarak önemli araştırma alanlarından biri haline gelmiştir. Oluşturulmalarının kolay olması ve karakteristiklerinin bilinmesi nedeni ile Schottky diyotlarının önemi, her geçen gün daha da artmaya devam etmektedir. Metal-yarıiletken Schottky kontaklar; teknoloji, sanayi ve elektronik devre elemanları endüstrisinde önemli bir yere sahiptir. Schottky diyotlar, teknolojik alanda, anahtarlama devreleri, güneş pilleri, yarıiletken dedektör uygulamaları, mikrodalga devre elemanları, modülatör gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

İlk metal-yarıiletken yapı, nokta kontak diyotlardır. Bu yapılar yarıiletken malzemenin yüzeyine ince sivriltilmiş bir telin temas haline getirilmesiyle elde edilmiştir. Nokta kontak diyotların gelişmiş hali Schottky kontak olarak adlandırılmaktadır. Bu yapılar, eklem alanı üzerinde daha homojen kontak potansiyeli ve akım dağılımı elde etmek için yarıiletken yüzeyine sınırlı alanlarda metal buharlaştırılarak oluşturulan düzlemsel kontaklardır. Bu çalışmadaki amacımız, metal-yarıiletken (Schottky) kontakların elektriksel karakteristiklerini ortaya çıkarmak ve ayrıca bir Schottky kontakın karakteristik parametrelerinden olan engel yüksekliği ve idealite faktörünün değerini akım-gerilim (I-V) ölçümlerini kullanarak tespit etmektir.

Uygun kontaklar yaparak uygun elektronik devrelerde kullanmak, metal-yarıiletken kontakların elektriksel özelliklerinden yeterli derecede faydalanmak için karakteristiklerinin iyi bilinmesi gereklidir.

İlk olarak metal-yarıiletken doğrultucular, detektör olarak kullanılmıştır ve zamanla mikrodalga radarlarının gelişmesi ile nokta kontak diyotların yeniden önemi artmaya başladı. Nokta kontak diyotları, en çok frekans dönüştürücüsü olarak ve mikrodalga detektör diyotu olarak kullanıldı. Metal-yarıiletken doğrultucuların, yükseltmesinin düşük olması nedeni ile yerini, vakum tüplerine terk etti. Uzun müddet sadece mikrodalga ölçümlerinde kullanıldı (Torrey ve Whitmer 1948, Rideout 1978).

Schottky, yaptığı çalışmalarla Schottky engelini silisyum transistörle birleştirerek, Schottky engel kapılı metal-yarıiletken alan etkili transistörü bulmuştur. Metal-yarıiletken yapıların karakteristikleri, daha sonra yapılan araştırmalarda sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçülmüş ve bu yapılar sıcaklığın tayininde kullanmışlardır (Chandra vd 1986).

Metal-yarıiletken doğrultucu kontak ve omik kontakların teorik açıklaması, bu yapıların pratikte uygulamalarından çok sonradır. Ayrıca bu yapılarda yüzey hallerindeki elektronların net yükünden ve ters işaretli uzay yükünden dolayı bir dipol tabakası oluşabileceği gösterilmiştir. Schottky; engel yüksekliğinin metalin iş fonksiyonuna, arayüzey hallerine ve arayüzey tabaka kalınlığına bağlılığını incelemiştir (Batı 1993).

1.1. Metal-Yarıiletken Yapısı

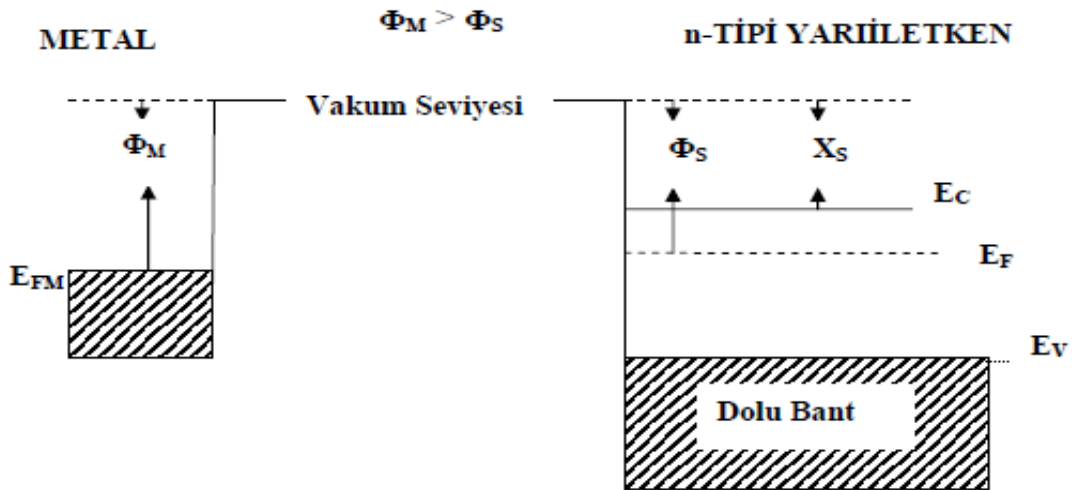
1.2. Giriş

Schottky diyotların karakteristik parametrelerinin anlaşılması için yalıtkan ve yarıiletken kristallerin iletkenlik özelliklerinin araştırılmasının bir yolu da kristale uygun kontakların uygulanmasıdır. Genel anlamıyla kontak, iki maddenin temas etmesi demektir. Temas eden yüzeylerin temiz, pürüzsüz ve parlak olması ile ideal kontak elde edilir (Card ve Rhoderick 1971, Chattopadhyay ve Daw 1986, Rhoderick ve Williams 1978, Horvath 1988). İki madde kontak haline getirildiğinde, her iki maddenin elektrokimyasal potansiyelleri (fermi seviyeleri) aynı düzeye gelinceye kadar bir yük alış verişi olur (Ziel 1968). Bu, her iki maddenin elektronik enerji-bant diyagramı ile yakından ilgilidir.

Termal denge sonunda Fermi düzeyleri aynı seviyeye gelinceye kadar yük alış-verişi olur. Oluşan yeni yük dağılımı sebebi ile kontak bölgesinde bir dipol tabakası meydana gelir. İki metal arasında bu dipol tabakası kontakta her iki tarafındaki yüzey yükleri sebebi ile meydana gelir. Oluşan bu kontak elektronlarının her iki yönde serbestçe hareket etmeleri nedeniyle omik kontak olarak adlandırılır (Rhoderick ve Williams 1988). Kontakta oluşturulan maddelerden biri metal diğeri yarıiletken ise oluşacak kontak omik ya da Schottky (doğrultucu) kontak olabilir. Doğrultucu kontakta elektronlar bir yönde serbest hareket ederken ters yöndeki geçişleri potansiyel engel nedeni ile zorlaşır (Ziel 1968).

1.1.2. Metal *n*-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontaklar

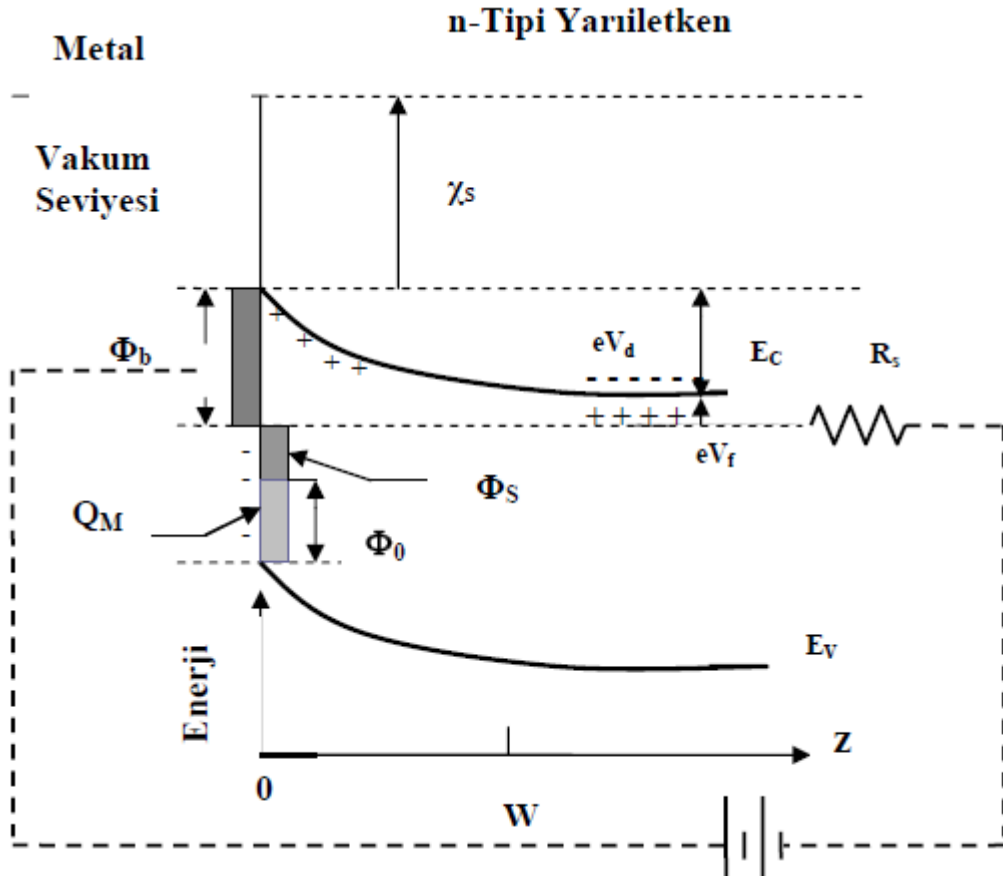
Akım taşıyıcıları (hol veya elektronlar) bir doğrultuda kolayca hareket ederken, potansiyel engelinden dolayı diğeri yönde hareketleri zorlaşır. Bu tür kontaklara doğrultucu kontak adı verilir. Metal/yarıiletken yapılarda doğrultma işlemi, bu yapılarda akım-gerilim ilişkisine bakılarak incelenebilir. Bu olay bir metal ve bir *n*-tipi yarıiletkenin kontak durumuna getirilmesi durumunda şu şekilde gerçekleşir.



Şekil 1.1. $\Phi_m > \Phi_s$ durumu için metal n-tipi yarıiletken kontağın kontakta önce enerji-band diyagramı (Yıldırım 2009)

Oda sıcaklığında yarıiletken içindeki bütün donörler iyonize olmuş olsunlar. Metalin iş fonksiyonu Φ_m , yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s , yarıiletkenin elektron ilgisi χ_s ve $\Phi_m > \Phi_s$ olsun. Kontakta önceki durumda, Şekil 1,1'de görüldüğü gibi yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\Phi_m - \Phi_s$ kadar yukarıdadır. Kontakta sonra yarıiletken yüzeyden metale elektronlar geçerken, geride iyonize olmuş donörler bırakırlar. Yük alışverişi tamamlandıktan sonra her iki tarafın Fermi seviyeleri aynı hizaya gelir. Yani yarıiletkenin enerji seviyeleri Şekil 1.2'de görüldüğü gibi $(\Phi_m - \Phi_s)$ kadar alçalmıştır. Sonuç olarak, kontakta oluşan dipol tabakası nedeniyle eklem üzerinde bir potansiyel engeli meydana gelir. Yarıiletken tarafındaki engelin yüksekliği $(\Phi_m - \Phi_s)$ ve metal tarafındaki engelin yüksekliği ise $\Phi_m - \chi_s$ kadardır.

Potansiyel engeli metal tarafında dik olarak yükselirken, yarıiletken tarafında w genişliğine sahiptir. Bu engel yüksekliği difüzyon potansiyeli cinsinden $eV_d = \Phi_m - \Phi_s$ şeklinde ifade edilebilir. Yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar metale geçerken bu engelle karşılaşır. Yarıiletken tarafındaki iyonize olmuş donörler (pozitif yükler), yarıiletken içinde hareketsiz oldukları için birer uzay yüküdürler.



Şekil 1.2. $\Phi_m > \Phi_s$ durumu için metal n-tipi yarıiletken kontakta ait kontakta sonra termal denge durumunda enerji bant diyagramı (Yıldırım 2009)

Kontaktaki potansiyel engelden dolayı yüzey tabakası engel tabakası olarak bilinir.

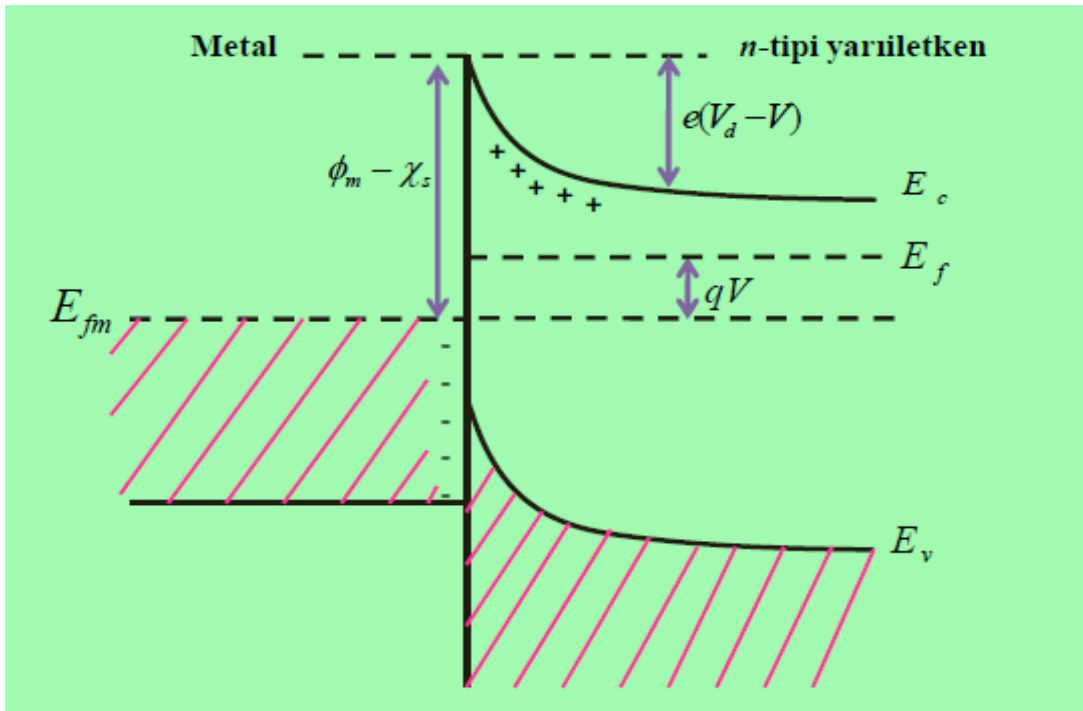
Bu tabakanın w kalınlığı iyonize olmuş donörlerin konsantrasyonuna ve difüzyon potansiyelinin değerine bağlıdır. Metal ve yarıiletken içindeki bazı elektronların termal yolla kazandıkları enerji potansiyel engelini aşabilecek büyüklükte olduğu zaman kontakta eşit ve zıt yönde bir I_0 sızıntı akımı geçer.

Eğer yarıiletkene bir $-V$ gerilimi uygulanırsa metalden yarıiletkene geçecek elektronlar için engel yüksekliği değişmez ve bundan dolayı yarıiletkenden metale doğru olan akımın değeri sabit kalır. Fakat yarıiletken tarafında, iletkenlik bandı eV kadar yükseleceği için yarıiletkenden metale doğru geçecek elektronlar için engel yüksekliği eV kadar azalacaktır. Dolayısıyla metalden yarıiletkene akan akım $\exp(eV/kT)$ faktörü kadar artacaktır.

Bu durumda oluşan net akım

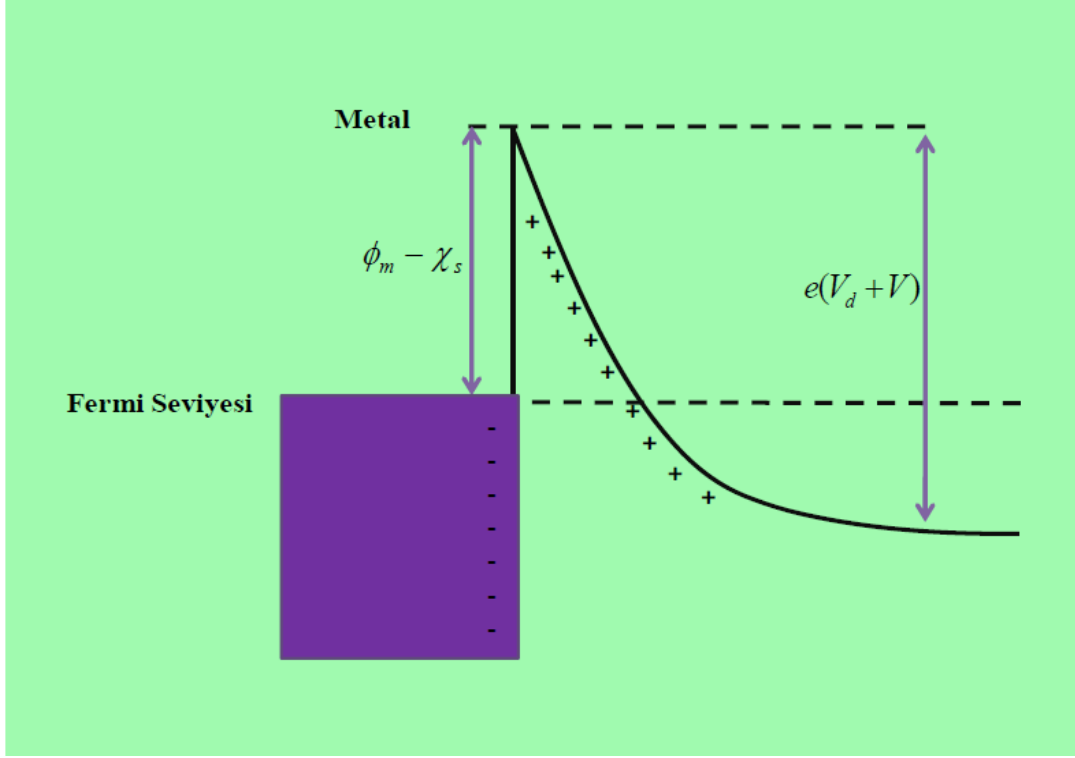
$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1.1)$$

ile verilir. I net akımı pozitifdir (Rhoderick 1988; Ziel 1968). Bu beslem durumuna doğru beslem denir.



Şekil 1.3. Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için doğru beslem durumu (Yiğit 2011)

Yarıiletken tarafa $+V$ gerilimi uygulanırsa iletkenlik bandı eV kadar alçalır ve yarıiletken tarafındaki engel yüksekliği eV kadar artar. Oluşan net akım $-I_0$ değerine yaklaşır. Bu beslem durumuna ($V \ll -kT/e$) ters beslem durumu denir (Ziel 1968, Rhoderick 1988).



Şekil 1.4. Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için ters beslem durumu (Yiğit 2011)

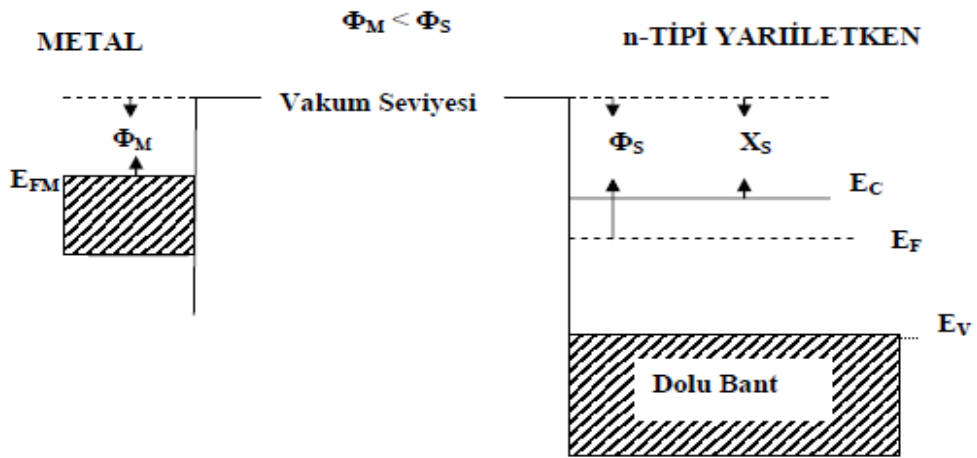
Yarıiletkenin potansiyel engelinin yüksekliği uygulanan voltaja bağlı olarak değişir. Ancak metal tarafındaki engel yüksekliği uygulanan voltajdan bağımsızdır. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontakta $V > 0$ ise kontak ters beslemededir. Eğer $V < 0$ ise kontak doğru beslemededir.

1.1.3. Metal n-tipi yarıiletken omik kontaklar

Metal/n-tipi yarıiletken kontak oluşumu için ($\Phi_m < \Phi_s$) şartı sağlanırsa omik kontak oluşur (Brillson 1983, Neamen 1992). Akım-gerilim karakteristikleri Ohm kanununa uygun bir davranış sergilerler.

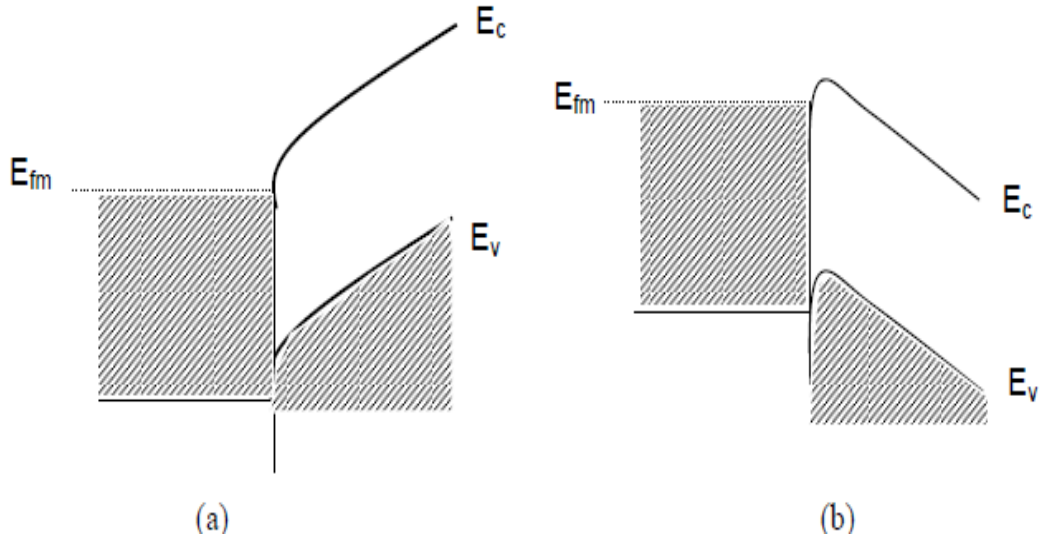
($\Phi_m < \Phi_s$) durumunda bir metalle bir yarıiletken kontak halinde olsun. Kontakdan önce yarıiletkenin Fermi seviyesi, metalin Fermi seviyesinden ($\Phi_s - \Phi_m$) kadar aşağıdadır. Kontakdan önceki enerji-band diyagramı Şekil 1,5'de görülmektedir (Ziel 1968). Kontakdan sonra termal denge durumunda metalden yarıiletkene elektron akışı olur. Bu durumda yarıiletken yüzeyin n-tipliliği artar (aşırı n-tipi).

Yarıiletken yüzeydeki bu fazla elektronlar yüzey yükü tabakası meydana getirirler. Yine metalden ayrılan elektronlar geride yüzey yükü tabakası meydana getirirler ve böylece kontak bölgesinde bir dipol tabakası oluşur. Şayet metal tarafına pozitif bir (+V) gerilimi uygulanırsa yarıiletkenden metale akan elektronlar için engel olmayacak ve elektronlar bu yönde kolayca hareket edebilirler (Şekil 1.6.a). Şayet metal tarafına bir (-V) gerilimi uygulanırsa yarıiletkenin aşırı doping durumundan dolayı elektronların karşılaşıcağı engel yüksekliği yine çok küçük olacak ve elektronlar kolayca metalden yarıiletkene doğru akacaktır (Şekil 1.6.b).



Şekil 1.5. $\Phi_m < \Phi_s$ durumu için metal *n*-tipi yarıiletken kontakın kontakta önce oluşan enerji-band diyagramı (Yıldırım 2009)

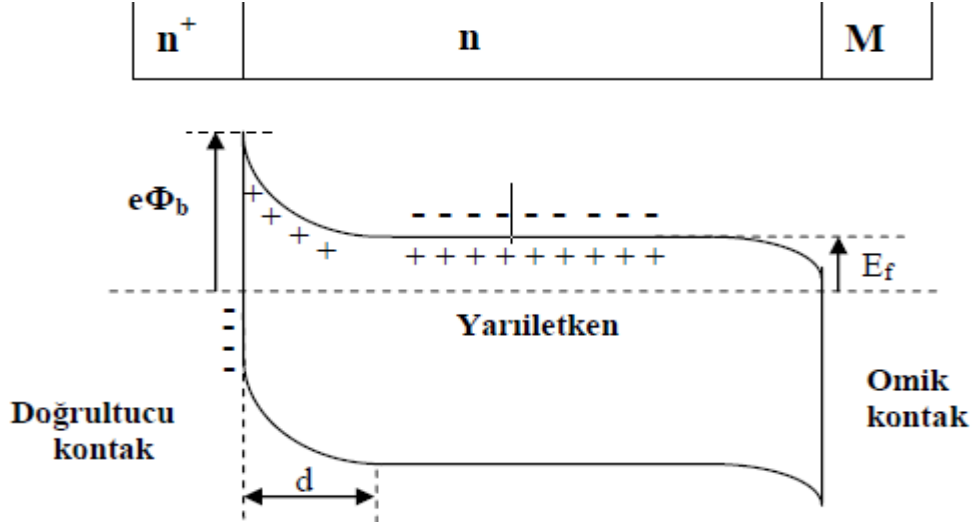
Elektronlar böyle bir kontakta her iki yönde kolayca hareket edebilirler. Bu tip kontaklara omik kontaklar denir. Omik kontak, uygulanan gerilimin polaritesinden bağımsız olarak her iki yönde de akım akışına minimum direnç gösteren bir metal/yarıiletken eklemidir. Akım-gerilim ilişkisi Ohm kanunu ile verilen kontaklar omik bir davranış sergilerler. Kontak direncinin değeri ise omik kontakın kalitesini belirler.



Şekil 1.6. Metal n-tipi yarıiletken omik kantağa ait enerji bant diyagramı a)ters beslem altında ($V>0$) b)doğru beslem altında ($V<0$) (Yıldırım 2009)

1.1.4. Metal *n*-tipi yarıiletken–metal yapısı

Metal n-tipi yarıiletken-metal (n^+nM) yapısı, n-tipi yarıiletkenin bir yüzeyine elektron bakımından çok zengin n^+ omik kantağı ile diğer yüzeyine uygulanan nM doğrultucu kantağından meydana gelir. Termal dengede böyle bir yapının enerji bant diyagramı Şekil 1.7’de görülmektedir. n^+ omik kontak tarafına $V<0$ olacak şekilde bir gerilim uygulandığında, yapı doğru beslemde olur. n^+ tarafına $V>0$ olacak şekilde bir gerilim uygulandığında, yapı ters beslemde olur. n^+nM yapısı, diyot özelliğine sahip bir yapıdır. Böyle bir yapı kısaca yarıiletken diyot olarak adlandırılır. Şekil 1.2’de görüldüğü gibi elektronlar için engel yüksekliği $e\Phi_d = eV_d + E_F$ ’ye eşittir.

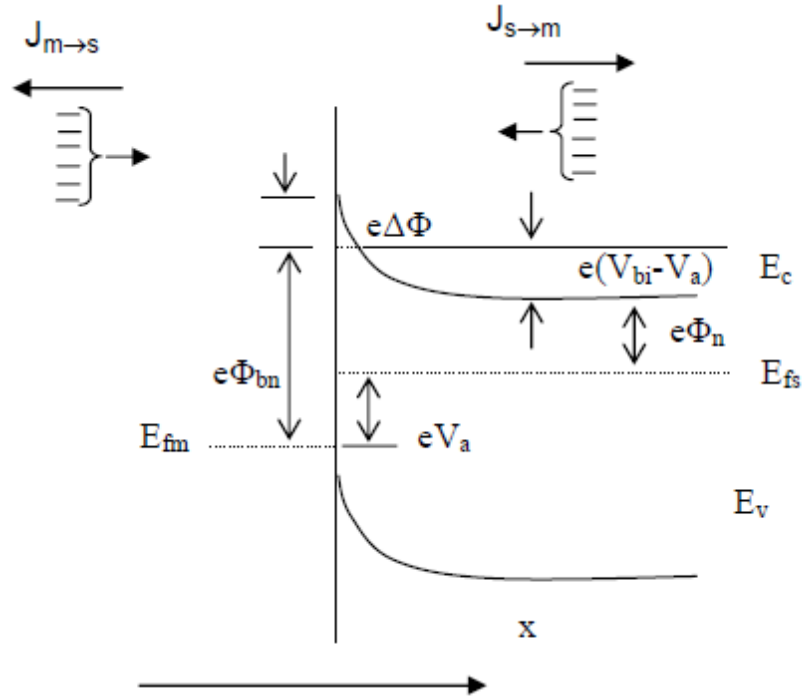


Şekil 1.7. n^+nM yarıiletken diyot yapısının termal dengede enerji-bant diyagramı (Yıldırım 2009)

1.3. Schottky Diyotlarda Akım İletimi ve Termiyonik Emisyon Teorisi

Sıcak bir yüzeyden termal enerjileri nedeni ile taşıyıcıların salınması olayı termiyonik emisyon olarak bilinir. Metal yarıiletken Schottky kontaklarda termoyonik emisyon teorisi taşıyıcıların termal enerjileri nedeniyle potansiyel engelini aşarak yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene geçmesidir. Schottky kontaklarda akım çoğunluk taşıyıcıları tarafından sağlanır (Ziel 1968, Rhoderick ve Williams 1988). Metal n-tipi yarıiletken Schottky diyotlarda elektronlar, metal p-tipi yarıiletken Schottky diyotlarda ise boşluklar akımı sağlar.

Termoyonik emisyon teorisi oluşturulurken, Maxwell-Boltzmann yaklaşımının uygulanabilmesi ve termal denge durumunun olaydan etkilenmemesi için Schottky kantağa ait potansiyel engelinin, kT enerjisinden daha büyük olduğu ve Schottky bölgesindeki taşıyıcı çarpışmalarının çok küçük olduğu kabul edilmektedir.



Şekil 1.8. Düz beslem altındaki metal yarıiletken Schottky kontaktaki imaj azalma etkisine ait enerji–band diyagramı (Yıldırım 2009)

Şekil 1.8’de V_a büyüklüğünde doğru beslem gerilimi uygulanmış bir Schottky kontak görülmektedir. Burada $J_{s \rightarrow m}$ yarıiletkenden metale doğru akan akım yoğunluğu ve $J_{m \rightarrow s}$ ise metalden yarıiletkene doğru olan akım yoğunluğudur. $J_{s \rightarrow m}$ akım yoğunluğu x yönünde ve engeli aşabilecek büyüklükte hızlara sahip elektronların konsantrasyonunun bir fonksiyonudur. Bu nedenle

$$J_{s \rightarrow m} = e \int_{E_c}^{\infty} V_x dn \quad (1.2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada E_c metal içindeki termiyonik emisyon için gerekli minimum enerjidir. V_x sürüklenme y yönündeki hızdır. Artan elektron konsantrasyonu;

$$dn = g_c(E) f(E) dE \quad (1.3)$$

ile verilir. Burada $g_c(E)$ iletkenlik bandındaki hal yoğunluğu ve $f(E)$ Fermi-Dirac ihtimaliyet fonksiyonudur. Maxwell-Boltzman yaklaşımı uygulanarak elektron konsantrasyonu için

$$dn = \frac{4\pi(2m_n^*)^{2/3}}{h^3} \sqrt{E - E_c} \exp\left[\frac{-(E-E_c)}{kT}\right] dE \quad (1.4)$$

yazılabilir. $(E - E_c)$ enerjisi serbest elektronun kinetik enerjisi kabul edilirse

$$(E - E_c) = \frac{1}{2} m_n^* V^2 \quad (1.5)$$

$$dE = m_n^* V dV \quad (1.6)$$

$$\sqrt{E - E_c} = V \sqrt{(m_n^*)/2} \quad (1.7)$$

olur. Bu sonuçlar kullanılarak (1.4) ifadesi yeniden düzenlenirse

$$dn = 2 \left(\frac{m_n^*}{h}\right)^3 \exp\left(\frac{-e\phi_n}{kT}\right) \exp\left(\frac{-m_n^* V^2}{2kT}\right) 4\pi V^2 dV \quad (1.8)$$

elde edilir. Bu denklem hızları V ile $V+dV$ aralığında değişen elektronların sayısını verir. Hız, bileşenlerine ayrılırsa

$$V^2 = V_x^2 + V_y^2 + V_z^2 \quad (1.9)$$

olur. Buradan (1.2) ifadesi

$$J_{s \rightarrow m} = 2e \left(\frac{m_n^*}{h}\right)^3 \exp\left(\frac{-e\phi_n}{kT}\right) \int_{V_{ox}}^{\infty} V_x \exp\left(\frac{-m_n^* V_x^2}{2kT}\right) dV_x \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\frac{-m_n^* V_y^2}{2kT}\right) dV_y \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\frac{-m_n^* V_z^2}{2kT}\right) dV_z \quad (1.10)$$

şeklinde yazılabilir. V_{ox} hızı, x doğrultusundaki harekette elektronun potansiyel engelini aşabilmesi için gerekli olan minimum hızdır. Son ifadede aşağıdaki değişken değiştirmeleri yapılabilir.

$$\frac{m_n^* V_x^2}{2kT} = \alpha^2 \quad (1.11.a)$$

$$\frac{m_n^* V_y^2}{2kT} = \beta^2 \quad (1.11.b)$$

$$\frac{m_n^* V_z^2}{2kT} = \gamma^2 \quad (1.11.c)$$

Ayrıca minimum V_{ox} hızı için

$$\frac{1}{2} m_n^* V_{ox}^2 = e(V_{bi} - V_a) \quad (1.12)$$

yazılabilir. Bu durumda $V_x \rightarrow V_{ox}$ şartı için $\alpha = 0$ olur. Yine

$$V_x dV_x = \frac{2kT}{m_n^*} \alpha d\alpha$$

yazılabilir. Bu ifadeler Eşitlik (1.10)'da kullanılırsa

$$J_{s \rightarrow m} = 2e \left(\frac{m_n^*}{h} \right)^3 \left(\frac{2kT}{m_n^*} \right)^2 \exp\left(\frac{-e\phi_n}{kT}\right) \exp\left(\frac{-e(V_{bi} - V_a)}{kT}\right) \int_0^\infty \alpha \exp(-\alpha^2) d\alpha \int_{-\infty}^\infty (-\beta^2) d\beta \int_{-\infty}^\infty (-\gamma^2) d\gamma \quad (1.13)$$

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp\left(\frac{-e(\phi_n + V_{bi})}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) \quad (1.14)$$

veya

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_{bn}}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) \quad (1.15)$$

olur. Şekil 1.6'dan görülebileceği gibi $\Phi_{bn} = \Phi_n + V_{bi}$ ve uygulama gerilimi sıfır olduğunda ile $J_{m \rightarrow s}$ birbirine eşit olur. Yani

$$J_{m \rightarrow s} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp\left(\frac{-e\varphi_{bn}}{kT}\right) \quad (1.16)$$

olur. Eklemdeki net akım yoğunluğu $J = J_{s \rightarrow m} - J_{m \rightarrow s}$

olur. Daha açık ifadeyle

$$J = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\varphi_{bn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{-eV_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1.17)$$

olur. Burada A^* Richardson sabitidir.

$$A^* = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) \quad (1.18)$$

J_0 : ters doyma akım yoğunluğu olmak üzere

$$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{-eV_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1.19)$$

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\varphi_{bn}}{kT}\right) \quad (1.20)$$

şeklinde ifade edilir.

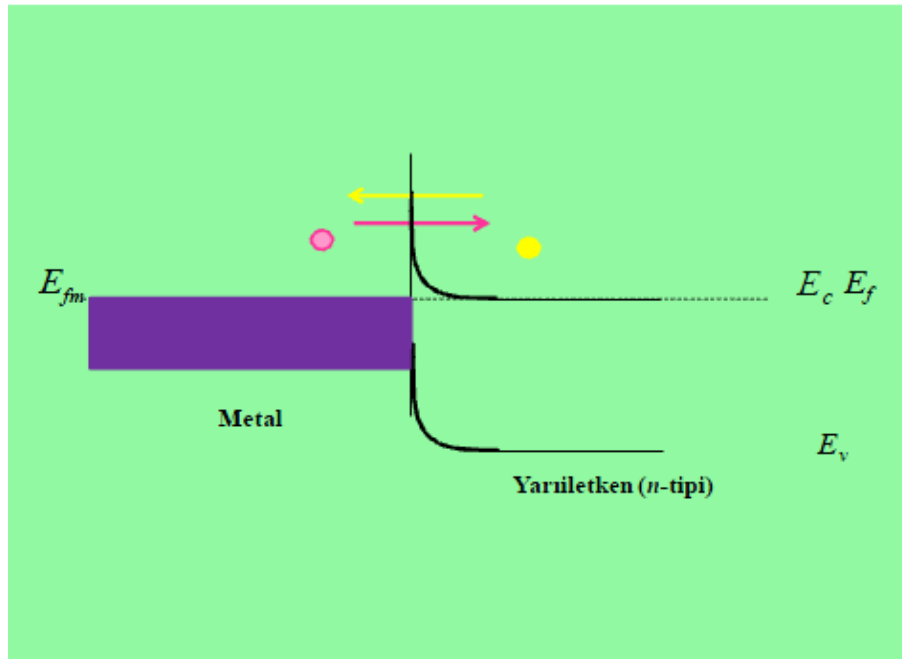
Φ_{bn} Schottky engel yüksekliğinin imaj kuvveti nedeniyle azaldığı ve $\Phi_{bn} = \Phi_{bo} - \Delta\Phi_{bo}$ şeklinde verildiği dikkate alınarak (1.20) ifadesi yeniden düzenlenirse

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\varphi_{bn}}{kT}\right) \exp\left(\frac{-e\Delta\varphi}{kT}\right) \quad (1.21)$$

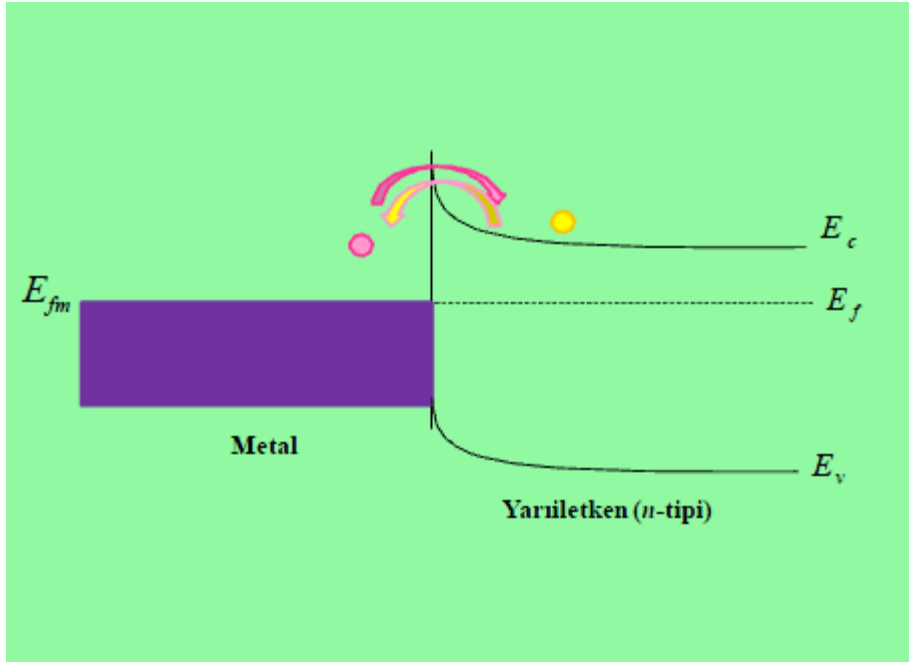
olur. Engel yüksekliğindeki $\Delta\Phi$ değişimi; artan elektrik alanla ya da artan ters beslem gerilimiyle artacaktır (Neamen 1992).

1.3 Tünelleme Yoluyla Akım İletimi

Metal-yarıiletken Schottky kontaklarda önemli olan diğer bir akım iletim mekanizmasında tünellemedir (Rhoderick 1988). Metal-yarıiletken ara yüzeyindeki tünelleme mekanizmasında, elektronlar engel genişliğinin (deplasyon bölge genişliği) kalın olmadığı durumlarda engelin üzerinden atlamaksızın Schottky engeli boyunca tünellemeyi gerçekleştirirler (Rhoderick 1988). Schottky engeli boyunca olan elektron tünellemesi ya yarıiletkenin Fermi seviyesinden metale doğru, alan emisyonu (FE) elektron tünellemesiyle ya da yüksek enerjilere uyarılabilecek ve dar üçgen potansiyel boyunca tünellenebilecek olan elektronların termal enerjisi yardımıyla, termoiyonik alan emisyonu (TFE) akıma katkıda bulunur. Alan emisyonunun (FE) oluşumu, yarıiletkenin aşırı oranda katkılanmış yarıiletkenlerde Fermi seviyesi iletkenlik bandı enerji seviyesiyle çakışır ve bu durumda alan emisyonu gerçekleşir (Şekil 1.9).



Şekil 1.9. Alan emisyonu mekanizması (Yiğit 2011)



Şekil 1.10. Termioyonik alan emisyonu mekanizması (Yiğit 2011)

Alan emisyonu ve termioyonik alan emisyon için akım,

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{E_0}\right) \quad (1.52)$$

ile verilir. Bu ifadede

$$\frac{E_0}{kT} = E_{00} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \text{ ve} \quad (1.53)$$

$$E_{00} = \frac{\hbar}{2} \left[\frac{N_d}{m_n^* \epsilon_s} \right]^{1/2} \quad (1.54)$$

Burada E_{00} tünelleme olasılığını temsil eden karakteristik enerjisi, m_n^* elektronun etkin kütlesi ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti N_d donör konsantrasyonudur. kT/qE oranı termioyonik emisyon ve tünelleme mekanizmaları hakkında önemli bilgiler verir.

E_{00} , deplasyon bölgesi kenarında iletkenlik bandının tabanıyla çakışan enerjiye sahip bir elektron için karşı tarafa geçme ihtimaliyetinin $1/e^2$ 'ye karşılık gelen Schottky engelinin difüzyon potansiyelidir.

$kT \ll qE_{00}$ ise (FE)

$kT \approx qE_{00}$ ise (TFE)

$kT \gg qE_{00}$ ise termoiyonik emisyon (TE) mekanizmalarının olması beklenir (Rhoderick 1988).

1.4. Norde Modelinden Seri Direncin Hesaplanması

$$F(V) = \frac{V}{2} - (\beta^{-1}) \ln(I / AA^* T^2) \quad (1.55)$$

fonksiyonu kullanılarak Schottky diyotların akım-gerilim karakteristikleri gösterildi (A.B.McLeon 1986). Bu fonksiyon yardımıyla çoğu Schottky diyotun seri direnç değerlerinden engel yüksekliklerini tahmin etmek mümkündür.

Schottky diyotların ölçülen I-V değerlerinden SBH (Φ_B) değerlerinin hesaplanmasını mümkün hale getirmek için standart bir yaklaşım Rhoderick (1978) tarafından geliştirildi.

$$I = I_s e^{\beta V / n} \quad (1.56)$$

Burada $\beta = 1/kT$, $V > 3/\beta$ voltaj aralığında $\ln I-V$ eğrisinden bulunur. Eşitlik (1.55) potansiyel engeli boyunca elektronların yayınlanmasından hareketle elde edilen ideal diyot eşitliğinin düzenlenmiş bir formudur. Schottky engelin büyüklüğü, eğrinin extrapole edilmesi suretiyle akım eksenini kestiği noktadan hesaplanabilir. Buna ek olarak $\ln I-V$ eğrisinin doğrusal bölgesi yoksa ve seri direnci çok yüksekse, standart yaklaşımı uygulamak çok zordur. $F(V)$ eğrisinin kullanılmasıyla bu zorluk ortadan kalkmıştır.

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{1}{AA^* T^2}\right) \quad (1.57)$$

Burada A diyotun alanı, A^* modifiye edilmiş Richardson sabitidir. Eğer $F(V)$ 'nin değişimine karşılık hiçbir seri direnç yoksa $F(V)$ 'ye karşılık $V = -1/2$ 'dir ve eğrinin extrapole edilerek $F(V)$ eksenini kestiği nokta direkt olarak Schottky engel yüksekliğini verir. Eğer yalnızca bir seri direnç varsa, fonksiyon asimptotik olarak $+1/2$ 'nin bir gradiyentine eşit olur. Her iki durumda da V_0 voltaj değerinde bir minimum vardır.

$$\Phi_B = F(V_0) + \frac{V_0}{2} - \frac{1}{\beta} \quad (1.58)$$

Seri direnç değeri,

$$R = (\beta I_0)^{-1} \quad (1.59)$$

Burada I_0 , V_0 doğru beslem değerindeki akım değeridir.

Engel yüksekliği eğer seri direnç çok küçükse extrapole edilmiş eğrinin $F(V)$ eksenini kestiği noktadan ya da eğer seri direnç çok büyükse minimum $F(V)$ 'deki pozisyonundan bulunabilir.

Norde'un metodu, seri direnç çok büyük olduğunda arayüzey düzensizliklerinden bağımsız olarak ideal diyotlar için Φ_{SB} 'nin tespit edilebilmesi için standart metotta yapılan bir ilerlemedir. Buna ek olarak Φ_{SB} 'nin voltaj bağımlılığı ya da iletim mekanizması termiyonikemisyondaki gibi hesaba katılmaz. ($N_d < 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) hafifçe dop edilmiş diyotlarda termiyonik alan emisyon eğrisinin ihmal edilmesine sık sık rastlanır. Bunun nedeni büyük ölçüde geniş engellerin tünelleme ihtimalini oda sıcaklığında tünelleme mekanizmasının güvenli bir şekilde ihmal edilebileceği bir seviyeye düşürmesidir. Fakat bazı durumlarda deplasyon bölgesinde lokalize olmuş durumlarda taşıyıcıların tuzaklanmasının ve rekombinasyon etkilerinin ihmal edilmesi doğru olmaz.

Doğru akım için bir rekombinasyon unsuru, yarıiletkenin enerji bandının enerjisine sahip lokalize olmuş durumlar vasıtasıyla oluşan deplasyon bölgesini aşabilen taşıyıcılar nedeniyle meydana gelir. Rekombinasyon merkezleri bir paralel iletim modelini sağlar ve I-V karakteristikleri yaklaşık olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$I = I_S \left(e^{\beta(V-IR)} - 1 \right) + I_r \left(e^{\beta(V-IR)/2} - 1 \right) \quad (1.60)$$

I_r : Asal taşıyıcı konsantrasyonunun ve deplasyon tabaka genişliğinin direkt olarak bir oranıdır ve deplasyon bölgesi boyunca taşıyıcı yaşama süresi ile ters orantılıdır

Rekombinasyon unsuru düşük sıcaklıklardaki ideal lineer davranıştan sapan $F(V)$ 'ye neden olur ve $V=0$ 'da $F(V)$ 'nin minimumunda bir yön değişimini meydana getirir. Eğer $F(V)$ büyük bir rekombinasyon unsuruna sahip Schottky engel yüksekliklerinde elde edilerek kullanılıyorsa engel yüksekliği tahmin edilen değer in altında olacaktır. Oluşan bu güçlük standart yaklaşımda da vardır.

Norde'un orijinal yaklaşımı da Φ_{SB} 'nin voltaja bağımlılığını ihmal eder ve bunun $F(V)$ ye etkisi engel yüksekliğinin voltaja bağımlılığının lineer ve $\Phi_{SB} - \Delta\Phi + \alpha V$ (burada $\Delta\Phi$ sıfır beslemdeki engel düşmesidir)'ye eşit olduğunu varsaymakla ortaya konabilir. Bu $3/\beta$ 'dan büyük voltajlar için rekombinasyon akımı ihmal edilerek gösterilmektedir. Böylelikle $F(V)$ aşağıdaki formu alır.

$$F(V) = \Phi_{SB} - \Delta\Phi + IR - \frac{V}{2}(1 - 2\alpha) \quad (1.61)$$

Düşük voltaj bölgesinde $F(V)$ 'nin eğimi $-1/2$ den $+1/2$ ye değişir ve eğrinin V_0 'da kesilmesi ile $F(V)$, asal Schottky engelin yüksekliğine (Φ_{SB}) eşit olur ($\Delta\Phi$ değişimi ile). Φ_{SB} 'nin voltaja bağımlılığı eğrinin eğimini değiştirir ve böylece minimum durumu da değişir. Bu sayede $F(V)$ 'den $\Phi_{SB} - \Delta\Phi$ için doğru bir değer elde edebilmek Φ_{SB} 'nin voltaja bağımlılığının minimum durumunu nasıl etkilediğini bilmekle mümkün olur.

$$\frac{dF}{dV} = 0$$

şartı kullanılarak

$$\frac{dI}{dV} = \frac{1}{2} \beta I \quad \text{elde edilir.} \quad (1.62)$$

Engel düşmesine bağlı voltajın varlığında $3/\beta$ civarındaki voltajlar için

$$\frac{dI}{dV} = \frac{\beta(1-\alpha)I}{(1+\beta IR)} \quad (1.63)$$

$I_r = 0$ olduğu durumda

$$I_0 = \frac{(1-2\alpha)}{\beta R} \quad (1.64)$$

elde edilir. Bu katkının değerlendirilmesiyle

$$F(V_0) = \frac{V_0}{2} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{I_0}{A.A^*T^2}\right) \quad (1.65)$$

olur. Schottky engel yüksekliği bu temel değişkenlere bağlı olarak aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\Phi_{SB} - \Delta\Phi = F(V_0) + (1-2\alpha)\left(\frac{V_0}{2} - \frac{1}{\beta}\right) \quad (1.66)$$

Φ_{SB} 'nin voltaja bağımlılığının etkisi, $(1-2\alpha)$ terimi ile belirlenmektedir ve $\Delta\Phi$ ve α sıfıra eşitlendiğinde Eşitlik 1.57 elde edilir. Sato ve Yasumara (1985) da benzer bir sonuç elde etmiştir. Aynı yazarlar, değişik sıcaklıklarda ölçülen iki ayrı I-V eğrisini kullanarak n , R ve Φ_{SB} değerlerini belirleme yoluna gitmişlerdir. Eşitlik 1.64'in sonucu ve Eşitlik 1.66 kullanılarak bu değerler saptanmıştır. Bu uygulamada bazı problemler vardır. Birincisi diyotun oda sıcaklığından itibaren artan sıcaklığının arayüzey yapısında geri dönüşü olmayan değişikliklere neden olabilmesidir. Üstelik numuneyi soğutmak zaman kaybıdır ve bir kriyostat gerektirir. Fakat bundan da önemlisi rekombinasyon akımının önemi düşük sıcaklıklarda artmaktadır. Bu nedenle rekombinasyon etkisi de hesaba katılmalıdır.

Daha önce rekombinasyon akımının daha düşük voltajlarda V_0 değerindeki bir değişikliğe neden olduğu gösterilmiştir. Böylece, arayüzeydeki bozukluğun büyük bir derecesinin varlığında bu değişim hesaba katılmıştır.

Eşitlik 1.58'deki voltaja bağımlı engel yüksekliğine sahip bir diyota Norde metodunun uygulanması Schottky engel yüksekliğinin gerçek değerinin üstünde hesaplanmasına neden olmuştur.

Cibil ve Buitrago (1985)'da $F(V)$ 'nin ve Φ_{SB} 'nin voltaja bağımlılığının etkisiyle ilgilenmişlerdir. Buna ek olarak R 'nin büyük olduğu durumda sadece oda sıcaklığındaki I-V ölçümlerinden basit bir grafiksel metot elde edilememiştir. Norde metodu rekombinasyon-jenerasyon etkileri ve voltaja bağlı engel yüksekliğini içine alacak şekilde kolaylıkla genellenemez. Bu genellenenin yapılabilmesi için Φ_{SB} , n , I_r ya da R parametrelerinin bazılarının önceden bilinmesi gerekir.

Sonuç olarak, voltaja bağlı engelin ya da rekombinasyon-jenerasyonun varlığında $F(V)$ 'nin minimumu olan V_0 'ın pozisyonunun değiştiği gözlenmiştir. Φ_{SB} 'nin voltaja bağımlılığı 'bir'den daha büyük olan idealite faktörlerine sebep olur ve bu da Φ_{SB} 'nin olduğundan daha büyük hesaplanmasına neden olur. Eğer rekombinasyon akımı V_0 'da ΔV_0 kadar bir değişiklik meydana getirirse bu Φ_{SB} 'nin yaklaşık ΔV_0 farkıyla olduğundan daha küçük olarak hesaplanmasına neden olur. Norde metodunun çoğu pratik diyota uygulanması yalnızca Φ_{SB} 'nin ve R 'nin yaklaşık olarak bir tahminini ortaya koyar. Gerçekte çoğu durumda eğri fit etme prosedürünü kullanarak diyotun elektriksel özelliklerini tahmin etmek çok daha kolaydır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Torrey ve Whitmer (1874), nokta kontak diyotları, frekans dönüştürücüsü ve mikrodalga detektör diyodu olarak kullanmışlardır.

Schottky (1939), metal-vakum sistemlerde imaj kuvvetten dolayı engel alçalmasını bulmuştur. 1942'de Bethe termoiyonik emisyon teorisinin metal yarıiletken doğrultucu kontaklara uygulanabileceğini göstermekle yarıiletken fiziğine çok önemli bir katkıda bulunmuştur.

Barden (1947), tarafından nokta kontak germanyum diyotlarında taşıyıcı enjeksiyonu bulunmuş ve germanyum transistörü yapılmıştır. Ayrıca Barden, yüzey hallerindeki net elektron yükü ve zıt işaretli uzay yükünden dolayı yarıiletkenin serbest yüzeyinde bir çift tabakanın (dipol tabakası) oluşacağını ileri sürmüştür.

Sze vd (1964), metal-yarıiletken doğrultucu kontakların teorik olarak izahını yapmışlar ve metal-yarıiletken kontaklarda imaj kuvvetten dolayı engel alçalmasını göstermişlerdir. Crowel ve Sze (1965), Schottky'nin difüzyon ve Bethe'nin termoiyonik emisyon teorilerini tek bir teori (emisyon-difüzyon teorisi) olarak göstermişlerdir.

Heine (1965), Al/n-Si Schottky diyotlarında, C-f karakteristiklerinde düşük frekanslarında görülen uzay yükü sığasına ilave kapasitenin sadece arayüzey hallerinden ileri gelmediği, bunun yanında ilave kapasitenin omik kontak direncinin belirgin bir kapasitesinin olduğu ve artık sığanın sadece ara yüzey hallerinin bir ölçüsü olmayacağı sonucuna varmıştır. Ziel (1968), metal-yarıiletken yapıların karakteristiklerini sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçmüş ve bu yapıları sıcaklığın tayininde kullanmıştır.

Deneuille ve Chakraverty (1972), Card ve Rhoderick'in çalışmalarını genişleterek hem arayüzey tabakasının kalınlığını hem de arayüzey hallerinin enerji dağılımını doğru ve ters beslem I-V karakteristiklerinden elde etmiştir.

Card ve Rhoderick (1973), arayüzey oksit tabakalı Si-Al kontaklarda arayüzey hal yoğunluğun belirlenmesi ve arayüzey hal yoğunluğunun doğru beslem I-V karakteristiklerinin idealite faktörü üzerine etkilerini analiz etmişlerdir.

Braun (1974), metal- yarıiletken yapılarla ilgili ilk araştırmayı yaptı. Bu araştırmayı Marconi'nin 1895'li yıllarda telekomünikasyona ait deneylerini göz önüne alarak, nokta kontak metal-yarıiletken doğrultucularını dedektör olarak kullanmıştır.

Barrett ve Vapaielle (1978), daha önce elde edilen metotları kullanarak arayüzey hallerinin enerji dağılımının deneysel olarak analizini açıklamıştır.

Bethe (1981), Richardson'un metal-vakum sistemi için, 1942 yılında bulduğu termiyonik emisyon teorisinin metal- yarıiletken yapılara da uygulanabileceğini göstermiştir

Sze (1981), p-n eklemleri yapımı için birçok metot geliştirdi ve metal-yarıiletken kontakları, bu eklem yapılarda akım iletimi için omik kontak olarak düşünülmesini sağlamıştır.

Willson (1983), metal-yarıiletken diyotlar için, kuantum mekaniksel tünelleme teorisini geliştirdi ve doğrultma teorisi için ters polariteyi açıklamıştır.

Evans ve Yung (1985), tarafından doğru beslem Schottky diyotlarında uzay yükü bölgesi kapasitesindeki fazlalık düşük frekans kapasitesi olarak gözlemlendi ve bu artık kapasiteyi azınlık taşıyıcılara değişik olarak yüzey hallerine atfedilmiştir.

Daw ve Chattopadhyay (1986), n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerle yapılan MIS tünel diyotlarının, engel yüksekliğinin tuzak yoğunluğuna bağlı değişimini incelediler ve engel yüksekliğinin safsızlığa kuvvetlice bağlı olduğu gözlemlenmişler.

Wu vd (1989), n- tipi yarıiletkenlerden yapılan Schottky diyotların, yüzey yükü ve arayüzeyde düşen voltaj göz önünde bulundurularak, arayüzey teorisini geliştirdiler. Pozitif uzay yükü artışının potansiyel engelini düşürdüğünü ve arayüzey tabakasında düşen voltajın doğru belsem I-V karakteristiklerinin, idealite faktörünü arttırdığını bulmuşlar.

Chattopodhyay ve RayChaudhuri (1993), seri direncin etkisini dikkate alarak Schottky diyotların doğru beslem C-V karakteristiklerinin frekansa bağlılığını incelemişler. C-V karakteristiklerinde gözlenen kapasite piki seri direnç etkisine atfedildi. Ayrıca, yüksek frekanslarda seri direncin daha etkin olduğu teorik olarak bu çalışmalarında belirtilmiş.

Türüt vd (1996), non-ideal diyotlar için C-V karakteristiğinin değişimini yüklerin alışverişinin nelere bağlı olduğunu açıklamışlar.

Batı (1999), yaklaşık son otuz yıldır metal-yarıiletken Schottky diyotlarında arayüzey hallerinin etkisi, çok yoğun bir şekilde, çeşitli metot ve tekniklerle araştırılmaktadır. Özellikle, son 25 yılda, arayüzey halleri hakkında bilgi, ilave veya artık kapasite (excess capacitance) analizlerinden çıkarılmıştır. Seri direncin karakteristiklere etkisi üzerinde durulmuştur. İlk olarak; Schottky diyotlarında ara yüzey halleriyle ilgili bir teorik çalışma Heine tarafından yapılmıştır.

Gamila ve Rubi (1997), bir yarıiletken eklem boyunca taşıyıcıların hareketini analiz ederek, ara yüzey hallerinin yoğunluğunun belirlenmesi için bir bağıntı elde etmişler. Bu bağıntıya bağlı olarak idealite faktörü için doğru beslem durumunda tüm beslem üzerinden geçerli olan analitik bir ifade bulunmuştur.

Metal-yarıiletken kontakların başka devre elemanlarıyla birlikte kullanımı, kontak yapımı sırasında yüzeyde oluşan doğal oksit tabakası üzerine yapılan çalışmalar (Morita 1990, Çetinkara vd 1999), bu yapıların oda sıcaklığında (Chang vd 1971; Temirci vd 2001) ve sıcaklığın fonksiyonu olarak karakteristiklerinin değişimini (Crowell vd 1964, Newman vd 1986, Werner ve Guttler 1991, Aboelfotoh 1991, Chand ve Kumar 1996) incelemişlerdir.

Schottky diyot yapılarının doğasının anlaşılması için yapılan birçok teorik ve deneysel çalışma vardır. Bunlar, yüzey halleri üzerine teorik çalışma (Heine 1965, Garcia-Moliner ve Flores 1976, Tejedor vd 1977), arayüzeyinin elektronik yapısı (Bardeen 1947, Andrews ve Philips 1975, Louie ve Cohen 1975), ara yüzey halleri (Levine 1971, Türüt ve Sağlam 1992, Ayyıldız vd 2001) ve ara yüzey tabakasının akım akışına karşı gösterdiği davranış üzerine (Brillson 1983, Rhoderick ve Williams 1988) gibi çeşitli çalışmalardır.

Tung (2001), Schottky diyotlarla ilgili yaptığı çalışmalarda deneysel olarak elde edilen I-V karakteristiklerinin bazı durumlarda termoiyonik emisyon modeli ile uyuşmayabileceğini göstermiştir. İdealite faktörü $n > 1,03$ olması halinde termoiyonik emisyon modelinden sapmaların meydana geldiği ve bu durumun termoiyonik emisyon modeli ile direkt olarak açıklanamayacağını ifade ederek bunun genellikle Schottky engel yüksekliğinin uygulama gerilimine bağlılığına atfedilebileceğini açıklamıştır. Ayrıca idealite faktörünün birden büyük olması ($n > 1$), imaj kuvvet etkisiyle engelin azalması, jenerasyon-rekombinasyon akımları, arayüzey halleri ve tünelleme gibi mümkün mekanizmalara da atfedilmiştir. Chattopadhyay, Schottky diyotlarda elektrik iletkenliğini kontrol eden ve önemli bir parametre olan engel yüksekliğini, uygulanan voltajın bir fonksiyonu olarak yüzey potansiyelinin değerlerini doğru beslem (DC) I-V karakteristiklerinden elde ederek çizmiş olduğu grafikten belirlemiştir (1995).

Aguas vd (2004), çok uzun süre bekletilen ve yüksek oksitli (MIS) diyotların I-V, C-V, C-f ve diğer parametrelere etkilerini açıklamışlar.

Kumta vd (2006), yüksek dielektriğe sahip metal-yarıiletken diyotların karakteristiklerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimini incelemişler.

Korkut vd. (2008), sputter tekniği ile elde edilen Cr/n-GaAs Schottky diyotların akım-gerilim-sıcaklık ($I-V-T$) ölçümlerini 60-320 K aralığında 20 K'lik adımlarla ölçtüler. Tavlanmamış numune için 320 K'de akım-gerilim ($I-V$) ölçümlerinden engel yüksekliği (Φ) için 0,61 eV ve idealite faktörü (n) için 1,03 değerleri elde edildi. 60 K'de ise Φ için 0,39 eV ve n için 1,95 değerlerini elde ettiler. Azalan sıcaklıkla engel yüksekliğinin azaldığını ve idealite faktörünün (n) arttığını gözlemlediler.

Bu durum metal-yarıiletken arayüzeyinde termiyonik emisyon (TE) mekanizmasının engel yüksekliğinin inhomojenliği ile açıklandı. Tavlanmanın neticesinde engel yüksekliği ve idealite faktörlerinde iyileşme olduğu gözlemlendi. 200 °C de tavlanan numune için $\Phi=0,64$ eV, $n =1,05$ ve 400 °C de tavlanan numune için $\Phi=0,74$ eV, $n = 1,00$ değerleri 320 K de elde edildi.

Yıldırım vd (2009), tavlınmamış, 200 °C ve 400 °C'de iki dakika termal tavlınmış Ni/n-GaAs/In Schottky engel diyotları (SED) sputter (saçtırma) tekniği kullanılarak hazırlanmıştır. Termal tavlamanın akım-gerilim (I-V) karakteristiklerine etkisini görmek için numune sıcaklığına bağlı özellikleri deneysel olarak araştırmıştır. Numunelerin akım gerilim karakteristikleri 60-320 K aralığında 20 K'lik adımlarla ölçüldü. 300 K'de tavlınmamış (referans) diyot için engel yüksekliği 0,84 eV iken 400 °C'de tavlınmış diyot için biraz yükselerek 0,88 eV değerine ulaşmıştır. Engel yüksekliğinin azalan numune sıcaklığı ile azalmasına karşı idealite faktörü değerlerinin artması engelin yanal inhomojenliği ile açıklanmıştır. Sıcaklığa bağlı I-V ölçümlerinden idealite faktörü n ve engel yüksekliğinin (BH) klasik termiyonik emisyon teorisi ile izah edilemeyeceğini göstermiştir. Deneysel veriler SBHs inhomojenliğin mevcut olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, sıcaklığa bağlı I-V karakteristikleri çoklu Gaussian dağılım fonksiyonları ile araştırıldı. Deneysel veriler tavlınmamış ve termal tavlınmış Ni/n-GaAs/In SBDs ölçülen tüm sıcaklık aralığı için SBH inhomojenliğinin önerilen double-Gaussian dağılım fonksiyonuna göre, fit eğrileriyle iyi bir uyum içinde olduğu göstermiştir. 400 °C'de tavlınan numune tüm ölçüm sıcaklığı üzerinden ideale yakın diyot özelliği gösterdiği deneysel olarak gözlenmiştir.

Ejderha vd (2011), Sputter tekniği ile Co/p-InP Schottky diyotları tavlınmamış ve 200 °C'den 700 °C'ye kadar tavlınmış numuneler hazırladılar. Tavlanmış numuneler oda sıcaklığına soğutularak akım gerilim karakteristikleri hesaplandı. Tavlanmamış numune için oda sıcaklığında engel yüksekliği 0,80 eV iken 400 °C'de tavlınmış numune için biraz azalarak 0,77 eV olarak elde edildi. Tavlama sıcaklığı 700 °C'ye çıktığında engel yüksekliği tekrar yükselerek 0,91 eV kadar yükselir. Numune sıcaklığına bağlı I-V ölçümleri 60-400 K aralığında yapılmıştır. Her bir diyot için engel yüksekliği artan numune sıcaklığı ile artmaktadır. 60-400 K numune sıcaklığı aralığında, 400 °C'de tavlınmış olan bir Co/p-InP SBD diyotların idealite faktörleri her bir numune

sıcaklığında tavlınmamış ve 200 °C'de tavlınmış olanlara göre daha düşük değerlere sahip olduğu gözlemlendi. Bu nedenle, Termal tavlama ile elde edilen diyot parametrelerinde dikkate değer belirgin bir iyileşme Co/p-InP arayüzeyinde 400 K'den 60 K'ye kadar her ölçüm sıcaklığında bozulmadan devam etmiştir. Sonuç olarak, termal tavlama işlemi ile daha kararlı metal yarıiletken Schottky kontaklar elde edilmiştir.

Demircioğlu vd (2011), elektron biriktirme (electro deposition) metodu ile hazırlanan Cr/n-Si/Au-Sb Schottky yapılarında akım-voltaj (I-V) karakteristikleri kullanılarak seri direncin sıcaklığa bağlılığı 80-320 K sıcaklık aralığında 20 K'lik adımlarla incelediler. Cheung fonksiyonlarından elde edilen seri direnç değerlerinin herbiri birbiri ile karşılaştırıldı ve bu seri direnç değerlerinin birbirleriyle uyumlu olduğu görüldü. Akım-gerilim ölçümleri kullanılarak Norde fonksiyonu yardımıyla engel yüksekliği ve seri direnç gibi parametreler elde edildi. Norde fonksiyonundan elde edilen engel yüksekliği ve seri direnç değerleri Cheung fonksiyonlarından elde edilenlerle karşılaştırıldı. Engel yüksekliği ve seri direnç değerlerinin özellikle düşük sıcaklıklarda I-V karakteristiklerinin çok farklı olması Cr/n-Si/Au-Sb Schottky yapısının düşük sıcaklık etkilerinden dolayı termiyonik emisyon teorisine uymamasına dayandırılmaktadır.

Kaçuş vd (2013), Au/antrasin/n-Si/Al (Metal-Yalıtkan-Yarıiletken) MIS yapısı altlık olarak kullanılan Si kristaline kovalent bağlanmış antrasen film ile imal ettiler. Elde edilen MIS yapı 300 K'de 0,85 eV engel yüksekliği ve 1,88 idealite faktörü ile Schottky diyot özelliği gösterdi. Au/antrasin/n-Si/Al MIS diyotlarının akım-gerilim (I-V) ölçümleri sıcaklığa bağlı olarak 140-300 K aralığında alınmıştır. I-V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliğinin artan sıcaklıkla arttığı ve idealite faktörünün sıcaklık artışı ile azaldığı gözlenmiştir. Bununla birlikte, Richardson grafiğinde doğrusal bölgenin eğimi ve ordinatı kestiği noktadan Aktivasyon enerjisi (Ea) ve Richardson sabiti (A*) değerleri sırasıyla 0,24 eV ve $7,57 \times 10^{-6} \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$ olarak elde edildi. Sıcaklık düşüşüyle seri dirençteki (Rs) artış, düşük sıcaklıklarda serbest taşıyıcı konsantrasyonunun eksikliğine atfedildi.

Karataş vd (2013), Cr/n-type Si (MS) Schottky engel diyodun elektriksel karakteristiklerini oda sıcaklığında (300 K) akım-voltaj (I-V) ve kapasite-voltaj (C-V) ölçümleri ile incelenmişler. Termiyonik emisyon teorisi kullanılarak, idealite faktörü ve

engel yüksekliği değerlerini sırasıyla I-V ölçümlerinden 1,22 ve 0,71 eV, C-V ölçümlerinden 1,01 ve 0,83 eV olarak elde ettiler. Yine, Norde fonksiyonu ile elde edilen engel yüksekliği (Φ_b) ve seri direnç (R_s) değerleri Cheung fonksiyonlarından elde edilenler ile karşılaştırılmış ve her iki yöntemin sonuçları arasında iyi bir uyum olduğu görülmüştü

Özaydın vd (2013), organik bakır (II) kompleksi ile, Au/n-Si metal-yarıiletken (MS) kontaklarının geleneksel elektriksel özelliklerini kontrol edilebilir olduğunu gösterdiler. Cu (II) kompleks/n-Si heteroeklem diyodun elektronik ve fotovoltatik özelliklerini araştırdılar. Diyotun idealite faktörü ve engel yüksekliğini sırasıyla 2,22 ve 0,736 eV olarak elde edildi. İdealite faktörü birden büyük olan diyot ideal olmayan akım-voltaj davranış gösterir. Bu davranış, seri direncin etkisi ve bir ara yüzey tabakasının varlığı ile sonuçlanır. Norde metodu kullanılarak seri direnç 6,7 k Ω ve engel yüksekliği 0,77 eV olarak elde edildi.

Aydemir vd (2013), organik yüzey tabakasının temel elektrik özelliklerine etkisini araştırmak için Au/n-Si ve Au/PVA:Zn/n-Si Schottky engel diyotlarını ürettik (SBDs). Zn katkılı poli(vinil alkol) (PVA:Zn) elektron eğirme (electro spinning) sistemi ve PVA yüzey morfolojisi kullanılarak n-Si alt tabaka üzerine başarıyla elde edilmiştir: Zn SEM görüntüleri alındı. Bu SBDs ait akım-gerilim (I-V) özellikleri, oda sıcaklığında araştırılmıştır. Deneysel sonuçlara göre idealite faktörü (n), sıfır beslem engel yüksekliği (Φ_{B0}), seri direnci (R_s) ve paralel direnç (R_{sh}) değerleri 1,38 ve 0,75 eV; 97,64 Ω ve 203 M Ω elde edilmesi arayüzey tabakasının cihazın performansını iyileştirdiğini göstermektedir. Oysa Au/n-Si SBD olanlar sırasıyla 1,65 ve 0,62 eV ; 164,15 Ω ve 0,597 M Ω olarak bulunmuştur.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Giriş

Bu bölümde Al/n-Si/Au metal-yarıiletken (Schottky) kontak diyotunun laboratuvar ortamında yapılan deneysel çalışmalar ve akım-gerilim karakteristiklerinin incelenmesi için alınan ölçümler ve diyot parametrelerinin hesaplanması yer almaktadır. İlk aşama da numunenin hazırlanma ve kimyasal temizlenme işlemi, ikinci aşama kontak oluşumunu, üçüncü aşama ise alınan ölçümlerden diyot parametrelerinin bulunması ve karakteristiklerinin incelenmesini içermektedir. Bu çalışma Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Katıhal Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

3.2. Numunenin Temizlenmesi ve Kontak için Hazır Hale Getirilmesi

Bu çalışmada, 400 μ m kalınlıkta, [100] doğrultusunda büyütülmüş, donör konsantrasyonu $2,5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ olan ve iki yüzü parlatılmış n-Si kristalleri kullanılmıştır. Numunenin her iki yüzünün parlatılmış olmasından dolayı, yüzeylerde herhangi bir mekanik hasar temizlemeye ihtiyaç duyulmadı. Ayrıca numunenin yüzeyinin organik ve mekanik kirlilerden arındırılması elde edilecek sonuçların güvenilir olabilmesi için oldukça önemlidir (Morita vd 1990). İdeal ve kaliteli bir diyot yapılabilmesi için kontak haline getirilecek maddelerin yüzeylerinin çok iyi bir şekilde temiz, parlak, oksitsiz ve pürüzsüz, organik ve ağır metal kirliliklerden arındırılmış olmalarının önemi büyük. Bu parçaların kimyasal olarak temizlenmesinde aşağıdaki sıra takip edildi.

1. Trikloretilende ultrasonik olarak 10 dakika yıkama
2. Asetonda ultrasonik olarak 10 dakika yıkama
3. Metanolde ultrasonik olarak 10 dakika yıkama
4. Deiyonize su ile ($18 \text{ M}\Omega$) iyice yıkama

5. RCA1 (H₂O: H₂O₂: NH₃; 18:3:3) içinde 50–60 °C’de 10 dakika yıkama
6. Deiyonize su ile iyice yıkama
7. RCA2 (H₂O: H₂O₂: HCl; 18:3:3) içinde 50–60 °C’de 10 dakika yıkama,
8. Deiyonize su ile iyice yıkama
9. HF (H₂O: HF; 10:1) çözeltisinde 30 sn yıkama,
10. Deiyonize su ile suda bekletme
11. Azot gazı (N₂) ile kurutma.

Buharlaştırmada kullanılan Al metali, kullanılmadan önce metanol de 5 dakika ve kullanılan ısıtıcılar kullanılmadan önce H₂O+HCl (10:1) 5 dakika ultrasonik olarak yıkandı (Chattopadhyay ve RayChaudhuri 1991, Türüt vd 1992). Buharlaştırma işleminden önce buharlaştırma cihazının temizliği yapıldı. Omik kontak yapılırken buharlaştırma işleminden sonra numune tavlanaacağı için, tavlama işlemi sırasında numune fırın içine konulurken kullanılan kuartz potada asetonla ve metanolle 5 dakika ultrasonik olarak yıkandı. Numuneye ve kaplama ünitesine gerekli kimyasal temizleme yapıldıktan sonra, n-Si kristali vakum cihazına (kaplama ünitesi) yerleştirildi.

İlk olarak kimyasal olarak temizlenen ve omik kontak yapımı için kullanılacak olan Al metali, molibden ısıtıcının üzerine yerleştirilerek, vakum ortamında eritildi ve 10⁻⁵ torr basınçta buharlaştırıldı. Vakum ortamından alınan numune kontakın homojen olması ve yarıiletkenin içine nüfuz etmesi için buharlaştırma işleminden sonra numune N₂ ortamında 570 °C’de 3 dakika tavlama fırınında tavlanaarak omik kontak elde edildi. Buharlaştırma ünitesi ve tavlama fırını Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de görülmektedir. Omik kontak işleminden hemen sonra Schottky kontak yapmak için Au metali molibden ısıtıcıya yerleştirildi, termal buharlaştırma ile yaklaşık 1,5 mm çapında Schottky kontaklar yapıldı. Sonuç olarak Au/n-Si/Al Schottky diyotu elde edilmiş oldu.



Şekil 3.1. Termal buharlaştırma ünitesi



Şekil 3.2. Termal tavlama fırını

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Schottky Diyotlarda Akım-Gerilim Ölçümleri ile Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi

Hazırlanan Schottky diyotların akım-gerilim ölçümleri için 'Keithley 487 Picoammeter Voltage Source' cihazı kullanılarak ölçümler oda sıcaklığında alındı. Schottky kontakların I-V ölçümlerinden sonra, bu ölçümlerden diyotun karakteristik parametreleri olan idealite faktörü (n) ve engel yüksekliği (Φ_b) elde edildi. İdealite faktörü, diyotun ideal özelliklerden sapmasını gösteren boyutsuz bir parametredir. İdeal bir diyot için bu faktör yaklaşık olarak 1'e eşit olmalı. Diyotun idealite faktörünün hesaplanmasında (4.1) ile verilen

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

ifadesi kullanıldı. Düz beslem durumunda $eV \gg 3kT$ olduğundan, bu ifadedeki 1 terimi ihmal edilebilir. Bu durumda (4.1) ifademiz

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \right] \quad (4.2)$$

şeklinde yeniden düzenlenir. Her iki tarafın tabii logaritması alındıktan sonra V 'ye göre türevi alınır, idealite faktörü

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4.3)$$

olarak elde edilir.

$\ln I - V$ grafiği çizilirse, bu grafiğin doğru beslem durumundaki lineer kısmına bir doğru fit edilerek bu doğrunun eğiminden $dV/d(\ln I)$ elde edilir. Bulunan bu değerler ve diğer sabit terimler (4.3) eşitliğinde yerine yazılarak idealite faktörleri hesaplanır. Fit edilen doğrunun $V=0$ 'da düşey eksenini kestiği nokta I_0 doyma akım yoğunluğunu verir. (4.1) ifadesindeki I_0 doyma akım yoğunluğu

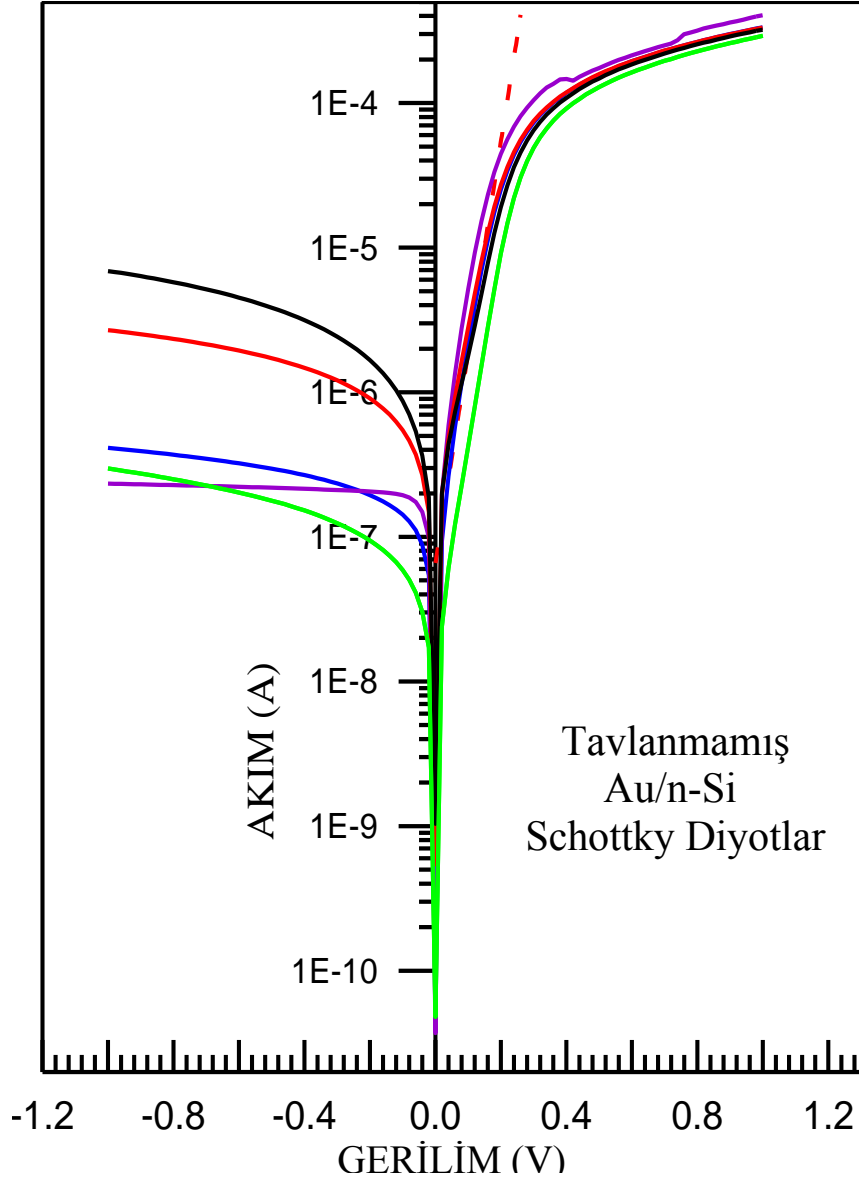
$$I_0 = AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \quad (4.4)$$

şeklinde verilmektedir. (4.4) eşitliğinin her iki tarafının tabii logaritması alınarak, Φ_b 'ye göre çözülrse

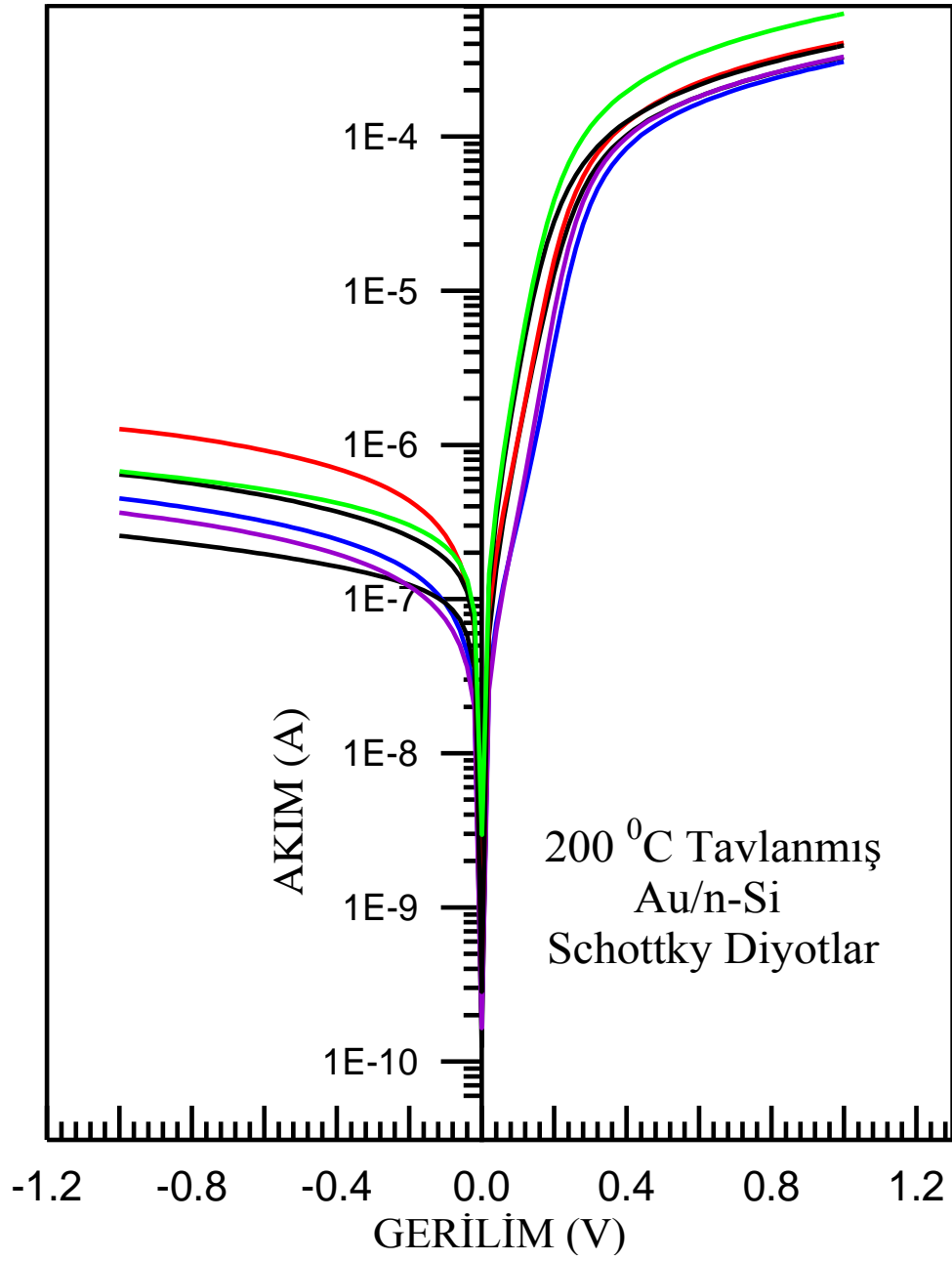
$$e\Phi_b = kT \ln(AA^* T^2 / I_0) \quad (4.5)$$

şeklinde engel yüksekliği ifadesi elde edilir. Burada, A^* Richardson sabiti olup n-tipi Si için $A^*=112 \text{ A/K}^2\text{cm}^2$ 'dir (Werner ve Rau 1994). A diyotun etkin alanı ($A=7,85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$), T Kelvin cinsinden ortamın sıcaklığı $T=300 \text{ K}$ alınmıştır ve k Boltzmann sabiti olup $k=8,625 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ 'dir. Bulunan bu değerler ve diğer sabit veriler denklemlerden (4.2) ve (4.4)'de yerine yazılarak idealite faktörleri ve engel yüksekliği hesaplanır.

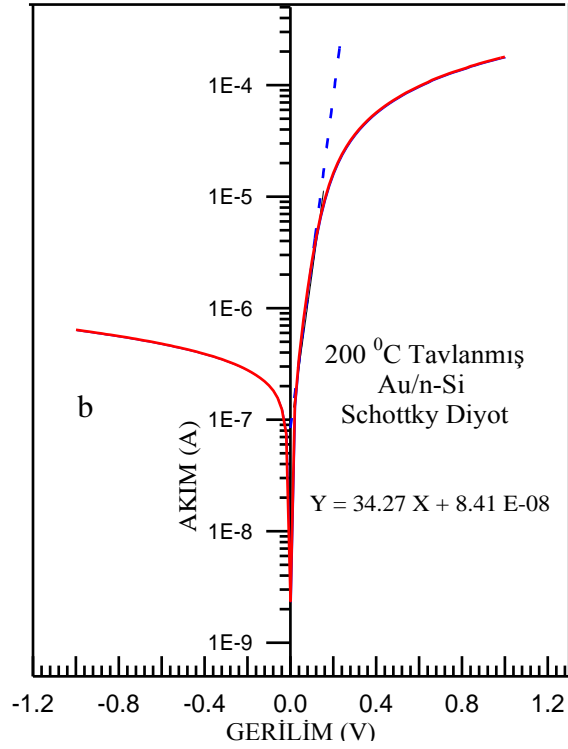
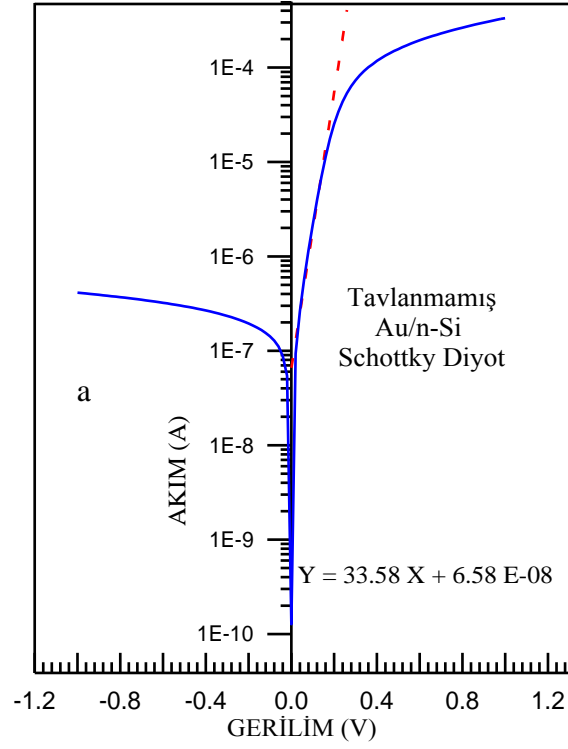
Tavlanmamış ve $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de tavlanmış tüm Al/n-Si Schottky diyotların oda sıcaklığındaki akım-gerilim karakteristikleri şekil 4.1, şekil 4.2'de verilmiş olup şekil 4.3'te ise bir adet diyota ait yarı logaritmik akım-gerilim grafiği ile fit doğrusu birlikte verilmiştir.



Şekil 4.1. Tavlanmamış 5 adet Au/n-Si Schottky diyotun oda sıcaklığında $\ln I-V$ grafiği



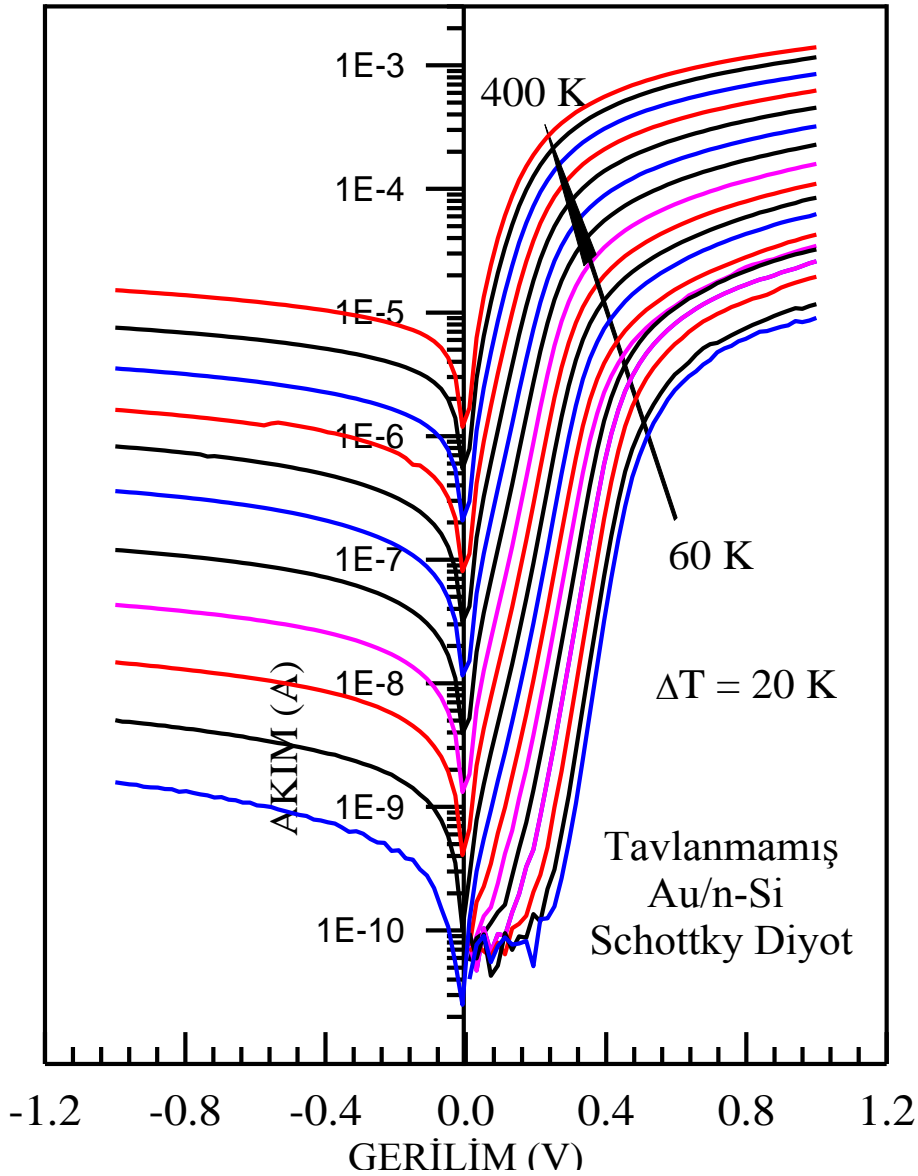
Şekil 4.2. 200 °C'de tavlanmış 6 adet diyotun oda sıcaklığında $\ln I-V$ grafikleri



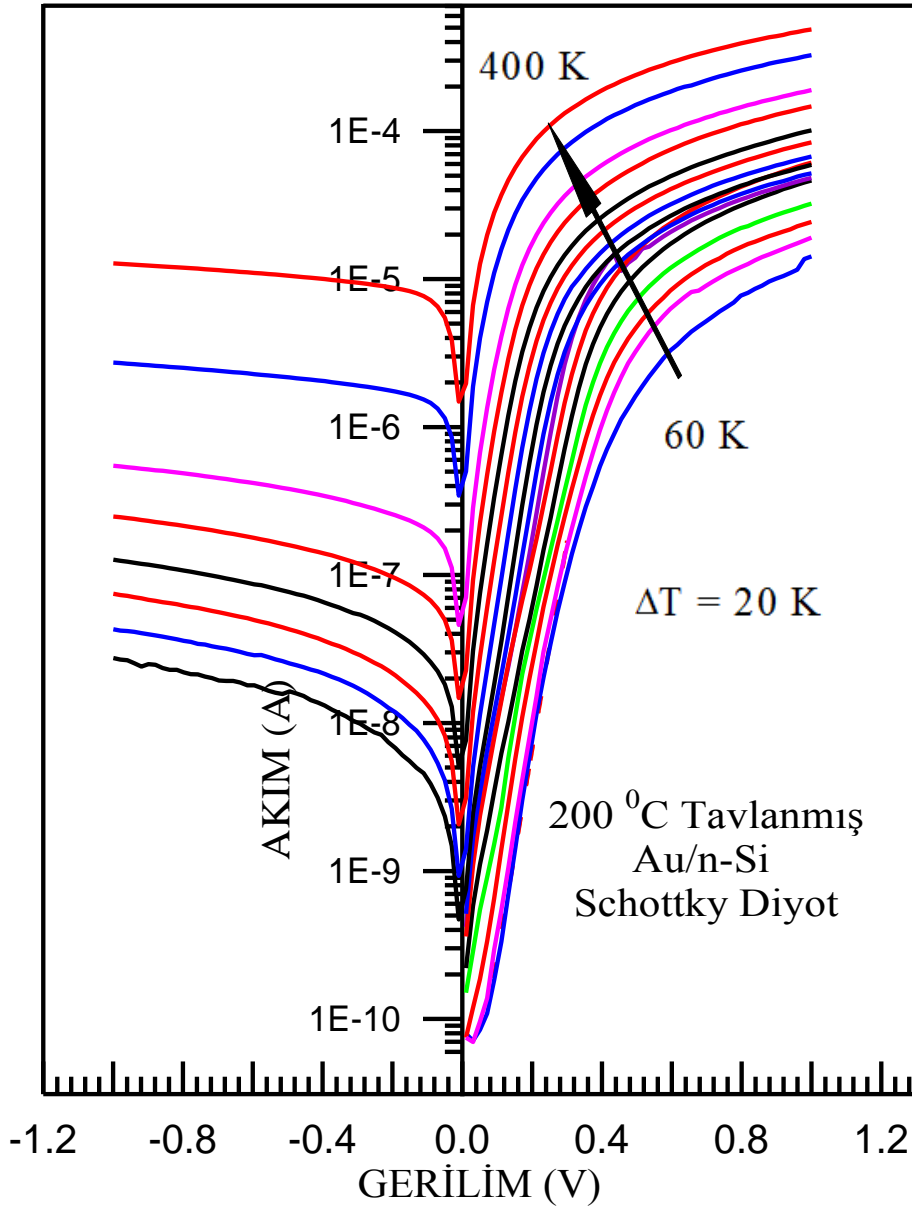
Şekil 4.3. Bir adet Au/n-Si Schottky diyotu için a) Tavlanmamış $\ln I-V$ grafiği ve fit doğrusu, b) 200 °C'de tavllanmış $\ln I-V$ grafiği ve fit doğrusu.

Tavlanmamış diyot için oda sıcaklığında idealite faktörü ve engel yüksekliği I-V ölçümlerinden 4.1 ile 4.3 denklemlerinden sırasıyla 1,15 ve 0,74 eV olarak hesaplanmıştır.

200 °C Tavlanmış diyot için oda sıcaklığında idealite faktörü ve engel yüksekliği I-V ölçümlerinden 4.1 ile 4.3 denklemlerinden sırasıyla 1,11 ve 0,73 eV olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.4. Tavlanmamış Au/n-Si Schottky diyotlarının sıcaklığa bağlı $\ln I$ -V grafiği



Şekil 4.5. 200 °C'de tavlanmış Au/n-Si Schottky diyotlarının sıcaklığa bağlı $\ln I$ - V grafiği

Şekil 4.4, Şekil 4.5'de Tavlanmamış ve 200 °C'de tavlanmış Al/n-Si Schottky diyotların tavlama ve numune sıcaklığına bağlı $\ln I$ - V grafiği verilmiştir.

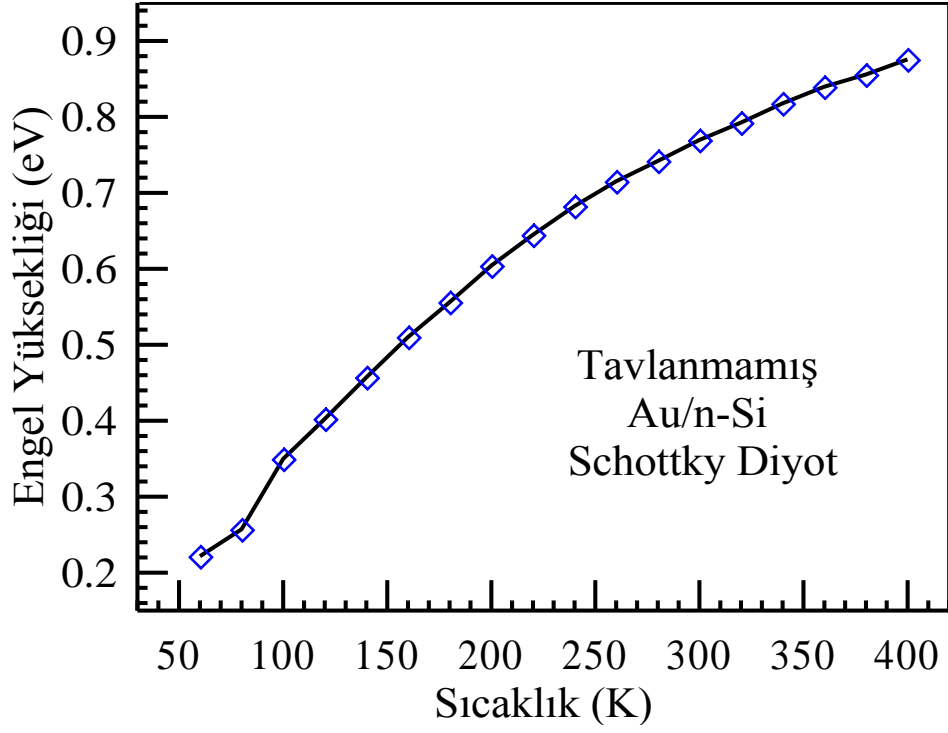
I - V grafiklerinden hesaplanan Al/n-Si/Au Schottky diyotların tavlama ve numune sıcaklığına bağlı idealite faktörleri ve engel yükseklikleri Tablo 4.1 ve 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Al/n-Si/Au Schottky diyotlar için ölçülen 60-400 K sıcaklık aralığında tavlanmamış diyotun idealite faktörünün ve engel yüksekliğinin numune sıcaklığına göre değişimi

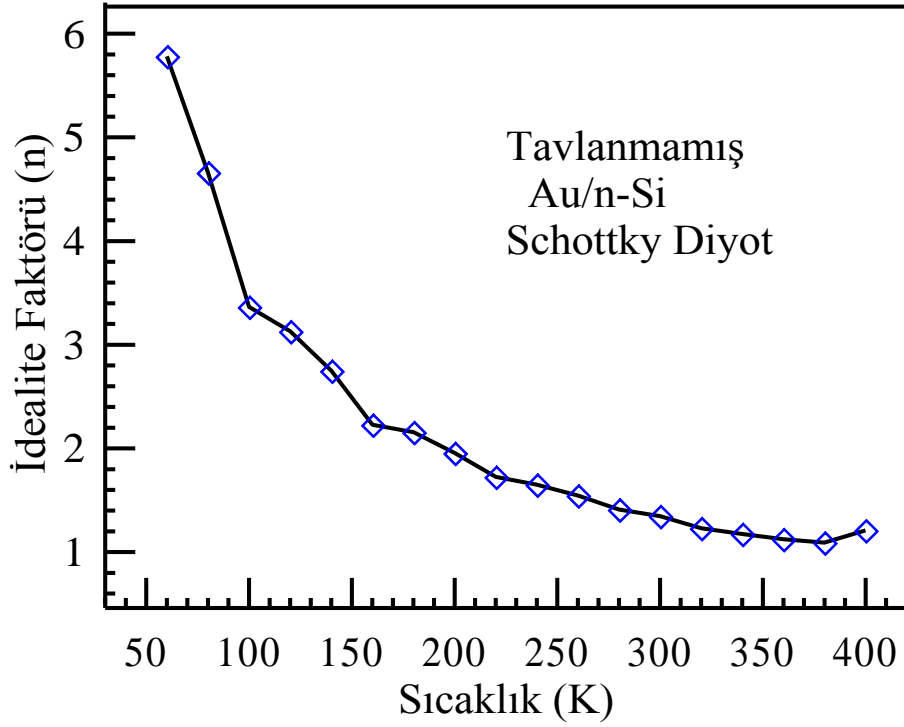
Sıcaklık (K)	Engel Yüksekliği (eV)	İdealite Faktörü (n)
60	0,22	4,57
80	0,26	4,75
100	0,35	2,99
120	0,40	2,67
140	0,46	2,34
160	0,51	2,08
180	0,56	1,93
200	0,60	1,72
220	0,64	1,60
240	0,68	1,49
260	0,72	1,40
280	0,74	1,34
300	0,77	1,24
320	0,79	1,19
340	0,82	1,10
360	0,84	1,02
380	0,86	1,02
400	0,88	1,04

Tablo 4.2. Al/n-Si/Au Schottky diyotlar için ölçülen 60-400 K sıcaklık aralığında 200 °C'de tavllanmış diyotun idealite faktörünün ve engel yüksekliğinin numune sıcaklığına göre değişimi

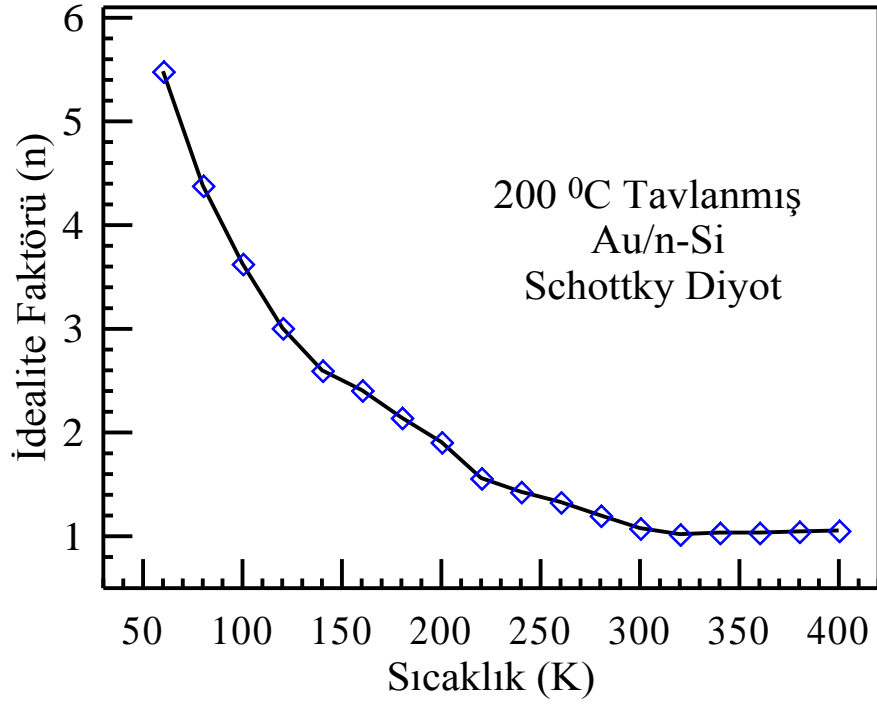
Sıcaklık (K)	Engel Yüksekliği (eV)	İdealite Faktörü (n)
60	0,18	5,48
80	0,24	4,38
100	0,29	3,63
120	0,35	3,01
140	0,40	2,60
160	0,45	2,41
180	0,51	2,14
200	0,56	1,91
220	0,61	1,56
240	0,65	1,43
260	0,69	1,33
280	0,73	1,20
300	0,76	1,08
320	0,79	1,02
340	0,82	1,04
360	0,83	1,04
380	0,85	1,05
400	0,88	1,05



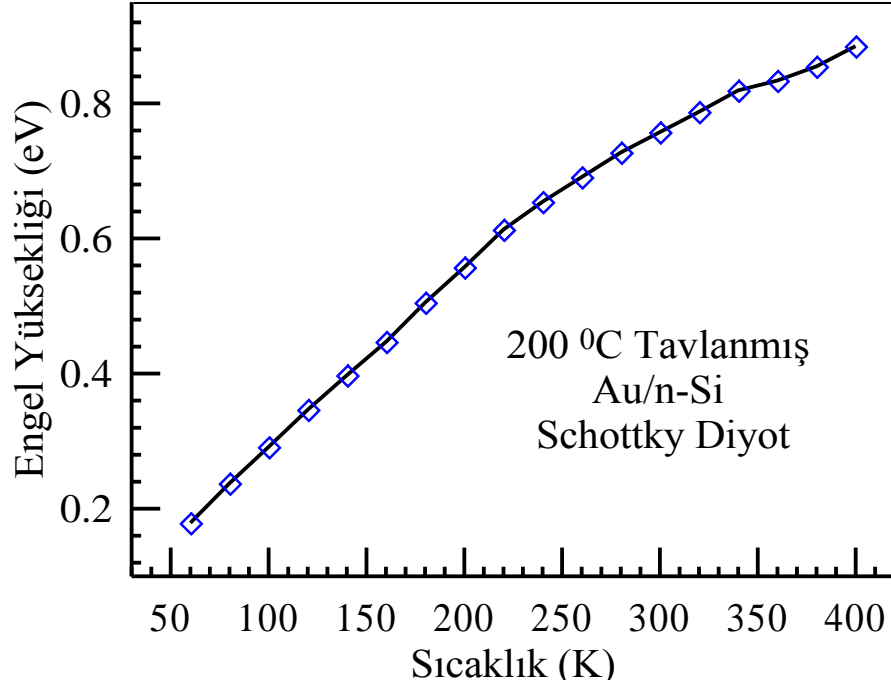
Şekil 4.6. Schottky diyotların oda sıcaklığında tavlansız sıcaklığa bağlı I-V ölçümlerinden elde edilen sıcaklığa bağlı engel yükseklikleri grafiği



Şekil 4.7. Schottky diyotların oda sıcaklığında tavlansız sıcaklığa bağlı $\ln I-V$ ölçümlerinden elde edilen sıcaklığa bağlı idealite faktörleri grafiği



Şekil 4.8. Schottky diyotların 200 °C 'de tavlammış sıcaklığa bağılı $\ln I-V$ ölçümlerinden elde edilen sıcaklığa bağılı idealite faktörleri grafiğı.



Şekil 4.9. Schottky diyotların 200 °C 'de tavllanmış sıcaklığa bağlı $\ln I-V$ ölçümlerinden elde edilen sıcaklığa bağlı engel yükseklikleri grafiği

4.2. Norde Modeli Yardımı ile Engel Yüksekliği ve Seri Direncin Hesaplanması

Norde fonksiyonu kullanılarak Schottky diyotların akım-gerilim karakteristikleri gösterildi. Bu fonksiyon yardımıyla çoğu Schottky diyotun seri direnç değerlerinden engel yüksekliklerini tahmin etmek mümkündür. Norde fonksiyonundan seri direnç değerini elde etmek için 1.59 ifadesi

$$R_s = kT \frac{(\gamma - n)}{I_0} \quad (4.6)$$

şeklinde düzenlenebilir.

Burada γ ifadesi n değerinden büyük olan ilk tam sayıdır. I_0 ise $\ln I-V$ grafiğindeki fit doğrusunun $V=0$ daki akım değeridir. Bu çalışmamızda idealite faktörünü sırasıyla tavlınmamış ve 200°C tavlınmış diyot için 1,11 ve 1,15 olarak hesapladık. Norde modelinde engel yüksekliği ise;

$$\Phi_B = F(V_0) + \frac{V_0}{2} - \frac{1}{\beta} \quad (4.7)$$

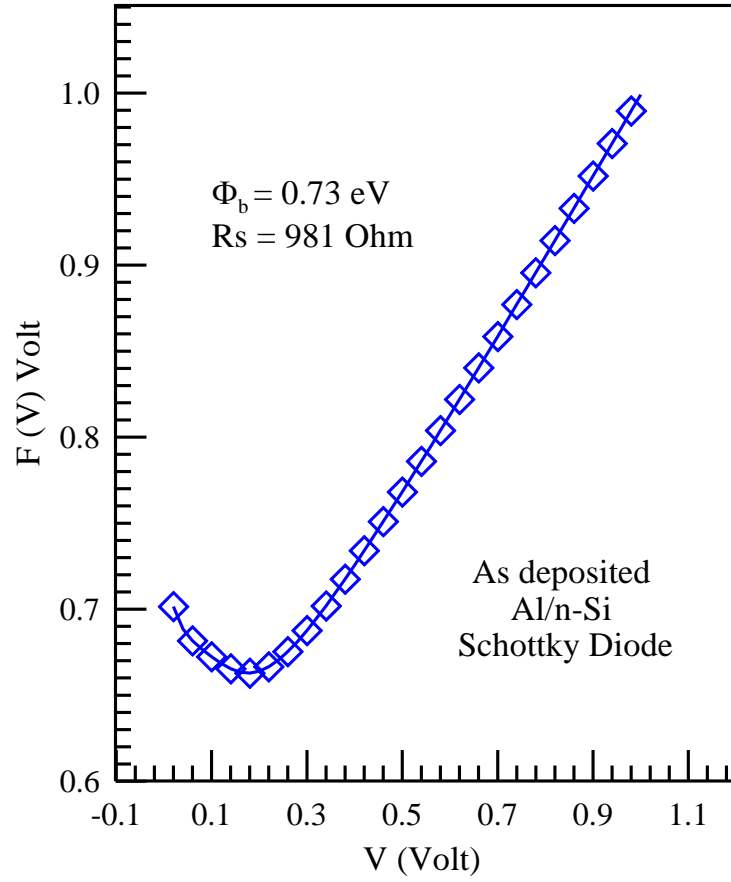
şeklinde verilir. Burada $F(V_0)$ ifadesi $F-V$ grafiğinin minimum $F(V)$ değeridir.

Hesaplamaların sonucunda ise tavlınmamış diyot için oda sıcaklığında idealite faktörü ve engel yüksekliği $I-V$ ölçümlerinden 4.3 ile 4.5 denklemlerinden sırasıyla 1,15 ve 0,74 eV olarak değerler bulundu. Ayrıca 200°C tavlınmış diyot için de oda sıcaklığında idealite faktörü ve engel yüksekliği $I-V$ ölçümlerinden aynı denklemlerden sırasıyla 1,11 ve 0,73 eV olarak hesaplanmıştır.

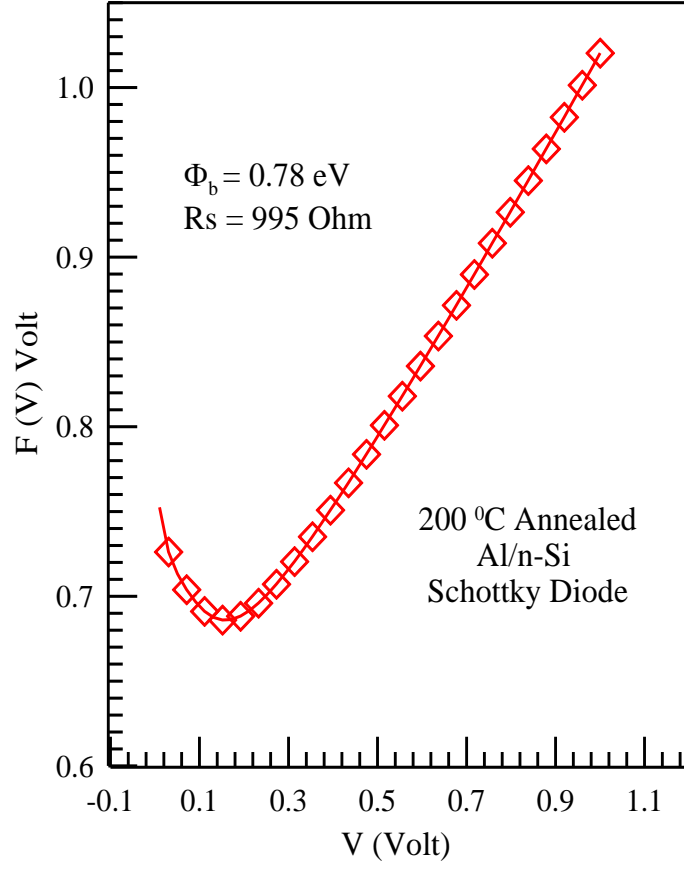
Norde'nin kullandığı bu model, ideal durumlar ve seri direncin küçük olduğu durumlar için geçerli olup, Bohlin ideal olmayan durumlar için genelleştirilmiş Norde modelini kullanarak seri direnç ve engel yüksekliği değerlerinin hesaplanabileceğini göstermiştir (Bohlin 1986).

Norde fonksiyonlarının eşitlik 4.7 denkleminde hareketle oda sıcaklığında tavlannmamış numune için engel yüksekliği 0,73 eV, 200 °C tavlannmış numune için 0,78 eV elde edilmiştir.

Seri direnç değeri (4.6) ifadesinden oda sıcaklığında tavlannmamış numune için engel yüksekliği 981 Ω , 200 °C'de tavlannmış numune için 995 Ω olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.10. Tavlannmamış numune için oda sıcaklığında Norde Fonksiyonlarından elde edilen $F(V)$ - V grafiği



Şekil 4.11. 200 °C'de tavlanmış numune için oda sıcaklığında Norde Fonksiyonlarından elde edilen F(V)-V grafiği

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Schottky diyotlar, günümüzde yarıiletken tabanlı elektronik teknolojisinin vazgeçilmez öğeleri haline gelmişlerdir. Bu aygıtların en yaygın kullanım alanları mikrodalga diyotlar, alan etkili transistörler (FET's), güneş pilleri, fotodedektörler, MESFET ve MOSFET olarak sayılabilir. Bu alanda yaklaşık yarım yüzyıldır yapılan çalışmalar sayesinde büyük ilerlemeler kaydedilmesine rağmen hala bu diyotların çalışma mekanizması ve elektronik doğası hakkında birçok soru işareti bulunmaktadır. Schottky diyotlardan maksimum verim elde edebilmek için özellikle diyotların elektronik karakteristiklerini etkileyen gerek fabrikasyon aşamasından kaynaklanan, gerekse de kullanılan metal ve yarıiletkenlerin asal özelliklerinden kaynaklanan tüm etkiler ayrı birer araştırma konusu olmuştur. Schottky diyotların karakteristiklerinin değerlendirmesi ile ilgili olarak ortaya atılan inhomojen engel yüksekliği (BH) modeli, sızıntı akımları, '1'den büyük idealite faktörleri ve idealite faktörünün sıcaklığa bağlılıkları gibi pek çok konunun aydınlatılmasında önemli bir yere sahiptir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde, bu keşfin zannedildiğinden çok daha önemli bir içeriğe sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu model, pek çok konuya olduğu gibi diyot karakteristiklerinin sıcaklık karşısındaki davranışlarına da dikkate değer açıklamalar getirmektedir. Sıcaklığa karşı aktivasyon enerjisinin değişimi de engel inhomojenliği modeli ile açıklanabilir.

Elektronik devre aygıt teknolojisindeki gelişmeler fabrikasyon teknikleri ve kullanılan malzemelerin elektriksel özelliklerinin önemini ortaya koymuştur. Bu bakımdan diyot üretiminde, diyotun kullanılacağı şartlara bağlı olarak, uygun malzemeyi ve uygun üretim tekniğini seçmek gerekmektedir. Si yarıiletkeni üzerine yapılan çalışmalar, Si-metal kontaklar üzerine kullanışlı bilgileri bilim adamlarının hizmetine sunmuştur. Kontak özelliklerinin yeniden oluşturulabilmesi ve bu özelliklerin kararlılığı, yüksek kalitede Schottky diyotların üretilmesine imkan sağlamaktadır. Seçilen malzemeyle birlikte üretimde kullanılan metodun da diyot performansı açısından önemi büyüktür.

Schottky diyotların hazırlanması için, 400µm kalınlıkta, [100] doğrultusunda büyütülmüş, donör konsantrasyonu $2,5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ olan ve iki yüzü parlatılmış n-Si kristalleri kullanılarak yaklaşık 1,5 mm çapında Al/n-Si/Au Metal-yarıiletken/metal kontak (Schottky diyot) numuneler elde edildi. Elde edilen diyotların I-V karakteristikleri 60-400 K aralığında 20 K'lik basamaklarla ölçülmüştür.

Akım-voltaj karakteristiklerinin sadece oda sıcaklığında detaylı çalışılması metal-yarıiletken arayüzeyinde Schottky diyotların engel yüksekliğinin ve iletim mekanizmasının doğasının tam olarak anlaşılması için yeterli bilgiyi sağlamaz. Bu durumun detaylı analizini yapabilmek için üretilen Schottky diyotların tavlandıktan önce ve 200 °C sıcaklığında 2 dakika tavlandı ve her tavlama işleminden sonra sıcaklığa bağlı akım gerilim ölçümleri yapıldı. Tavlanan numunelerin beklendiği gibi termodinamik olarak daha kararlı kaldığı gözlemlendi. Akım-Voltaj ölçümlerinden elde edilen veriler kullanılarak numunelerin $\ln I-V$ grafikleri çizildi (Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te verilmiştir). Grafiklerin doğru beslem bölgesindeki lineer kısmına fit edilmesiyle elde edilen doğrunun eğimi ve düşey eksenini kestiği noktadan doyma akımı yardımıyla termiyonik emisyon teorisinden idealite faktörleri ve engel yükseklikleri elde edildi.

Hesaplamaların sonucunda ise tavlınmamış diyot için oda sıcaklığında idealite faktörü ve engel yüksekliği I-V ölçümlerinden 4.3 ile 4.5 denklemlerinden sırasıyla 1,15 ve 0,74 eV olarak değerler bulundu. Ayrıca 200 °C tavlınmış diyot için de oda sıcaklığında idealite faktörü ve engel yüksekliği I-V ölçümlerinden aynı denklemlerden sırasıyla 1,11 ve 0,73 eV olarak hesaplanmıştır. Bulunan bu değerler Ç. Nuhoğlu ve Y. Gülen tarafından 2010 yılında yapılan çalışmalarından elde ettikleri sonuçlarla uyum içindedir. Diyotun 200 °C'de tavlınmasıyla karakteristiklerinde fazla bir değişiklik gözlenmemiştir.

Diyotun tavlama ve numune sıcaklığıyla karakteristik parametrelerinin değişip değişmediğinin değişimini görmek için diyotların sıcaklığa bağlı akım-gerilim karakteristikleri incelendi. İdealite faktörü değerlerinin artan numune sıcaklığı ile azaldığı tavlınmamış ve 200 °C'de tavlınmış numuneler için değerler Tablo 4.1 ve Tablo 4.2.'de sırasıyla görülmektedir. Tablo 4.1 ve Tablo 4.2. engel yükseklikleri açısından incelendiğinde numune sıcaklığına bağlı olarak engel yüksekliğinin azalan numune

sıcaklığı ile azaldığı görülmektedir. Buna göre tavlama neticesinde diyot tavlama sıcaklığına bağlı olarak daha kararlı hale gelmiştir. Bu durum, metal yarıiletken arayüzeyindeki istenmeyen fazların tavlama sıcaklığına bağlı olarak azaldığının veya büyük ölçüde yok olduğunun bir kanıtıdır.

Metal-yarıiletken arayüzeyinde düşük sıcaklıklarda elektronlar düşük engeli tercih eder. Yani, sıcaklık ve uygulama voltajı arttıkça daha fazla elektron yüksek engeli aşabilecek enerjiye sahip olabileceklerdir. Ayrıca, düşük sıcaklıklarda idealite faktörünün artması ve engel yüksekliğinin azalmasını arayüzey yüklerinin düzgün dağılmaması ve inhomojenlik gibi diğer bazı sebepleri etkileyecektir (Zhu vd 1999).

Düşük voltajlarda yarı logaritmik skalada Schottky diyotların akım-gerilim karakteristikleri lineerdir. Fakat seri direnç (R_s), arayüzey tabakası ve arayüzey durumları gibi parametrelerin etkisinden dolayı, yüksek voltajlarda metal-yarıiletken doğrultucu kontakların akım-gerilim karakteristiklerinde beklenen değerden bir sapma gözlenir (Aydın vd 2006). Yani lineer olması beklenen akım-gerilim karakteristiği yüksek voltajlarda parabolik bir değişim gösterir.

Metal-yarıiletken doğrultucu kontakların seri dirençleri ne kadar düşük olursa akım-gerilim karakteristikleri o kadar lineer olur ve diyot kalitesi de aynı oranda artar. Au/n-Si Schottky diyotların oda sıcaklığında tavlandıktan önce ve 200 °C'de tavlandıktan sonra seri direnç ve engel yüksekliği değerleri Norde Fonksiyonları kullanılarak hesaplandı. Şekil 4.10 ve Şekil 4.11.'de diyot tavlandıktan önce ve 200 °C'de tavlandıktan sonraki doğru beslem deneysel I-V karakteristiklerinden $F(V)$ -V grafikleri çizilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi diyotun tavlandıktan önce ve 200 °C'de tavlandıktan sonraki Norde fonksiyonlarından hesaplanan sıfır beslem seri direnç değerleri sırasıyla 981 Ω , 995 Ω olarak bulunmuştur. Bu değerlerden de açıkça görülebileceği gibi diyotta seri dirence neden olan metal yarıiletken arayüzeyindeki oksit tabakası, istenmeyen safsızlıklar gibi etkiler tavlama sıcaklığı düşük olduğundan diyot parametrelerinde önemli bir değişikliğe neden olmamıştır.

Yaptığımız çalışma, tavlama olayının numunenin arayüzeyini iyileştirmesidir. Tavlama neticesinde diyot tavlama sıcaklığına bağlı olarak daha kararlı hale gelmiştir. Bu durum,

metal-yarıiletken arayüzeyindeki istenmeyen durumların tavlama sıcaklığına bağı olarak azaldığıın veya büyük ölçüde yok olduğunun bir göstergesidir. Bu nedenle daha yüksek tavlama sıcaklıklarında bu iyileştirmenin daha belirgin olacağı açıktır. Her zaman için numunenin tavlaması önerilir.

KAYNAKLAR

Aboelfotoh, M. O., "Temperature Dependence of Schottky-Barrier Height of Tungsten on *n*-type and *p*-type Silicon", *Solid State Electron*, 34: 51-55, 1991.

Aboelfotoh, M. O., "Electrical Characteristics of Ti/Si (100) Interfaces", *J. Appl. Phys.*, 64: 4046-4055, 1993.

Aguas, H., Goulet, A., Pereria, L., Fotunato, E., Martins, R., "Effect of the tunnelling oxide thicknes and density on the performance of MIS photodiodes", *Thin Solid Films*, (451-452): 361-365, 2004.

Andrews, J. M. and Philips, J. C., "Chemical Bonding and Structure of Metal-Semiconductor Interface", *Phys. Rev. Lett*, 35: 56-59, 1975.

Ayyıldız, E., Temirci, C., Batı, B., and Türüt, A., "The effect of serial resistance on calculation of the interface state density distribution Schottky diodes", *Int. J. Electron*, 88: 625-633, 2001.

Aydemir, U., Taşcıoğlu, İ., Altındal, Ş., Uslu, İ., "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, 2013.

Batı, B., "Al-Sb/*n*-Si/Cu Schottky Diyotlarında Seri Direncin I-V ve C Karakteristiklerine Etkileri", *Y.Y.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 1993.

Batı, B., "İdeal ve İdeal Olmayan Omik ve Doğrultucu Kontaklı Au/*n*-Si Schottky Diyotlarında Doğru Beslem Kapasite-Voltaj-Frekans Karakteristikleri", *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 1999.

Barden, J. "Metallisation an Metal-Semiconductor İnterface States", *J. Phys. Rew*, (A): 71- 717, 1947.

Bardeen, J., "Surface State and Rectification at a Metal-Semiconductor Contact", *Phys. Rev.*, 71: 717-727, 1947.

Barret, C., Vapaille, A., "Interface States in a Cleaved M-S Junction", J. Appl. Phys, 50(6): 313-314, 1978.

Brillson L. J., "Advances in understanding Metal-Semiconductor interfaces by surfaces science techniques", Journal of Physics and Chemistry of Solids, 44:(8), 1983.

Bethe, H.A., "Massachusetts Institute Of Technology Radiation Laboratory Report" 43, 1942.

Bethe, H. A., "Theory Of The Boundary Layer Of Crystal Rectifiers", Mass. Ins. Techno. Radia Lab Reba, (1942): 43-12 s, 1981.

Card H.C. and Rhoderick E.H., "Studies of Tunnel MOS Diodes I. Interface Effects in Silicon Schottky Diodes", J. Phys. D, Appl. Phys, 4: 1589-1601, 1971.

Card, H.C., Rhoderick, E.H., "The Effect on Interfacial Layer on Minority Carrier Injection in Forward Biased Silicon Schottky Diodes", Solid-State Electron, 16(3): 365-374, 1973.

Çetinkara, H.A., Sağlam, M., Türüt, A. and Yalçın, N., "The effects of the time-dependent and exposure time to air on Au/epilayer n-Si Schottky diodes", Eur. Phys. J. Ap., 6: 89, 1999.

Chandra, M. M. Parsad, M.J., "Simple Interface Layer Model For The Nonideal Characteristics of The Schottky Diodes", Phys. D, App. Phys, 19(1): 89-93, 1986.

Chand, S. And Kumar. J., "Evidence for the double distribution of barrier heights in Pd₂Si/n-Si Schottky diodes from I-V-T measurement. Semicond", Sci. Technol., 11: 1203-1208, 1996.

Chang, T. N. Ishihara T., and Poe R. T., "Correlation Effect and Double Electron Ejection in the Photo absorption Process", Phys. Rev. Lett. 27(13): 838-840, 1971.

Cheung, S.K. and Cheung, N.W., "Extraction of Schotky Diode Parameters From I-V Characteristics", Appl. Phys. Lett, 49(2): 85-87, 1986.

Chattopadhyay P., Daw., A.N., "On the Current Transport Mechanism in a Metal-Insulator-Semiconductor (MIS) diode", Solid State Elect., 29: 555-560, 1986.

Chattopadhyay, P. and Raychaudhuri, R., "Modified conductance technique for the determination of series resistance of mistunnel-diodes", *Solid-State Elect*, 34(12): 1455-1456, 1991.

Chattopadhyay, P., Raychaudhuri, B., "Frequency Dependence of Forward Capacitance-Voltage Characteristics of Schottky Barrier Diodes", *Solid-State Electron*, 36(4): 605 - 610, 1993.

Chattopadhyay, P., "A new technique for the determination of barrier height of Schottky barrier diodes. *Solid-State Electronics*", 38(3): 739-741, 1995.

Crowell, C.R., Sze, S.M. and Spitzer, W.G., "Equality of the temperature dependence of Gold-Silicon Surface Barrier and Silicon Energy Gap in Au *n*-type Si Diode", *Appl. Phys. Lett*, 4: 91-92, 1964.

Crowell, C.R., Sze, S.M., "Tungsten Semiconductor Schottky Barrier Diodes *Transaction of The Metallurgical Soc*", *J. Appl. Phys.* 36(8): 321-326, 1965.

Cova, P., Singh, A., Medina, A., And Masut, R.A., "*Solid-State Elect*", 42: 23, 1998.

Daw, K., Chattopadhyay, P., "Control of Barrier Height of MIS Tunnel Diodes Using Deep Level Impurities", *Solid-State Electron*, 34(2): 367-371, 1991.

Demircioğlu, O., Karataş, Ş., Yıldırım, N., Bakkaloğlu, Ö.F., "Effects of temperature on series resistance determination of electrodeposited Cr/n-Si/Au-Sb Schottky structures", *Microelectronic Engineering*, (88): 2997-3002, 2011.

Deneuille, A., "Chakraverty, B.K., In proceedings of the symposium on electronics technology", s. 2, 1972.

Duman, S., "n-In Se ve n-In Se:Sn Tek Kristallerinin Yasak Enerji Aralığına Elektrik Alanın Etkisi ve n-InSe:Sn Yarıiletkeninin Schottky Kontak Davranışı", *Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2006.

Ejderha, K., Yıldırım, N., Türüt, A., ve Abay, B., "Temperature-dependent I-V characteristics in thermally annealed Co/p-InP contacts", *The European Physical Journal Applied Physics*, 2011.

Evans, H. L., Wu, X., Yang, E. S., Hoi, P. K., "Electronic States At Slicide Silicon Interfaces", *Phys. Rev. Lett*, 56(2): 177-180, 1985.

Gamila, G., and Rubi, J.M, “Analysis of Current Voltage Characteristics of Inhomogenous Schottky Diodes”, J. Appl. Phys, 81(6): 2674 -2678, 1997.

Garcia-Moliner, F. and Flores , “Theory of electronic surface states in semiconductor”, J. Phys. C: Solid State Phys., 9: 1609-1634, 1976.

Güllü, Ö., “H₂ Öntavlamalı Au/n-GaAs Diyotlarda Elektriksel Karakteristiklerin Schottky Metal Kalınlığı ve Sıcaklığa Bağlı Değişiminin İncelenmesi”, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 2-11, 2008.

Heine, V., “Theory of Surface States”, Phys. Rev. A. 138: 1689-1696, 1965.

Heiene, V., “Calculation of The Optical Absorption Between Surface States of Silicon”, Surface Science. 43(2): 417-430.

Horvath Zs.J., “Evaluation of The Interface States Energy Distribution From Schottky I-V Characteristics”, J. Appl. Phys., 63: 976-978, 1988.

Karataş, H., Yıldırım, Nezir, Türüt, A., “Electrical properties and interface state energy distributions of Cr/n-Si Schottky barrier diode”, Superlattices and Microstructures, (64): 483–494, 2013.

Yıldırım, N., Türüt, A., “A theoretical analysis together with experimental data of inhomogeneous Schottky barrier diodes”, Microelectronic Engineering, (86): 2270–2274, 2009.

Kumta, A., Rusli E., Chin-Che Tin., Ahn J., “Desing of field-plate terminated 4H-SiC Schottky diyotes using high dielectrics”, Microelectronic reliability 46(8): 1295-1302, 2006.

Kaçus. H., Deniz. A.R., Çaldıran. Z., Aydoğan. Ş., Yesildag. A., Ekinici. D., “The analysis of the current voltage characteristics of the high barrier Au/Anthracene/n-Si MIS devices at low temperatures”, Materials Chemistry and Physics (143): 545-551, 2013.

Levine, J.D., “Schottky-Barrier Anomalies and Interface State”, J. Appl. Phys., 42: 3991-3999, 1971.

Louie, S.G. and Cohen, M.L., “Self-Consistent Pseudopotential Calculation for Metal-Semiconductor Interface”, Phys. Rev.Lett., 35: 866-869, 1975.

Morita, M. Ohmi, T. Hasegawa, M., Kawakami, M. And Ohwada, M., “Growth of native Oxide on a silicon surface”, J. Appl. Phys., 68: 1272-1280, 1990.

Mcleon, A.B., “Semicond. Sci. Tech., Limitations to the Norde I-V plot”, 1: 177-179, 1986.

Mönch, W., “Barrier height of real Schottky contacts explained by metal-induced gap states and lateral inhomogeneities”, J. Vac. Sci. Tech. B. 17: 1867-1876, 1999.

Neaman, D., “Semiconductor Physics and Devices”, R. R. Donnelley & Sons Company, Sydney, 1992.

Newman, N., van Schilfgaarde M., Kendelwicz T., Williams M.D. and Spicer W.E., “Electrical study of Schottky barriers on atomically clean GaAs(110) surfaces”, Phys.Rev. B, 33: 1146-1159, 1986.

Nuhoğlu, Ç., Ayyıldız, E., Sağlam, M., and Türüt, A., “Appl. Surf. Sci”, 135: 50, 1998.

Nuhoğlu, Ç., Gülen, Y., “The effect of high temperature annealing on Schottky diode characteristics of Au/n-Si contacts”, Vacuum, 84: 812–816, 2010.

Raychaudhuri, R., and Chattopadhyay, P., “Appl. Surf. Sci”, 78: 233, 1994.

Özaydın, C., Akkılıç, K., İlhan, S., Rüzgar. Ş., Güllü, Ö., Temel, H., “Characterization of an Au/n-Si photovoltaic structure with anorganic thin film”, Materials Science in Semiconductor Processing, (16): 1125–1130, 2013.

Rhoderick E.H. and Williams R.H., “Metal-Semiconductor Contacts, 2nd ed. Clarendon”, M. A. Press, Oxford, 1988.

Rideout, V.L., “A review of the theory, technology and applications of metal semiconductor rectifiers Thin Solid Films”, 48(3): 261-291p, 1978.

Sze, S.M., Crowel, C.R., Khang, D., “Physics of Semiconductor Devices”, J. Apple. Phys, 2534-2535, p, 1964.

Sze, S.M., “Physics Semiconductor Devices, 2nd Edition.Wiley”, New York. p, 274, 276, 1981.

Tataroğlu, A., Altındal, Ş., “Characterization of Current–Voltage(I-V) and capacitance voltage-frequency(C-V-f) features of Al/SiO₂/p-Si(MIS) Schottky diodes”, 83(3): 582-588, 2006.

Tejedor, C., Flores F., and Louis E., “The metal.semiconductor interface: Si (111) and zincblende (110) junctions”, J. Phys. C, 10, 2163-2177, 1977.

Temirci, C., Batı, B., Sağlam, M. and Türüt, A., “High-barrier height Sn/p-Si Schottky diodes with interfacial layer by anodization proces”, Appl. Surf. Sc, 172: 1-7, 2001.

Torrey, H.C. ve Whitmer C.A., Crystal Rectifiers, McGraw Hill Inc., New York Quat V.T. ve Nicolet M.A., J. Phys. D: Appl. Phys., 43: 2755, 1948, 1972.

Torrey, H.C., Whitmer, C.A., “Crystal Rectifiers”, Mc Graw Hill, 36- 657, s. 1874.

Tung, R.T., “Recent advance in schottky barrier concept”, Mat. Sci. Eng. R, 35: 1-138, 2001.

Türüt, A. and Sağlam, M., “Determination of the density of Si-Metal interface states and excess capacitance caused by them”, Physica B, 179: 285-2, 1992.

Türüt, A., Tüzemen, S., Yıldırım, M., Abay, B. and Sağlam, M., “Barrier heigh tenhancement by annealing Cr-Ni-Coalloy Schottky contacts on LEC GaAs”, Solid-St. Electron, 35(10): 1423-1426, 1992.

Türüt, A., Yalçın, N., Sağlam, M., “Parameter Extraction From Non-ideal C-V Characteristics of a Schottky Diode With and Without İnterfacial Layer”, Solid-State Electron, 35(2): 835-840, 1996.

Türüt, A., Batı, B., Kökçe, A., Sağlam, M. and Yalçın, N., “The Bias-Dependence Charge of Barrier Height of Schottky Diodes under Forward Bias by including the series Resistance Effect”, Phys. Scripta, 53: 118-122, 1996.

Werner, J. H. and Guttler, H.H., “Barrier inhomogeneities at Schottky contacts”, J Apply Phys, 69: 1522–1533, 1991.

Werner, J. H. and Rau, U., “Springer Series in Electronics and Photonics”, Vol. 32, Edited by J. F. Luy and P. Russer (Springer), Berlin, 1994.

Wilson, A. N., "Stress and Stability in Coal Ribside and Pillars", 831145, West Wirigina Ünv. Wirigina, 1983.

Wu, X., Yang, H.L., "Interface Capacitance İn Metal Semiconductor Junetions", J. Apple. Phys.65(1): 3560-3565, 1989.

Yiğit, Ö., "Ni/n-GaP Schottky Diyodunun Kontak Parametrelerinin İncelenmesi", Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 10-15: 21-23, 2011.

Yıldırım, N., "Saçtırma Yöntemiyle Hazırlanan Ni/N-GaAs Schottky Engel Diyotların Karakteristik Parametrelerinin Tavlama Ve Numune Sıcaklığına Bağlı Değişimleri", Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 1-16, 2009.

Yıldırım, N., Doğan, H., Korkut, H, Türüt, A., "Dependence of Characteristic Diode Parameters in Ni/n-GaAs Contacts on Thermal Annealing and Sample Temperature", International Journal of Modern Physics B (23): 5237-5249, 2009.

Ziel, A. V., "Solid State Physical Electronics, Prentice Hall", Inc., New Jersey, p. 97: 245, 1968.

ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Bingöl'de doğdu. İlkokul, ortaokul ve lise öğrenimini Bingöl'de tamamladı. 2003 yılında Anadolu Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nde Lisans öğrenimine başladı. 2009 yılında Elazığ Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda Tezsiz Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2011 yılında ise Bingöl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı'nda Tezli Yüksek Lisans öğrenimine başladı. Halen bir çağrı merkezinde Kalite, Gelişim ve Eğitim Uzmanı olarak çalışmaktadır.

Mücahide GÖNDÜK

Temmuz 2014