

**SAÇTIRMA YÖNTEMİYLE HAZIRLANAN
Ni/n-GaAs SCHOTTKY DİYOTLARIN SICAKLIĞA
BAĞLI AKIM-VOLTAJ VE KAPASİTE-VOLTAJ
KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Abdulkadir GÜZEL

**Yüksek Lisans Tezi
Fizik Anabilim Dalı
Prof. Dr. Abdülmecit TÜRÜT
2012
Her Hakkı Saklıdır**

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SAÇTIRMA YÖNTEMİYLE HAZIRLANAN Ni/*n*-GaAs
SCHOTTKY DİYOTLARIN SICAKLIĞA BAĞLI AKIM-VOLTAJ
VE KAPASİTE-VOLTAJ KARAKTERİSTİKLERİNİN
İNCELENMESİ

Abdulkadir GÜZEL

FİZİK ANABİLİM DALI

ERZURUM
2012

Her Hakkı Saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**SAÇTIRMA YÖNTEMİYLE HAZIRLANAN Ni/n-GaAs
SCHOTTKY DİYOTLARIN SICAKLIĞA BAĞLI AKIM-VOLTAJ VE
KAPASİTE-VOLTAJ KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Prof. Dr. Abdülmecit TÜRÜT danışmanlığında, Abdulkadir GÜZEL tarafından hazırlanan bu çalışma 17.05.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından. Fizik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak ~~oybirliği/oyçokluğu~~ (.../...) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Abdülmecit TÜRÜT

İmza

Üye : Prof. Dr. İlhami GÜLÇİN

İmza

Üye : Doç. Dr. Şakir AYDOĞAN

İmza

Üye :

İmza

:

Üye :

İmza

:

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SAÇTIRMA YÖNTEMİYLE HAZIRLANAN Ni/*n*-GaAs SCHOTTKY DİYOTLARIN SICAKLIĞA BAĞLI AKIM-VOLTAJ VE KAPASİTE-VOLTAJ KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

Abdulkadir GÜZEL

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Abdülmecit TÜRÜT

Serbest taşıyıcı yoğunluğu yaklaşık olarak $7,3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ olan *n*-tipi GaAs kristali taban malzeme olarak kullanılıp, Ni/*n*-GaAs/In Schottky diyotları sputter (saçtırma) tekniği ile üretilmiştir. Üretilen bu diyotların geniş bir sıcaklık aralığında (100-320 K) 20 K'lik adımlarla akım-gerilim (*I-V*) ve kapasite-gerilim (*C-V*) ölçümleri sıcaklığa bağlı olarak incelenmiştir. Diyot parametreleri olan Schottky engel yüksekliği ve idealite faktörü değerleri numune sıcaklığına bağlı olarak doğru belsem *I-V* karakteristiklerinden hesaplanmış ve sonra engel yüksekliği ve idealite faktörünün sıcaklığa bağlı grafikleri çizilmiştir. Akım-gerilim ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliğinin numune sıcaklığı ile azalmasına karşın idealite faktörünün artması engelin yanal inhomojenliğine atfedilmiştir. (*C-V*) ölçümlerinden C^{-2} -*V* grafiği kullanılarak; difüzyon potansiyeli, iyonize olmuş donör konsantrasyonu, Fermi enerji seviyesi, engel yükseklikleri ve $\alpha = -0.88 \text{ meV/K}$ 'lik bir engel yüksekliğinin sıcaklık katsayısı hesaplanmıştır. Ayrıca, düşük sıcaklıklarda, termiyonik emisyon akımının, az da olsa, etkin olduğu gözlenmiş ve 10.1 meV'lik bir karakteristik enerji değeri elde edilmiştir.

2012, 47 sayfa

Anahtar Kelimeler: GaAs, Schottky engel yüksekliği, Metal-yarıiletken kontaklar, numune sıcaklığı, İdealite Faktörü.

ABSTRACT

Master Thesis

ANALYZES of TEMPERATURE DEPENDENT I-V and C-V PROPERTIES of
Ni/*n*-GaAs SCHOTTKY DIODE PREPARED VIA SPUTTERING

Abdulkadir GÜZEL

Atatürk University
Graduate School of Naturel and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Abdülmecit TÜRÜT

We have reported a study of the *I-V* characteristics and C-V of Ni/*n*-GaAs Schottky barrier diodes in a wide temperature range of 100-320 K by a step of 20 K, which are prepared by magnetron DC sputtering. The GaAs semiconductor substrate has a free carrier concentration of $7,3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. The ideality factor and barrier height values have changed by variation of the sample temperature, the case has been attributed to the presence of the lateral inhomogeneities of the barrier height. The ideality factor and barrier height values have changed by variation of the sample temperature. The ideality factor decreases and barrier height increases with increase in the temperature. The temperature dependence change has been attributed to the presence of the lateral inhomogeneities of the barrier height. The carrier concentration, diffusion potential, barrier height (BH), Fermi energy level and a BH temperature coefficient of $\alpha = -0.88 \text{ meV/K}$ have calculated from temperature dependent C-V-T characteristics. At low temperatures, it has been seen that the junction current is dominated by the TFE. The variation of the BH temperature coefficient from metal to have been correlated to the chemical nature of the contact metal or metal electronegativity

2012, 47 Pages

Keywords: GaAs, Schottky barrier height, metal-semiconductor contact, sample temperature, ideality factor

TEŞEKKÜR

Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'ne yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmanın deneyleri Fizik Bölümü Katıhal Fiziği Araştırma Laboratuvarında hazırlanmıştır. Çalışmalarım boyunca her türlü desteği sağlayan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Abdülmecit TÜRÜT'e çok teşekkür eder saygılar sunarım.

Ayrıca çalışmalarımda bilgilerinden istifade ettiğim Sayın Hocam Yrd. Doç. Dr. Betül GÜZELDİR'e ve bilgilerinden yararlandığım herkese teşekkür ederim.

Abdulkadir GÜZEL

Eylül 2012

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	6
2.1. Giriş.....	6
2.2. Metal/ n -tipi Yarıiletken Kontaklar	7
2.2.1. Metal/ n -tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar	7
2.2.2. Metal/ n -tipi yarıiletken omik kontaklar	9
2.3. Metal- n -tipi Yarıiletken–Metal Yapısı.....	11
2.4. Metal/Yarıiletken Schottky Diyotlarda Schottky Kapasitesi	12
2.5. Schottky Diyotlarda Akım İletimi ve Termiyonik Emisyon Teorisi.....	14
2.6. Potansiyel Değişim Modeli ve Homojen Olmayan Engel Yüksekliğinin Analizi	17
2.7. Kontak Üretim Yöntemleri.....	18
2.7.1. Saçtırma yöntemi.....	18
2.7.2. Buharlaştırma tekniği	19
2.7.3. Kimyasal kaplama ile kontak yapma.....	21
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	22
3.1. Numunenin Temizlenmesi ve Kontak İçin Hazır Hale Getirilmesi	22
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	24
4.1. Giriş.....	24
4.2. Schottky Diyotlarda Akım-Gerilim Ölçümleri.....	24
4.3. Schottky Diyotlarda Kapasite-Gerilim Ölçümleri.....	30
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	38
KAYNAKLAR	45
ÖZGEÇMİŞ	48

SİMGELER DİZİNİ

A	Diyodun etkin alanı
A^*	Richardson sabiti
C	Kapasite
$C-V$	Kapasite- gerilim
$^{\circ}C$	Santigrad derece
E_c	İletkenlik bandının taban enerji seviyesi
E_{fm}	Metalin fermi enerji seviyesi
E_{fs}	Yarıiletkenin fermi enerji seviyesi
E_v	Valans bandının enerji seviyesi
d	Schottky bölgesinin genişliği
e	Elektron yükü
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
Φ_b	Engel yüksekliği
$\overline{\Phi_b}$	Ortalama engel yüksekliği
Φ_{ap}	Sıfır gerilimindeki zahiri (apparent) engel yüksekliği
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
χ_s	Yarıiletkenin elektron ilgisi
$\Psi(x)$	Yüzey Potansiyeli
h	Planck sabiti
I	Akım
$I-V$	Akım-gerilim
I_0	Satürasyon akımı
J	Akım yoğunluğu
$J_{m \rightarrow s}$	Metalden yarıiletkene doğru akan akım yoğunluğu
$J_{s \rightarrow m}$	Yarıiletkenden metale doğru akan akım yoğunluğu
J_{sT}	Ters beslem doyma akım yoğunluğu

k	Boltzmann sabiti
K	Kelvin
n	İdealite faktörü
n_i	Asal elektron konsantrasyonu
n_{ap}	Sıfır gerilimindeki zahiri (apparent) idealite faktörü
N_a	İyonize olmuş akseptör yoğunluğu
N_d	İyonize olmuş donör konsantrasyonu
$P(x)$	Konuma bağlı uzay yükü yoğunluğu
σ	Arayüzey hallerinin tesir kesiti
σ_s	Standart sapma
Q	Birim alan başına düşen yük yoğunluğu
T	Sıcaklık
V	Voltaj
V_{dif}	Difüzyon potansiyeli

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kontakdan önce metal ve n-tipi yarıiletken için enerji bant diyagramları	8
Şekil 2.2. Kontakdan sonra termal denge durumunda oluşan enerji-bant diyagramı	9
Şekil 2.3. $\phi_m < \phi_s$ durumu için metal/n-tipi yarıiletken omik kontakta ait enerji bant diyagramı a) kontakdan önce, b) kontakdan sonra, c) düz beslem altında, d) ters beslem.....	10
Şekil 2.4. n^+nM yarıiletken yapının termal dengede enerji-bant diyagramı	11
Şekil 2.5. Metal p -tipi yarıiletken yapılarında doğrultucu kontakta; a) Potansiyel dağılımı, b) Yük dağılımı	12
Şekil 4.1 Ni/n-GaAs diyotuna ait numune sıcaklığına bağlı Akımın-Voltaj grafiği	27
Şekil 4.2. Ni/n-GaAs diyotuna ait sıcaklığa bağlı I - V grafiğinden elde edilen idealite faktörünün sıcaklıkla değişimi.....	28
Şekil 4.3. $\ln(I_0/T^2)$ 'nin $(nkT)-1$ veya $(kT)-1$ ' e karşı çizilen Richardson eğrileri.....	29
Şekil 4.4. Ni/n-GaAs Schottky diyotun 100-320 K sıcaklık aralığında kT 'ye karşı nkT grafikleri	30
Şekil 4.5. Ni/n-GaAs diyoduna ait sıcaklığa bağlı C 'nin V 'ye karşı değişimi.	34
Şekil 4.6. Ni/n-GaAs diyodunun ait sıcaklığa bağlı 0.8 V ile -1,0 V aralığında C^{-2} - V 'ye karşı değişimi, (0.8 V) ile (-1.0 V) aralığı ters beslem durumuna karşılık gelmektedir.....	35
Şekil 4.7. Ni/n-GaAs diyoduna ait sıcaklığa bağlı 0.8 V ile -1,0 V aralığında Kondüktans (G)'nin V 'ye karşı değişimi	36
Şekil 4.8. Ni/n-GaAs diyoduna ait sıcaklığa bağlı I - V ve C - V grafiğinden elde edilen engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi	37
Şekil 5.1. kT 'ye karşı nkT grafiği	41

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Ni/n-GaAs diyduna ait sıcaklığa bağlı I 'nin V 'ye karşı değişiminden elde edilen temel parametreleri	26
Çizelge 4.2. Ni/n-GaAs diyduna ait $1/C^2$ 'nin V 'ye karşı değişiminden elde edilen temel diyot parametreleri	33

1. GİRİŞ

Günümüzde yarıiletken teknolojisinin gelişmesinde metal/yarıiletken kontakların katkısı oldukça fazladır. Bu tip yapılar elektronik devre elemanları endüstrisinde yaygın bir kullanım alanına sahiptir. MEFSET 'ler (Metal yarıiletken alan etkili transistör), varaktörler (gerilim kontrollü kondansatör), güneş pilleri, Schottky diyotlar, mikrodalga devre elemanları ve anahtarlamanın önemli olduğu swich mode güç kaynaklarında kullanılırlar. Ticari öneminin yanı sıra direkt band yapısına ve yüksek elektron mobilitesine sahip olmasından dolayı GaAs bu alanlarda çokça tercih edilen III- V yarıiletkenlerdendir. Sahip olduğu bu özellikler sayesinde GaAs ile daha az güç harcayan ve daha hızlı devre elemanları üretilebilmektedir. N-tipi GaAs elektron mobilitesinin yüksek olması nedeniyle p-tipine göre daha fazla tercih edilmektedir (Tung 2001).

Metal/yarıiletken devre elemanları elektronik sahada önemli bir yere sahiptir. Metal/yarıiletken diyotlar ve farklı devre elemanları genellikle güç doğrultma, düşük seviyeli dedektörler, karıştırıcılar, hızlı anahtarlama devreleri, gerilime bağlı kapasitörler ve metal yarıiletken alan etkili transistörler (MESFET) gibi bir çok alanda kullanılmaktadırlar. Bu şekilde geniş alanlardaki kullanılmaları metal/yarıiletken yapılara olan ilgiyi artırmıştır (Türüt 1992).

Metal/yarıiletken yüzeyde oluşan potansiyel engelini ilk defa Schottky ortaya çıkardığı için metal/yarıiletken kontaklara Schottky kontaklar denilmektedir. Schottky-Mott modeline göre potansiyel engel, iki maddenin iş fonksiyonları arasındaki fark sebebiyle oluşmaktadır (Sharma 1984).

Yarıiletken malzemelerin ve bu malzemeler kullanılarak üretilen devre elemanlarının üretim yöntemleri, bu devre elemanlarının elektriksel özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Devre elemanlarının fabrikasyonu yapılırken, metal/yarıiletken Schottky yapının, oksit-metal ve oksit-yarıiletken arayüzeylerdeki tüm özellikleri bilinmeli ve

çıkabilecek aksaklıklar bu bilgiler ışığında giderilmelidir. Çok küçük boyutları sahip bu cihazların yapısı, çalışma şartları ve elektriksel özellikleri çok iyi belirlenerek daha kararlı, uzun ömürlü ve daha verimli devre elemanları üretilebilir.

Bu tür yapıların performansı, potansiyel engelinin homojenliği, yapının seri direnci, yarıiletken ile metal arasında oluşan oksit tabakasının homojenliği, yarıiletken ile yalıtkan arasındaki arayüzey durumları gibi parametrelere bağlıdır. Bu parametreler yarıiletken aygıtın ideal durumdan sapmasına sebep olabildikleri için hesaplamalarda dikkate alınması gereken önemli özelliklerdendir.

Metal/yarıiletken kontaklar, eklem tipinde bir metal ile yarıiletken kristallerinin birleştirilmesi ile oluşur. Yarıiletken devre elemanlarının kararlılık, güvenilirlik ve performansı onların yüzey durumuna ve bu elemanları hazırlama şartlarına bağlıdır (Ziel 1968; Türüt *et al.* 1992). Kontak üretimi esnasında metal ve yarıiletken arasında herhangi bir oksit tabakası oluşmaması için çok dikkatli çalışılmalıdır. Metal ve yarıiletken arasında bu gibi istenmeyen oksit tabakaları, potansiyel engel yüksekliğinin beklenen değerden farklı bir değerde çıkmasına sebep olabilir. Isıl tavlama işlemi, arayüzeyde ki oksit tabakasını ve yarıiletken yüzeydeki kusurları azaltacağı bilindiği için, bu tip kusurları azaltmak ve engel yüksekliğinin beklenen değerde çıkmasını sağlamak için, yarıiletken kontağı oluşturduktan sonra yapının ısı olarak tavlama işlemi tercih edilmektedir. Isıl tavlama ile Schottky metali, oksit tabakasıyla ya da yarıiletkenle reaksiyona girerek arayüzeyde intermetalik bir tabaka oluşturur ve kararlılık sağlar. Elektronik Sanayide GaAs ile Schottky kontak haline getirilecek olan ısıya dayanıklı metallerin, ısı tavlama ile oksit tabakasını ve yarıiletken yüzeydeki kusurları en aza indirerek Schottky diyot karakteristiğini koruyacağı, kaliteli devre elemanı üretimi açısından önemli bir yere sahiptir.

Kontak üretimi esnasında yarıiletken yüzeyine uygulanan işlemlerden dolayı Schottky engel yüksekliğinin değiştiği yapılan deneyler sonucu görülmüştür. Yarıiletken yüzeye, kontak oluşumu için buharlaştırılan metallerle yarıiletken yüzeyin şartlarının değişimi Schottky engel yüksekliğini değiştirebilir. Bu nedenle Schottky engel yüksekliğinin ısı

tavlama işlemine göre nasıl davrandığı teknolojik ve bilimsel olarak ilgi çekmektedir (Huang and Yang 1991).

Schotky kontaklarda, metal ve yarıiletken arası ideal şartlarda olmadığı için karakteristiklerde idealite çarpanı ortaya çıkar. Bu tip kontaklarda, kontak bölgesinin kapasitesini incelenmesi sonucu, akım-gerilim ve sığa-gerilim ölçümleri yardımıyla taşıyıcı yoğunluğu, difüzyon potansiyeli ve potansiyel engel yüksekliği belirlenebilir.

Metal/yarıiletken kontaklarda oluşan engel yüksekliği ile ilgili çalışmalar 1870'li yıllarda başlamıştır. 1874 yılında Braun bakır ve demir sülfat gibi metallerle yarıiletken arasındaki elektriksel iletkenliğin anti-simetrik olduğunu bulmuştur (Braun 1874). Braun yaptığı metal/yarıiletken diyotları dedektör gibi çok farklı aletlerde kullanmıştır. 1906 yılında Pickard silisyumu kullanarak nokta kontak dedektörler için bir patent geliştirmiştir (Pickard 1906). Pierce metali yarıiletken yüzeyine püskürterek diyodların doğrultma özelliklerinin olduğunu yayınlamıştır (Rhoderick and Williams 1988).

Metal/yarıiletken kontakların doğrultma işlemini yapması ile ilgili olarak 1931 yılında Schottky kontakta akım aktığında tüm kontak boyunca bir potansiyel düşüşü olacağını göstermiştir (Rhoderick and Williams 1988). 1938 yılında Schottky ve Mott doğrultmanın gözlenen yönünün elektronların potansiyel engeli üzerinden normal sürüklenme ve difüzyon şeklinde geçtiklerini söylemişlerdir. Mott (1938) önerdiği modelde; metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarının farklı olmalarından dolayı bir potansiyel engeli oluşmaktadır ve elektronlar bu potansiyel engeli üzerinden sürüklenme ve difüzyon yoluyla geçmektedirler. Elektrik alanın sabit olduğunu ve elektrostatik potansiyelin metal ile olan mesafeyle lineer olarak değiştiğini belirtmiştir. Bunun aksi olarak Schottky; Poisson denklemine göre elektrik alanın doğrusal olarak artması, elektrostatik potansiyelin ikinci dereceden (karesel) değişmesi için yüklü kirliliklerin konsantrasyonunun sabit olduğu engel bölgesi fikrini kabul etmiştir. Rusya'da (1939, 1941) İkinci dünya savaşı sırasında silisyum ve germanyum ile nokta kontak doğrultucular mikrodalga radarlarda kullanılmış, bu önemli gelişme yarıiletken fiziğinin gelişimine önemli derecede yardımcı olmuştur. Bethe'nin termiyonik emisyon

teorisi (1942) ile yarıiletken fiziğine önemli katkılar sağlanmıştır. Daha sonraki dönemlerde metal/yarıiletken kontaklar mikro elektronikte de geniş kullanım alanı bulmuştur (Rhoderick and Williams 1988).

1947 yılında Bardeen, metal/yarıiletken arayüzeyinde yeterli sayıda yüzey hallerinin varolması durumunda, potansiyel engel yüksekliğinin metalin iş fonksiyonundan bağımsız olacağını söylemiştir (Wilmsen 1995).

Arayüzey tabakasının kimyasal oluşumu üzerine çokça model ileri sürülmüştür. Bunlardan birisi; Freeouf (1981), tarafından önerilen Etkin İş Fonksiyonu Modeli'dir. Bu modele göre potansiyel engel yüksekliği, arayüzey hallerinin yanı sıra metal/yarıiletken arayüzeyinde oluşan fazlara ait iş fonksiyonları ile ilişkilidir. Bu fazlar, metalizasyon işleminde, metal ile yarıiletken arasındaki reaksiyonlar aynı oksijen kontaminasyonu sonucu oluşurlar.

1945-1950 yılları arasında mikrodalga radarlar gelişince nokta kontaklar tekrar gündeme gelmiş ve bunlar frekans dönüştürücü ve düşük seviye mikrodalga dedektör olarak kullanılmıştır (Torrey *et al.* 1948).

Enerji engelinden taşıyıcı difüzyon olayını esas alan doğrultma teorisi, Schottky ve Spenke tarafından geliştirildi. Bir yıl sonra Willson metal/yarıiletken diyotlar için, kuantum mekaniksel tünelleme teorisini geliştirdi ve doğrultma için ters polariteyi açıkladı(Sze 1981).

Türüt ve Sağlam (1992), metal/yarıiletken kontaklarda arayüzey hal yoğunluğunu ve bunu sebep olduğu artık kapasitansı deneysel olarak inceleyerek kapasitansın arayüzey hallerinden ileri geldiğini ve artan frekansla azaldığını, yani arayüzey hal yoğunluğunun frekansın artmasıyla azalacağını belirtmişlerdir.

Metal/yarıiletken kontaklarda engel yüksekliği ve idealite faktörü ile ilgili çokça çalışma yapılmıştır. Düşük engel yüksekliğine sahip Schottky diyotları, kritik

sıcaklıklarda aygıtların yapılmasında sensör ve infrared dedektörler olarak kullanılmıştır. Oda sıcaklığında Schottky diyotların I-V değerlerinin analizi, iletim süreçlerinin yanı sıra, metal/yarıiletken arayüzeyde engel oluşumu hakkında bize bilgi verir. Buna rağmen metal/yarıiletken kontakta taşıyıcı yoğunlukları hakkında tam bir açıklama yapılmamıştır. Termiyonik emisyon teorisine bağlı olarak Schottky diyotlarının I-V karakteristiklerinin analizi, sıcaklığın azalmasıyla idealite faktöründeki artış ve engel yüksekliğinde büyük bir azalmayla açıklanabilir. Gauss dağılımı ve termiyonik emisyon mekanizmasıyla düşük sıcaklıklardaki idealite faktöründeki artış ve engel yüksekliğindeki azalma başarılı bir şekilde açıklanmıştır.

Tung (1991), dairesel alanlı Schottky kontaklar için bir I-V ilişkisi ve alan parametresine bağlı bir gauss dağılımı yaparak toplam alan üzerinden integrasyon yoluyla termiyonik emisyon akımı ifadesini vermiştir.

Schottky diyotlarda, sıcaklıkla engel yüksekliğinin ve idealite faktörünün değişiminin nedenlerinden biri, arayüzeye yaklaşan pozitif ya da negatif iyon kusurlarının, Schottky engelini aşağı ya da yukarı çekmesidir (Maeda 2002).

Bu çalışmada Ni/n-GaAs diyodunun belirli bir sıcaklık aralığında I-V ve C-V ölçümleri alınarak elde edilen diyot parametreleri incelendi. Doğru beslem akım-voltaj ve ters beslem kapasite-voltaj değerlerinden idealite faktörleri ve engel yükseklikleri hesaplandı. Elde edilen idealite faktörlerinin sıcaklık artışı ile azaldığı ve engel yüksekliklerinin artan sıcaklıkla arttığı gözlemlendi. Bu değişimlerin metal/yarıiletken arayüzeydeki atomik engel yüksekliğinin yanal inhomojenliğine atfedildi.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Giriş

Doğrultma işlemi, diyot yardımı ile alternatif akımı doğru akıma çevirme işlemidir. Elektronik cihazların geneli doğru akımla çalıştığı için doğrultma işlemi önem arz etmektedir. Metal/yarıiletken kontaklarda doğrultma işlemi yarıiletkenin eklem tarafındaki deplasyon tabakası tarafından sağlanır (Schottky 1938). Bir metal/yarıiletken kontak anı bir ara yüzey oluşana kadar metal ve yarıiletkenin Fermi enerji seviyeleri arasındaki farkın ortadan kalkması ile elde edilebilir (Mönch 1995).

Schottky diyodların karakteristik parametrelerinin anlaşılabilmesi, yalıtkan ve yarıiletken kristallerin iletkenlik özelliklerinin araştırılmasının bir yolu da kristale uygun kontakların uygulanmasıdır. Kontak; en az iki maddenin minimum dirençle temas etmesi olarak düşünülebilir. Kontakın ideal olması, kontak maddelerinin yüzeylerinin temiz ve pürüzsüz olmalarıyla doğrudan ilişkilidir (Cowley and Sze 1965). Kontak haline getirilen maddeler arasında Elektrokimyasal potansiyelleri (fermi seviyeleri) aynı düzeye gelinceye kadar bir yük alış veriş olur (Ziel 1968).

İki madde kontak haline getirildiğinde her iki maddenin Fermi seviyeleri aynı oluncaya kadar yük alış veriş olur. Termal denge sonunda Fermi düzeyleri aynı seviyeleri eşitlenir. Oluşan yeni yük dağılımı nedeniyle kontak bölgesinde bir dipol tabakası meydana gelir. İki metal arasında bu dipol tabakası kontakın her iki tarafındaki yüzey yüklerinden oluşur. Oluşan bu kontak elektronlarının her iki yönde serbestçe hareket etmeleri nedeniyle omik kontak olarak adlandırılır (Rhoderick and Williams 1988).

2.2. Metal/*n*-tipi Yarıiletken Kontaklar

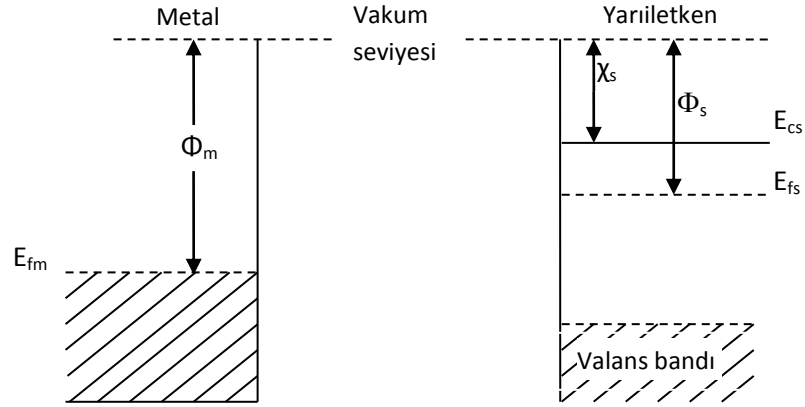
2.2.1. Metal/*n*-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar

Metal *n*-tipi yarıiletken kontaklar, metalle bir *n*-tipi yarıiletkenin belirli şartlar altında bir araya getirilmeleri suretiyle oluşturuldukları yapılardır. Akım taşıyıcıları (boşluk ve elektron) bir doğrultuda kolayca hareket ederken, potansiyel engelinden dolayı diğer yönde hareketleri zorlaşır. Bu tür kontaklar doğrultucu kontaklardır.

Bu olayı açıklamak için bir metal ve bir *n*-tipi yarıiletken dikkate alalım. 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 2.1’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 mübadelesi tamamlandıktan sonra her iki tarafın Fermi seviyeleri eşitlenir. Yani yarıiletkenin enerji seviyeleri Şekil 2.2’de görüldüğü gibi $(\Phi_m - \Phi_s)$ kadar alçalmıştır. Sonuç olarak, kontakta oluşan dipol tabakası nedeniyle eklem üzerinde bir potansiyel engeli meydana gelir. Bu engelin yarıiletken tarafındaki yüksekliği $(\Phi_m - \Phi_s)$ ve metal tarafındaki yüksekliği ise $\Phi_m - \chi_s$ kadardır.

Bu engel yüksekliği difüzyon potansiyeli cinsinden $eV_{dif} = \Phi_m - \Phi_s$ şeklinde ifade edilebilir. Yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar metale geçerken bu engelle karşılaşır. Kontakta yarıiletken tarafındaki pozitif yüklere, sayısı metal tarafındaki iyonize olmuş yük yoğunluğundan çok daha az olan iyonize olmuş donörlerin neden olduğu ve bunların yarıiletken içinde hareketsiz olmalarından dolayı bunlara yüzey yükü olarak değil, bir uzay yükü olarak bakmak gerekir. Kontakta potansiyel engelden dolayı, yüzey tabakası engel tabakası olarak bilinir. Bu tabakanın kalınlığı iyonize olmuş donörlerin konsantrasyonuna ve difüzyon potansiyelinin değerine bağlıdır. Metal ve yarıiletken içindeki bazı elektronların termal yolla kazandıkları enerji, elektronun potansiyel engelini aşmasına yetebilecek büyüklükte olduğu zaman, kontakta eşit ve

zıt yönde bir I_0 sızıntı akımı geçer. Şayet yarıiletken bir $-V$ gerilimi uygulanırsa metalden yarıiletkeni geçecek elektronlar için engel yüksekliği değişmez ve bu nedenle bu elektronların oluşturacakları akım da değişmez. Fakat yarıiletken tarafında, iletkenlik bandı eV kadar yükseleceği için yarıiletkeni metale geçecek elektronlar için engel yüksekliği eV kadar azalacaktır.

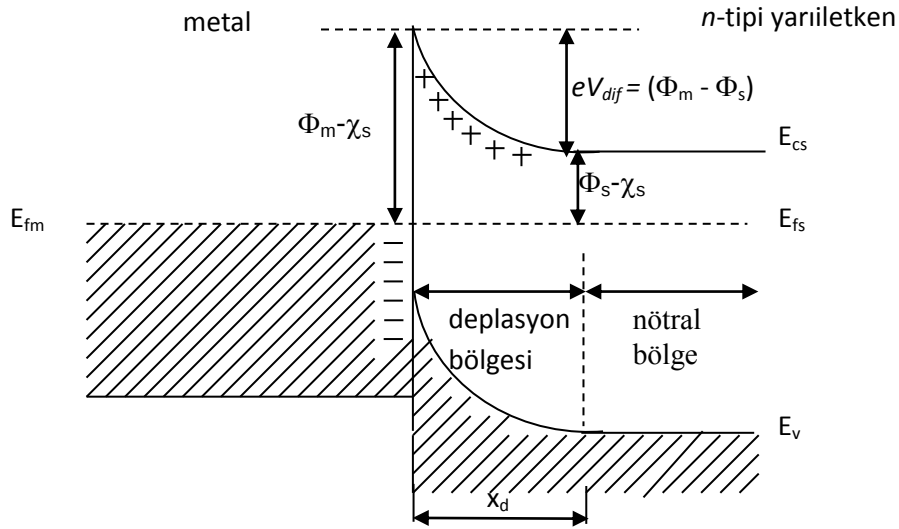


Şekil 2.1. Kontakdan önce metal ve n-tipi yarıiletkeni ait enerji bant diyagramları

Bu durumda oluşan net akım,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

ile verilir. I net akımı pozitifdir. Bu beslem durumuna ($V \gg kT/e$) düz beslem durumu denir. Yarıiletken tarafına $+V$ gerilimi uygulandığında 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.



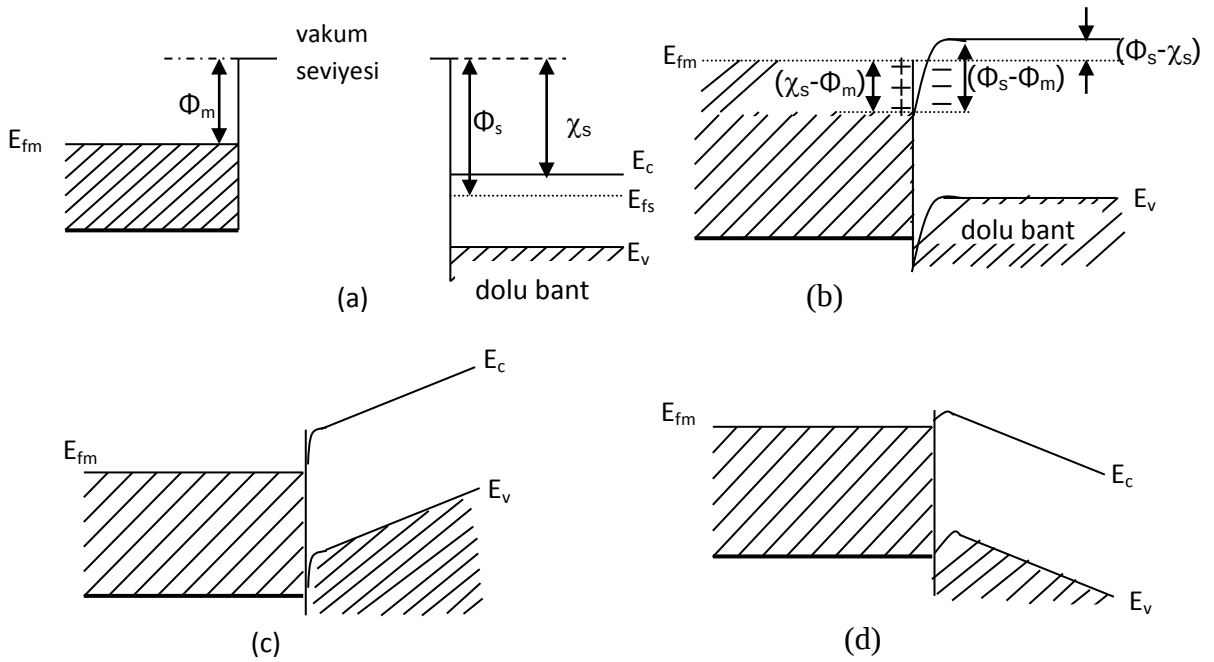
Şekil 2.2. Kontakta sonra termal denge durumunda oluşan enerji-bant diyagramı

Sonuç olarak, yarıiletkenin potansiyel engelinin yüksekliği uygulanan voltaja bağlı olarak değişir. Metal tarafındaki engel yüksekliği uygulanan voltajdan bağımsızdır. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağında $V > 0$ ise kontak ters beslemdedir. Eğer $V < 0$ ise kontak doğru beslemdedir.

2.2.2. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontaklar

n-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s), metalin iş fonksiyonu (Φ_m)'den büyükse omik kontak oluşur. Omik kontak, uygulanan gerilimin polaritesinden bağımsız olarak her iki yönde de akım akışına minimum direnç gösteren metal/yarıiletken eklemdir (Brillson 1993; Neamen 1992). Akım-gerilim ilişkisi **Ohm Kanunu** ile verilen kontaklar omik bir davranış sergilerler. Bir metalle bir n-tipi yarıiletken kontak halinde olsunlar. Kontakta önceki durumda yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden ($\Phi_s - \Phi_m$) kadar aşağıdadır. Metal ve yarıiletkenin kontakta önceki enerji-bant diyagramları Şekil 2.3.a'da görülmektedir. Kontakta sonra termal denge durumunda, elektronlar metalden yarıiletkene doğru geride pozitif boşluklar bırakarak geçerler ve bu durumda yarıiletken yüzeyin n-tipliliği artar. Yarıiletken yüzeydeki bu fazla elektronlar bir negatif yüzey yükü tabakası meydana getirirler. Yine metalden ayrılan elektronlar geride bir yüzey

yükü tabakası (pozitif yük dağılımı) meydana getirirler ve böylece kontak bölgesinde bir dipol tabakası oluşur. Bu durum Şekil 2.3.b’de görülmektedir. Şayet metal tarafına pozitif bir $+V$ gerilimi uygulanırsa bu durumda yarıiletkenin metale doğru akan elektronları için bir engel yoktur ve elektronlar bu yönde kolayca hareket edebilirler (Şekil 2.3.c).



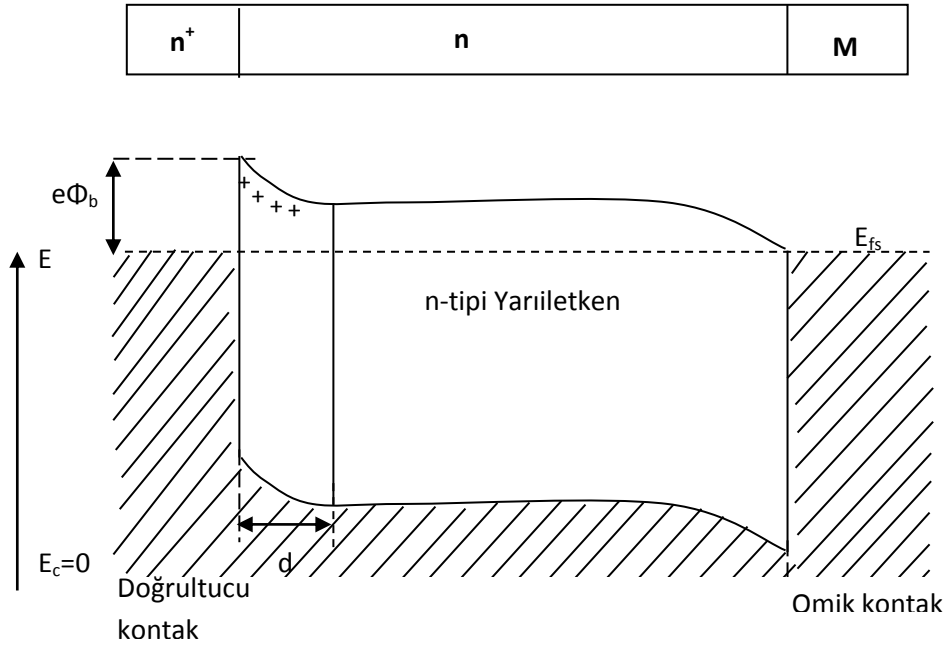
Şekil 2.3. $\phi_m < \phi_s$ durumu için metal/n-tipi yarıiletken omik kontak için enerji bant diyagramı a) kontak öncesi, b) kontak sonrası, c) doğru beslem altında, d) ters beslem altında.

Yarıiletken tarafına $+V$ gerilimi uygulanırsa, elektronların karşılaştıkları engel yüksekliği tekrar çok küçük olacaktır ve elektronlar kolay bir şekilde metalden yarıiletkenin doğru akacaklardır (Şekil 2.3.d).

Sonuç olarak böyle bir kontakta, elektronlar her iki yönde de kolayca hareket edebilirler. Omik kontakta bir $+V$ gerilimi uygulandığında, potansiyel bütün yarıiletken gövde boyunca dağılacaktır. Metale negatif bir ($-V$) gerilim uygulandığında, metalden yarıiletkenin iletkenlik bandına elektron geçişi olmasından dolayı bu kontaklara **enjeksiyon kontaktları** da denir (Ziel 1968).

2.3. Metal-*n*-tipi Yarıiletken–Metal Yapısı

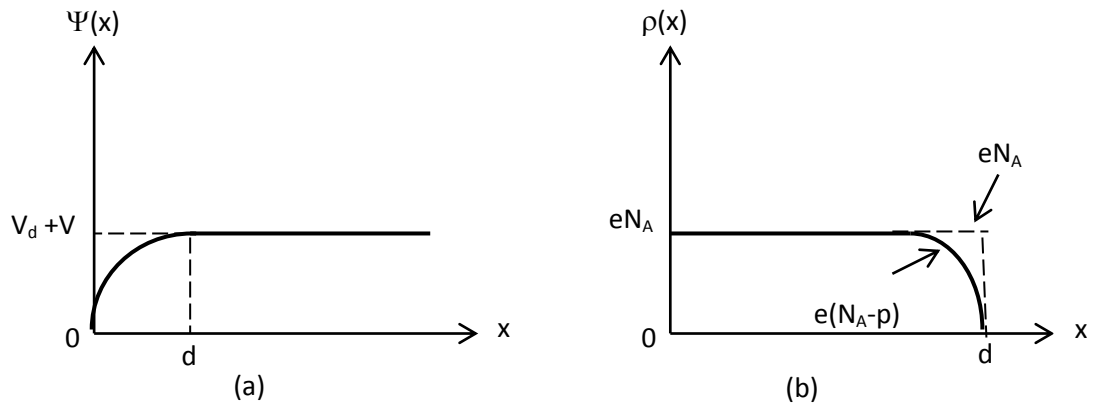
Metal- *n*-tipi yarıiletken-metal ($N^+ nM$) yapısı, *n*-tipi yarıiletkenin bir yüzeyine elektron bakımından çok zengin n^+ omik kontağı ile diğer yüzeyine uygulanan nM doğrultucu kontağından meydana gelir. Termal dengede böyle bir yapının enerji bant diyagramı Şekil 2.4’ de görülmektedir. n^+ omik kontak 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 2.4’ de görüldüğü gibi elektronlar için engel yüksekliği $e\Phi_b = eV_d + E_F$ ’ye eşittir.



Şekil 2.4. $n^+ nM$ yarıiletken yapının termal dengede enerji-bant diyagramı

2.4. Metal/Yarıiletken Schottky Diyotlarda Schottky Kapasitesi

Metal/Yarıiletken kontaklarda oluşan arınma bölgesi (dipol tabakası), yarıiletken tarafındaki uzay yükleri ve metal tarafındaki yüzey yüklerinden dolayı bir kondansatör gibi davranır. Ters beslem durumunda uygulanan gerilim arttıkça zaman arınma bölgesi genişleyecektir.



Şekil 2.5. Metal p -tipi yarıiletken yapılar da doğrultucu kontakın; a) Potansiyel dağılımı, b) Yük dağılımı

Schottky bölgesinin kapasitesi, uygulanan gerilimle değişen yük dağılımından dolayı değişecektir. Bu özelliklerinden dolayı Schottky diyotları, gerilim kontrollü değişken kapasitörler olarak kullanılabilirler. Schottky bölgesinin kapasitesini bulmak için, diyodun engel bölgesindeki potansiyel dağılımının Poisson eşitliği;

$$\nabla^2 \Psi(x) = \frac{d^2 \Psi(x)}{dx^2} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilebilir (Ziel 1968).

Burada ϵ_s yarıiletkenin, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti, $\rho(x)$ konuma bağlı uzay yükü yoğunluğudur. Uzay yükü yoğunluğu;

$$\rho(x) = e(N_A - N_d) \quad (2.3)$$

olarak yazılabilir (Rhoderick and Williams 1988). Burada N_d , yarıiletkendeki iyonize olmuş donör yoğunluğu, N_A , yarıiletkendeki iyonize olmuş akseptör yoğunluğudur. $\Psi(x)$ potansiyel fonksiyonu ile uzay yük yoğunluğu $\rho(x)$ 'in konuma bağlı değişimleri Şekil 2.5'de gösterilmiştir.

Engel tabakasının potansiyelini V_d ve kontağa uygulanan potansiyeli V ile temsil edelim. $e(V_d - V) \gg kT$ olduğunda $0 \leq x \leq d$ aralığında yük taşıyıcılar d uzunluğunda Debye difüzyon uzunluğu ile verilen bir bölgede kısmen bulunacaklardır. Dolayısı ile p-tipi yarıiletken için $N_A \gg N_d$ olduğundan uzay yükü yoğunluğu için

$$\rho(x) = eN_A \quad (2.4)$$

yazılabilir. (2.2) ve (2.3) eşitliklerinden

$$\frac{d^2 \Psi(x)}{dx^2} = -\frac{eN_A}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (2.5)$$

elde edilir. (2.5) ifadesinin integrali alınacak olursa,

$$d = \left[\frac{2\epsilon_s \epsilon_0}{eN_A} (V_d \pm V) \right]^{1/2} \quad (2.6)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade, Schottky bölgesinin genişliğidir. Burada $V > 0$ için kontak doğru, $V < 0$ için kontak ters beslemdedir. Yarıiletkende birim alan başına düşen yük yoğunluğu;

$$Q = -eN_A d \quad (2.7)$$

ile verilir. (2.6) ve (2.7) eşitlikleri dikkate alındığında;

$$Q = -[2\epsilon_S \epsilon_0 e N_A (V_d \pm V)]^{1/2} \quad (2.8)$$

ifadesi elde edilir. Ayrıca Schottky kapasitesi (2.8) eşitliğine sahip Q yükünün uygulanan gerilime göre değişimi olarak tanımlanır. Buna göre kapasite için,

$$C = \left| \frac{\partial Q}{\partial V} \right| \quad (2.9)$$

yazılarak (2.8) ve (2.9) eşitliklerinden,

$$C = \left[\frac{\epsilon_S \epsilon_0 e N_A}{2(V_d + V)} \right]^{1/2} \quad (2.10)$$

veya

$$C = \frac{\epsilon_S \epsilon_0}{d} \quad (2.11)$$

eşitlikleri bulunur. Bu sonuca göre arınma bölgesinin kapasitesi, uygulanan gerilim ve Schottky bölgesinin genişliği ile ters ve akseptör yoğunluğu ile doğru orantılıdır.

2.5. Schottky Diyodlarda Akım İletimi ve Termiyonik Emisyon Teorisi

Schottky kontaklarda bir potansiyel engeli üzerinden elektron taşınması işlemi termiyonik emisyon teorisi ile açıklanmaktadır. Sıcak bir yüzeyden termal enerjileri

nedeniyle taşıyıcıların salınması olayı **termiyonik emisyon** olarak bilinir. Metal/yarıiletken Schottky diyotlarda termiyonik emisyon teorisi, taşıyıcıların termal enerjileri nedeniyle potansiyel engelini aşarak yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene geçmesi olarak tanımlanır. Schottky diyotlarda akım çoğunluk taşıyıcıları tarafından sağlanır (Ziel 1968; Rhoderick and Williams 1988).

Metal/n-tipi yarıiletken Schottky diyotlarda elektronlar, metal/p-tipi yarıiletken Schottky diyotlarda ise boşluklar akımı sağlar. Termiyonik emisyon teorisi oluşturulurken, Maxwell-Boltzmann yaklaşımının uygulanabilmesi ve termal denge durumunun olaydan etkilenmemesi için, doğrultucu kontağa ait potansiyel engelini, kT enerjisinden daha büyük olduğu ve arınma bölgesindeki taşıyıcı çarpışmalarının çok küçük olduğu kabul edilmektedir.

$J_{s \rightarrow m}$ /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,

$$J_{s \rightarrow m} = e \int_{E_c}^{\infty} v_x dn \quad (2.12)$$

şeklinde yazılabilir. Yarıiletkenden metale doğru akan akım yoğunluğu

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[\frac{-e(\phi_n + V_{bi})}{kT} \right] \exp \left(\frac{eV}{kT} \right) \quad (2.13)$$

ya da

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[\frac{-e\phi_b}{kT} \right] \exp \left(\frac{eV}{kT} \right) \quad (2.14)$$

olur. Uygulama gerilimi sıfır olduğunda $J_{s \rightarrow m}$ ile $J_{m \rightarrow s}$ tamamen eşittirler. Yani,

$$J_{m \rightarrow s} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[\frac{-e\phi_b}{kT} \right] \quad (2.15)$$

olur. Eklemdaki net akım yoğunluğu $J = J_{s \rightarrow m} - J_{m \rightarrow s}$ olur. Daha açık ifadeyle net akım yoğunluğu,

$$J = \left[A^* T^2 \exp \left(\frac{-e\phi_b}{kT} \right) \right] \left[\exp \left(\frac{eV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.16)$$

olur. Burada A^* termiyonik emisyon için Richardson sabiti olup,

$$A^* = \frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \quad (2.17)$$

ile verilir. Genel bir durum için (2.16) ifadesi,

$$J = J_{sT} \left[\exp \left(\frac{eV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.18)$$

olarak yazılabilir. Burada J_{sT} ters beslem-doyma akım yoğunluğu olarak bilinir ve

$$J_{sT} = A^* T^2 \exp \left(\frac{-e\phi_b}{kT} \right) \quad (2.19)$$

şeklinde ifade edilir. ϕ_b Schottky engel yüksekliğinin imaj kuvveti nedeniyle azaldığı ve $\phi_b = \phi_{b0} - \Delta\phi$ şekline verildiği dikkate alınarak (2.19) ifadesi yeniden,

$$J_{sT} = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{e\Delta\phi}{kT}\right) \quad (2.20)$$

şeklinde yazılır. Engel yüksekliğindeki $\Delta\phi$ değişimi, artan elektrik alanla ya da artan ters beslem gerilimi ile artacaktır.

2.6. Potansiyel Değişim Modeli ve Homojen Olmayan Engel Yüksekliğinin Analizi

Schottky kontaklarda engel yüksekliği, akım-voltaj ve kapasite-voltaj ölçümleri için farklı sonuçlar verir. Schottky kontaklarda I - V ve C - V ölçümlerinden elde edilen sıcaklığa bağlı engel yüksekliğinin değişimi ve idealite faktörünün 1'den büyük olması farklı şekillerde açıklanmaktadır. Metal/yarıiletken arayüzeyinin düzgün olmaması (pürüzlü olması), V_d (built-in voltajı) ve engel yüksekliğinin farklı uzaysal değişimlerine neden olarak inhomojen bir dağılıma neden olacaktır. Metaldeki atomik yapı, dislokasyonlar ve tane sınırlarının yanı sıra metalin kalınlığının değişimi arayüzeyin pürüzlü olmasına neden olabilir. Bu potansiyel değişimlerin bir başka nedeni de; alan emisyonundan dolayı lokal engel yüksekliğinin azalması olabilir. Ayrıca arayüzeyde farklı metalik fazların etkisi ile de bu lokal değişimler ortaya çıkabilir.

Bunun yanı sıra, yarıiletkendeki donör atomlarının rasgele dağıldığı düzenli bir örgüde, donör atomları arasındaki düzensiz mesafeler de bahsedilen potansiyel değişimlerin bir başka nedeni olabilir. Küçük boyutlu devre elemanlarındaki bu tür katkı atomlarının etkisi Arnold (1987) ve Nixon (1990) tarafından incelenmiştir. Potansiyel değişim modeli homojen olmayan Schottky kontaklar için daha önce yapılan çalışmalardan farklıdır (Werner and Guttler 1991). Bu konuda daha önce yapılan çalışmalarda farklı engel yüksekliğine sahip olan homojen ve homojen olmayan Schottky diyotlar üzerinde farklı çalışmalar yapılmıştır. Örneğin, Karataş (2003) tarafından bildirildiğine göre, Ohdomari ve Tu PtSi/Si ve NiSi/Si gibi farklı diyotların özelliklerini inceleyerek, düşük engelli NiSi/Si ve yüksek engelli PtSi/Si Schottky kontaklara karşılık gelen toplam d.c. akımın, düşük engelli ve yüksek engelli akımlarının toplanması ile modifiye edilebileceğini açıklamışlardır. Benzer modeller, foto-tepki ve kapasite ölçümlerine de

uygulanmıştır. Böylece, akım, kapasite ve fotoemisyonu açıklayan etkin Schottky engeller, düşük engel ve yüksek engelli kontak alanlarının oranına bağlı olduğu açıklanmıştır. *I-V* eğrileri için benzer çalışma

Tuy (1990) tarafından yapılmıştır. Ohdomari ve Tuy'un modeli, *I-V* ölçümlerinden daha yüksek olan *C-V* ölçümlerindeki engel yüksekliğinin azaldığını açıklar (Ohdomari vd 1980). DC akımı düşük engelli diyotların alanına kuvvetlice bağlıdır. Buna rağmen, bütün bu modellerin düşük ve yüksek engel bölgelerindeki durumu farklıdır. Yani Schottky engellerin düzensiz olarak değiştiği kabul edilerek birbirinden ayrılmış yüksek ve düşük engellerin yüzey yükü bölgelerinin genişlikleri de farklıdır. Ayrıca Ohdomari vd (1980) bir engel dağılımının yerine iki farklı engelin varlığını kabul etmişlerdir. Böylece *I-V* ve *C-V* ölçümleri için hem Schottky engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlılığı hem de idealite faktörünün 1'den büyük olmasını açıklamak için bu modeller uygun olmayabilir. Ayrıca, Freeouf *et al.* (1982) yaptıkları simülasyon programı ile *I-V* ve *C-V* ölçümlerinden elde edilen engel yükseklikleri değerlerinin birbirine eşit olmadığını doğrulamışlardır. Schottky diyotlardaki ideal durumdan sapmaları açıklayan modellerden birinin; “engelin inhomojenliği modeli” olduğunu yukarıda belirttik.

2.7. Kontak Üretim Yöntemleri

2.7.1. Saçtırma yöntemi

Bu yöntemde yüksek vakum kullanılmaktadır. Ancak bu teknikte sıvı haldeki metalden metal atomları buharlaştırılmamaktadır. Bunun yerine yüksek elektrik gerilimi uygulanarak katı metalden kopartılmaktadır.

Peter Sigmund'un teorisini geliştirdiği teknik, magnetik alanda yüksek voltaj uygulanarak hızlandırılmış gaz iyonları tarafından hedef metalin yüzeyinin bombardıman edilmesi suretiyle yüzeyden kopan atomların taban malzemeyi kaplaması olarak basitçe tarif edilebilir. Bu yöntem kısaca, ağır pozitif iyonların bombardımanı sonucunda genellikle katot olarak alınan bir elektrottaki atomların bir kısmının yayılıp

bir wafer üzerinde ince bir tabaka oluşturma esasına dayanır. Bunun sonucunda iyi derecede mekanik adhezyona sahip metal filmler kolaylıkla oluşturulabilmektedir Yıldırım(2009).

Çok yüksek vakumda, kaplama malzemesi olarak kullanılacak metal katot olarak kullanılır, anot olarak ise tungsten ya da başka bir iletken malzeme kullanılır. Bunların arasında uygulanan yüksek bir gerilim ile işleyecek aşağıda verilmiş olan mekanizma yardımıyla metal atomları katottan koparılmaktadır. Ortamda mevcut olan göreceli olarak az sayıdaki gaz molekülleri yüksek ölçüde iyonlaşırlar. Bahsettiğimiz bu gazlar, ortamda hava mevcut olmasından dolayı bulunan oksijen ya da azot gazları değildir, burada bahsedilen gazlar “asal (soy) gazlar” olarak da adlandırılan argon ve neon gibi gazlardır. Bu özel gazların kullanılmasındaki maksat oksijen moleküllerinin metal atomlarını oksitleyecek olmasıdır (genellikle kullanılan vakum basıncı metal buharlaştırma yöntemindeki kadar çok daha yüksektir), ancak asal gazların böyle bir etkisi yoktur. Pozitif yüklü argon iyonları büyük bir hızla katoda doğru hareket etmekte, onu bombardıman ederek üzerinden metal atomları koparmaktadırlar. Yüzeyden koparılan metal atomlarının net bir elektriksel yükü yoktur (iyonlanmış değildir) ve gaz atomları gibi karışık düz hatlarda hareket eder ve çarptıkları herhangi bir yüzeye çökelerek kaplanırlar.

Eğer kaplamak istediğiniz yüzey vakumlu kabın içinde uygun biçimde yerleştirilmişse, ince bir metal tabakası ile kaplanmış hale gelecektir. Metal buharlaştırmanın bir diğer özelliği de hiçbir şekilde ısınının kullanılmamasıdır. Metal atomlarını yüzeyden koparmak için gereken enerji ısı ile değil, metalik yüzeye uygulanan yüksek hızlı iyon bombardımanı yani kinetik enerji ile elde edilir.

2.7.2. Buharlaştırma tekniği

Yıldırım(2009)’ a göre; bu metod genel olarak bir vakum ortamında temiz bir yüzey elde etmek için veya bir malzeme üzerine bir metalin kaplanması işleminde kullanılır.

Buharlaştırma ile elde edilen kontakların büyük çoğunluğu 10^{-5} Torr civarında basınç

sağlayan difüzyon pompası ile pompalanan vakum sistemi içinde yapılırlar. Holland (1956) bu kaplama metodunu kullanarak değişik metal filmler üretmiştir. Genel olarak, yüksek sıcaklığa dayanabilen Molibden ve Titanyum gibi metaller Elektron Beam Heating (ısı sonucu elektron demetinin oluşması) yöntemiyle buharlaştırılırken, Alüminyum ve Altın gibi düşük erime sıcaklığına sahip metaller bir filaman şeklindeki rezistansın ısıtılmasıyla kolaylıkla buharlaştırılabilir.

Yarıiletkenin yüzeyinde hiç oksit tabakası olmasa bile, yarıiletken vakum sistemine konulana kadar hava ile etkileşmesi ile veya istenen basınca ulaşana kadarki süre içinde oksit tabakası oluşabilir. Örneğin 10^{-5} Torr basınçta yüzeye çarparak yapışan gaz molekülleri 10^{-1} saniye kadarlık sürede bir tabaka oluşturacaktır. Silisyum üzerindeki oksijen için beklenen yapışma katsayısı 10^{-3} (Joyce and Neave 1971) kadar düşükse tek bir tabakanın oluşması için daha büyük bir zaman (yaklaşık 100 sn) gerekir. Halbuki, yarıiletken yüzeyi pompanın basıncının düşme zamanı 10'larca dakikalara vardığı için daha fazla basınca maruz kalır. Son basınç değerine ulaştıktan sonra vakum sistemi içinde yarma (cleave) veya dağlama (etching) ile yüzey hazırlanıyorsa vakum 10^{-7} Torr'da tutulmadıkça yine bir oksit tabakası oluşacaktır. Bu mertebedeki basıncı muhafaza edebilmek için çok iyi bir vakum sistemi gerekmektedir.

Ayrıca bir ara yüzey tabakası da difüzyon pompasından buharın adsorbsiyonunun sonucu olarak oluşabilir. Cowley ve Sze (1965) yılında iyon pompası kullanarak bu tür kirliliklerden korunabilmenin mümkün olabileceğini göstermiştir (Rhoderick 1992). Bu yüzden 10^{-7} - 10^{-8} Torr vakuma ulaşabilen iyon pompası kullanmak yaygındır.

Ara yüzey tabakasının oluşmasını önlemenin tek yolu yaklaşık 10^{-10} Torr'luk düşük basınçta yüksek vakumda cleave ettikten sonra bir film yarıiletken yüzeyine çabucak buharlaştırmaktır (Thanailakis 1973; Newman *et al.* 1986). Bu basınçta adsorblanan gaz atomlarının bir tabaka oluşturması için geçen zaman o kadar uzundur ki, (yaklaşık 10^7 sn) bir arayüzey tabakasının oluşması veya metal filmin kontaminasyona uğrama

imkânı yoktur. Fakat bu yolla hazırlanan kontaklar kimyasal olarak ideal olmalarına rağmen, yarıma sırasında yüzeye mekanik olarak zarar vermek mümkün olduğundan kontaklar ideal olmayacaklardır ve çoğunlukla I - V karakteristikleri ve idealite faktörü beklenen değerinden büyük olacaktır. Bu metod çok yavaş ve pek kullanışlı değildir ve ayrıca bu yöntemin potansiyel avantajı yoktur.

2.7.3. Kimyasal kaplama ile kontak yapma

Basit ve maliyet açısından ucuz oluşu nedeniyle özellikle yüksek sıcaklığa dayanabilen metaller için bu teknik popüler bir teknik olmaya başlamıştır (Fraser 1983). Crowell ve çalışma grubu (1965), Tungsten hegzaklorürü uygun bir yarıiletkenle kimyasal işleme tabi tutarak, tungsteni Ge, Si ve GaAs üzerine kaplamışlardır. Bu şekilde elde edilen Schottky diyotların idealite faktörü 1.04 civarında olmuştur (Yıldırım 2009).

Bu teknikle kaplama yapmak özellikle entegre devre teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Shaw and Amick 1970; Brors *et al.* 1984). Kano ve çalışma grubu (1966), Molibden pentaklorürü hidrojenle indirgeyerek Mo/Si diyodlar yapmışlar ve hemen hemen ideal doğrultma karakteristikleri bulmuşlardır. Furakawa and Isbibashi (1967) p -tipi ne n -tipi GaAs'a Kalay klorür'ü hidrojenle indirgeyerek hem omik ve hem de doğrultucu kontak yapılabileceğini göstermişlerdir (Yıldırım 2009).

Ayrıca çözelti ile kaplama da yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Gold'berg ve çalışma grubu (1971) bir elektrolit prosesi ile GaP'ı Nikel ve Altın ile kaplayarak hemen hemen ideal Schottky diyodların yapılabileceğini ifade etmişlerdir. Kimyasal kaplama ile ilgili literatürde çok fazla bilginin olmadığı söylenebilir. Bunun nedeni; yarıiletken devre elemanı üretimi ile ilgili mevcut diğer yöntemlerle karşılaştırılamayacak teknolojik durum olabilir veya ticari açıdan gizli tutuluyor olabilir (Yıldırım 2009).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Numunenin Temizlenmesi ve Kontak İçin Hazır Hale Getirilmesi

Bu çalışmada (100) doğrultusunda büyütülmüş $7,3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ taşıyıcı konsantrasyonuna sahip iki yüzü parlatılmış *n*-tipi GaAs wafer kullanılmıştır. Alınan ölçülerin sonuçlarının güvenilir olabilmesi için numune yüzeyinin organik ve mekanik kirlilerden arındırılması gerekmektedir. Kimyasal temizleme için sırasıyla aşağıdaki işlemler takip edildi.

1. Trikloretilende ultrasonik olarak 5 dakika yıkama.
2. Asetonda ultrasonik olarak 5 dakika yıkama.
3. Metanolde ultrasonik olarak 5 dakika yıkama.
4. Deiyonize su ile ($18M \Omega$) iyice yıkama.
5. $H_2SO_4:H_2O_2:H_2O$ (5:1:1) ile 1 dakika süreyle yıkama.
6. Deiyonize su ile iyice yıkama.
7. H_2O+HF (10:1) içinde 30 saniye yıkama
8. Azot gazı (N_2) ile kurutma.

Buharlaştırmada kullanılacak metaller, 5 dakika metanolde ultrasonik olarak ve H_2O+HCl (10:1) içinde yıkandı (Chattopadhyay and RayChaudhuri 1991; Türüt vd 1992). Numunenin kimyasal temizleme işleminden sonra bir yüzeyine omik kontak yapılması için buharlaştırmada kullanılacak ısıtıcı %10'luk HCl ve deiyonize su ile yıkanarak kurutulduktan sonra vakum cihazına yerleştirildi. Oksitlenme gibi kirliliklerin en aza indirilmesi için ısıtıcı tek olarak yakıldı. Kimyasal olarak temizlenen ve omik kontak yapımı için kullanılacak olan *In* metali ısıtıcının üzerine yerleştirilerek, vakum içindeki basınç, yaklaşık olarak 10^{-5} torr değerine gelince numunenin bir yüzeyine buharlaştırıldı. Kontakın homojen olması için N_2 ortamında $385^{\circ}C$ 'de üç dakika tavlansak omik kontak işlemi tamamlanmış oldu. Daha sonra Schottky kontak yapmak

için Ni hedef plaka magnetrona yerleştirildi ve yaklaşık 1 mm çapında saçtırma tekniği ile Schottky diyotlar yapıldı.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Giriş

Bu bölümde Ni/n-GaAs diyodunun kapasite-voltaj ($C-V$) ve akım-voltaj ($I-V$) ölçümlerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimleri ve bu değişimlerden elde edilen temel diyot parametreleri bulunmaktadır.

4.2. Schottky Diyotlarda Akım-Gerilim Ölçümleri

Schottky diyodun doğru beslem Akım-gerilim ($I-V$) ölçümleri yardımıyla diyot parametreleri olan idealite faktörü ve engel yüksekliği hesaplanmıştır. İdealite faktörünü hesaplamak için

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

ile verilen eşitlik kullanılmıştır. Bu ifadede $eV \gg nkT$ olması durumunda üstel terim yanında 1 ihmal edilebilir. Bu durumda ifadenin yeni hali

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

şeklini alır. (4.2) ifadesinin her iki tarafının tabii logaritması alınıp, sonra da V 'ye göre türevi alınırsa; idealite faktörü için (4.3) ifadesi elde edilir:

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

$\ln I$ - V grafiği çizildiğinde, düz beslem kısmındaki lineer bölgeye bir doğru fit edilerek bu doğrunun eğiminden $dV/d(\ln I)$ elde edilir. Bu değerle birlikte e , (elektronun yükü $=1,6 \times 10^{-19}$ C), k (Boltzmann sabiti $=8,625 \times 10^{-5}$ eV/K) ve T (sıcaklık (K)) değerleri (4.3) ifadesinde yerine yazılarak idealite faktörü değerleri her bir sıcaklıkta hesaplanmıştır. Fit edilen doğrunun $V=0$ 'da düşey eksenini kestiği nokta I_0 doyma akım yoğunluğunu verir. (4.2)'deki I_0 doyma akım yoğunluğu,

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

ile verilmektedir. (4.4) eşitliğinin her iki tarafının tabii logaritması alınıp Φ_b 'ye göre çözümlerse, (4.5) ile verilen engel yüksekliği ifadesi elde edilir.

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

Bu ifadede; diyodun etkin alanı ($A = 0.007854 \text{ cm}^2$)

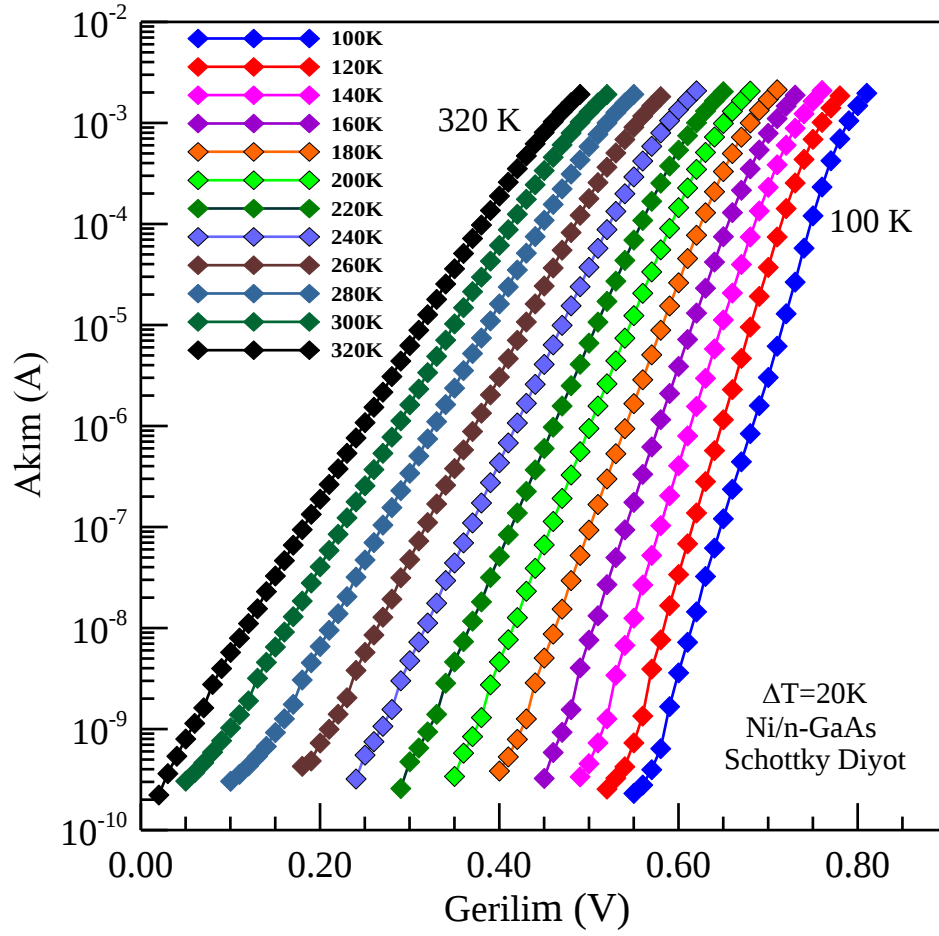
A^* , Richardson sabiti olup n -tipi GaAs için $8.16 \text{ A/(K}^2\text{cm}^2)$ olarak alınır.

Sıcaklığa bağlı olarak diyodun doğru beslem akım-voltaj grafikleri Şekil 4.1 'de verilmiştir. Bu grafiklerin doğru kısmının düşey eksenini kestiği noktadan doyma akım yoğunlukları belirlendi. Akım-Gerilim grafiklerinden okunan doyma akım yoğunlukları (4.5) eşitliğinde kullanılarak engel yükseklikleri hesaplandı. Akım-gerilim grafiklerinden elde edilen engel yükseklikleri, idealite faktörleri ve doyma akım değerleri Çizelge 4.1 'de görülmektedir.

Çizelge 4.1. Ni/n-GaAs diyoduna ait sıcaklığa bağlı I 'nın V 'ye karşı değişiminden elde edilen temel parametreleri

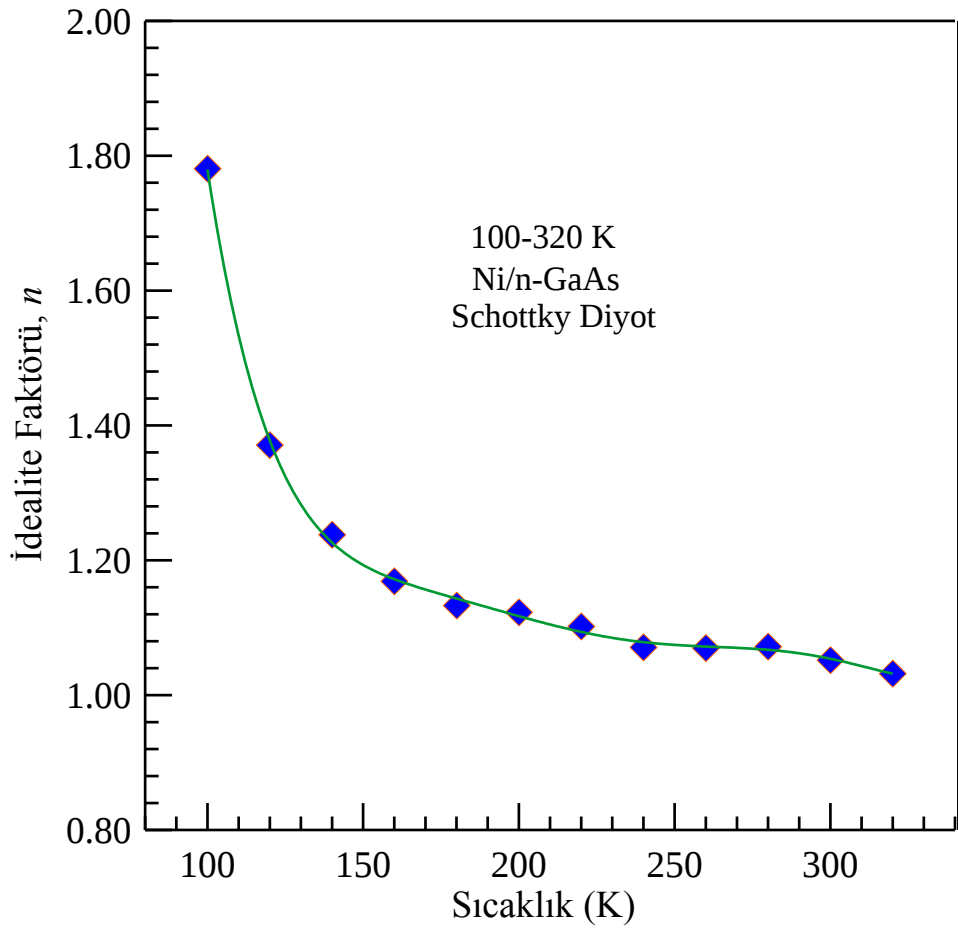
<i>Sıcaklık (K)</i>	<i>I-V</i>		
	<i>n</i>	$\Phi_b(\text{eV})$	$I_0(\text{A})$
100	1,781	0.558	$5,076 \times 10^{-26}$
120	1,371	0.686	$1,480 \times 10^{-26}$
140	1,238	0.749	$1,503 \times 10^{-24}$
160	1,169	0.787	$2,861 \times 10^{-22}$
180	1,133	0.811	$4,244 \times 10^{-20}$
200	1,123	0.820	$5,698 \times 10^{-18}$
220	1,102	0.833	$2,686 \times 10^{-16}$
240	1,071	0.847	$6,334 \times 10^{-15}$
260	1,070	0.846	$1,751 \times 10^{-13}$
280	1,072	0.845	$3,142 \times 10^{-12}$
300	1,052	0.854	$2,639 \times 10^{-11}$
320	1.032	0.863	$1,679 \times 10^{-10}$

Çizelge 4.1'den görüldüğü gibi, artan sıcaklıkla idealite faktörü değerleri azalırken engel yüksekliği değerleri artmıştır. Engel yükseklikleri 320 K'de 0.863 eV ile 100 K'de 0.558 eV arasında, İdealite faktörleri ise 320 K'de 1.032 ile 100 K'de 1.781 değerlerini almıştır. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi, oda sıcaklığından (300 K) daha düşük sıcaklıklara doğru azalan voltaj ve sıcaklığa bağlı olarak akım azalmaktadır, yani aynı gerilim değerinde azalan sıcaklıkla akım azalmaktadır.

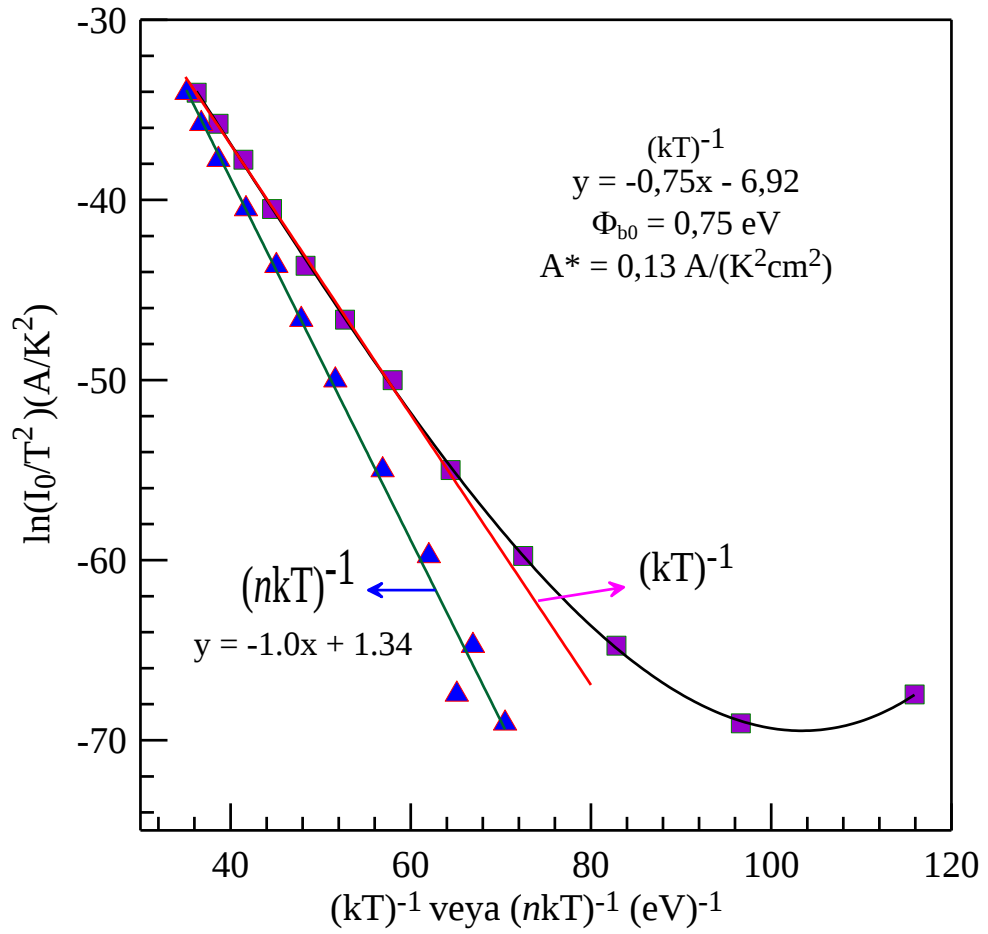


Şekil 4.1 Ni/n-GaAs diyotuna ait numune sıcaklığına bağlı Akımın-Voltaj grafiği

Ni/n-GaAs diyodunun idealite faktörü, (4.3) eşitliğinden ve Schottky engel yüksekliği (4.5) eşitliğinden hesaplandı. Engel yüksekliği ve idealite faktörünün sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 4.2 ve Şekil 4.8’de görülmektedir. İdealite faktörü artan sıcaklıkla azalmakta iken (Şekil 4.2), engel yüksekliği artan sıcaklıkla artmaktadır (Şekil4.8).



Şekil 4.2. Ni/n-GaAs diyotuna ait sıcaklığa bağlı I - V grafiğinden elde edilen idealite faktörünün sıcaklıkla değişimi

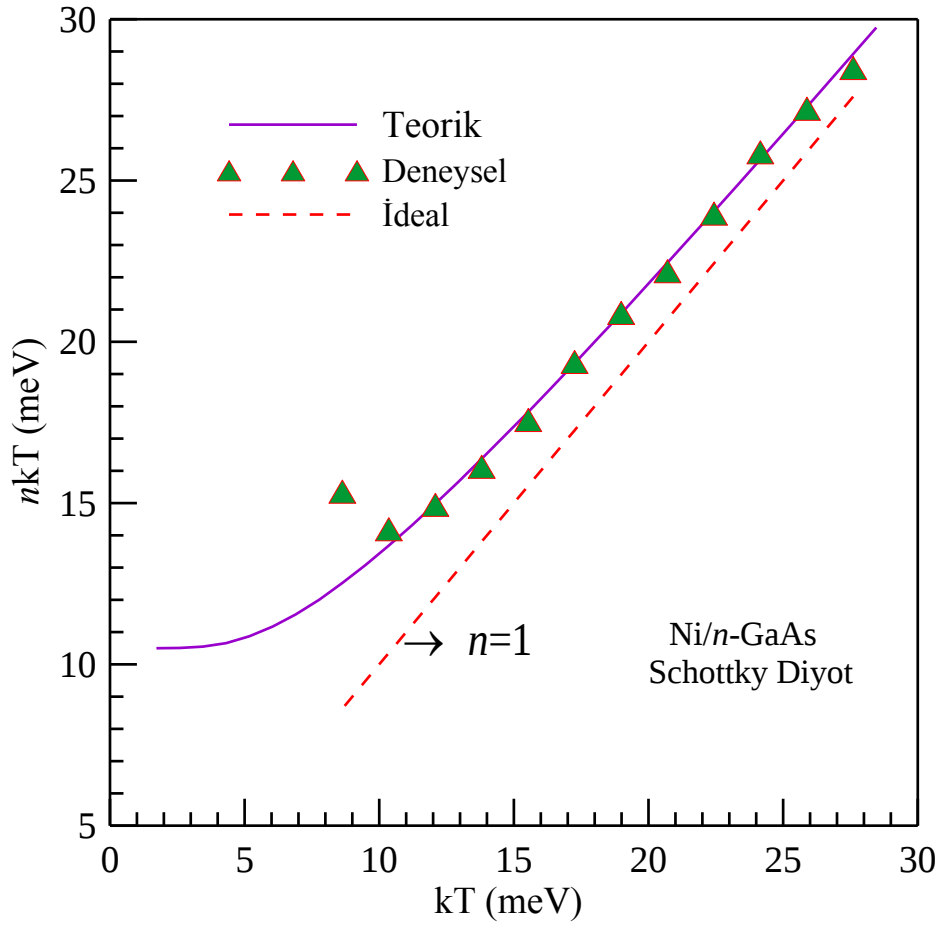


Şekil 4.3. $\ln(I_0/T^2)$ 'nin $(nkT)^{-1}$ veya $(kT)^{-1}$ 'e karşı çizilen Richardson eğrileri

I - V grafiğinden elde edilen $\ln(I_0/T^2)$ 'nin $(kT)^{-1}$ veya $(nkT)^{-1}$ 'e karşı çizilen grafiğinden görüldüğü gibi, veya (4.4) eşitliğini düzenlersek,

$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) = \ln(AA^*) - \frac{e\Phi_b}{kT} \quad (4.6)$$

eşitliği elde edilir. Burada, Şekil 4.3'deki grafikte kırmızı fit doğrusunun eğimi $e\Phi_b$ 'yi ve düşey eksenini kestiği nokta ise $\ln(AA^*)$ 'yi vermelidir. Bu ifadelerden Richardson sabiti ($A^*=0.13 \text{ A/K}^2\text{cm}^2$) ve engel yüksekliği $\Phi_b=0.75\text{eV}$ olarak hesaplanmıştır. Richardson eğrilerindeki sapmanın nedeni, arayüzeydeki potansiyel dalgalanmalarıyla ve homojen olmayan engel yükseklikleri ile açıklanabilir.



Şekil 4.4. Ni/n-GaAs Schottky diyotun 100-320 K sıcaklık aralığında kT 'ye karşı nkT grafikleri

4.3. Schottky Diyotlarda Kapasite-Gerilim Ölçümleri

Bir Schottky diyotta uzay yükü bölgesinin kapasitesi incelenerek metal/yarıiletken arayüzeyin oluşumu hakkında önemli bilgiler elde edilir. Ters belsem durumunda kapasitenin gerilime bağlı değişiminden, doğrultucu kontağın engel yüksekliği, yarıiletkendeki taşıyıcı konsantrasyonu, difüzyon potansiyeli ve Fermi enerji seviyesi hesap edilebilir (Wilmsen 1995).

Ni/n-GaAs diyoduna ait kontakların etkin alanı 0.007854 cm^2 olan dairesel kontaklardır. Ni/n-GaAs diyodunun C-V ölçümleri 100-320 K aralığında 20 K'lık artışlarla alınmıştır. Bu ölçüler (4.7) eşitliği düzenlenerek değerlendirilmiştir:

$$C = A \left(\frac{\varepsilon_s \varepsilon_0 e N_d}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(V_d - \frac{kT}{e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.7)$$

(4.7) eşitliği düzenlenecek olursa, (burada ε_s , yarıiletkenin dielektrik sabiti, GaAs için $\varepsilon_s=13,2$ ε_0 , boşluğun dielektrik sabiti $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ F/m, e , elektronun yükü, V_d , difüzyon potansiyeli, $k= 8,625 \times 10^{-5}$ eV/K Boltzmann sabiti, N_d iyonize olmuş donör konsantrasyonu ve T , Kelvin cinsinden sıcaklıktır)

$$C^{-2} = \frac{2(V_d + V)}{\varepsilon_s \varepsilon_0 e A^2 N_d} \quad (4.8)$$

eşitliği elde edilir, Ayrıca yukarıda söylenilen diyot parametrelerini hesaplamak için kullanılabilir. Burada, V uygulama gerilimidir. $(C^{-2}-V)$ grafiği çizildiğinde yapılacak uygun lineer fit ile $C^{-2}=0$ için $V_d=V_0$ olarak difüzyon potansiyeli elde edilmiş olur. Bu grafiklerden yararlanılarak farklı sıcaklıklarda bulunan difüzyon potansiyelleri, Çizelge 4.2 'de görüldüğü gibi 0.703 V ile 0.930 V değerleri arasında değişmektedir. (4.8) ifadesinin V 'ye göre türevi alınır,

$$\frac{d(C^{-2})}{dV} = \frac{2}{\varepsilon_s \varepsilon_0 e A^2 N_d} \quad (4.9)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadeden N_d çekilirse,

$$N_d = \frac{2}{\varepsilon_s \varepsilon_0 e A^2 \frac{d(C^{-2})}{dV}} \quad (4.10)$$

denklemleri elde edilir. $(C^{-2}-V)$ grafiğinden elde edilen taşıyıcı konsantrasyonları aşağıda, Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi, 5.912×10^{16} ile $7.206 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ değerleri arasında değişmektedir. Termal dengede n -tipi bir yarıiletkendeki elektron konsantrasyonu,

$$n_0 = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \quad (4.11)$$

ile verilmektedir. Burada, N_c , termal dengede iletkenlik bandındaki hal yoğunluğu olup, GaAs için $N_c = 4.71 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, tür. n -tipi bir yarıiletken için $N_d > n_i$ olacağı için $n_0 \approx N_d$ olur (Neamen 1992). Burada n_i , asal elektron konsantrasyonudur. Bu durum dikkate alındığında, (4.11) ifadesi,

$$N_d = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \quad (4.12)$$

olarak elde edilir. Son ifadenin tabii logaritması alınacak olursa ve iletkenlik bandı referans seviye olarak ($E_c = 0$) kabul edilirse,

$$E_f = kT \ln\left(\frac{N_d}{N_c}\right) \quad (4.13)$$

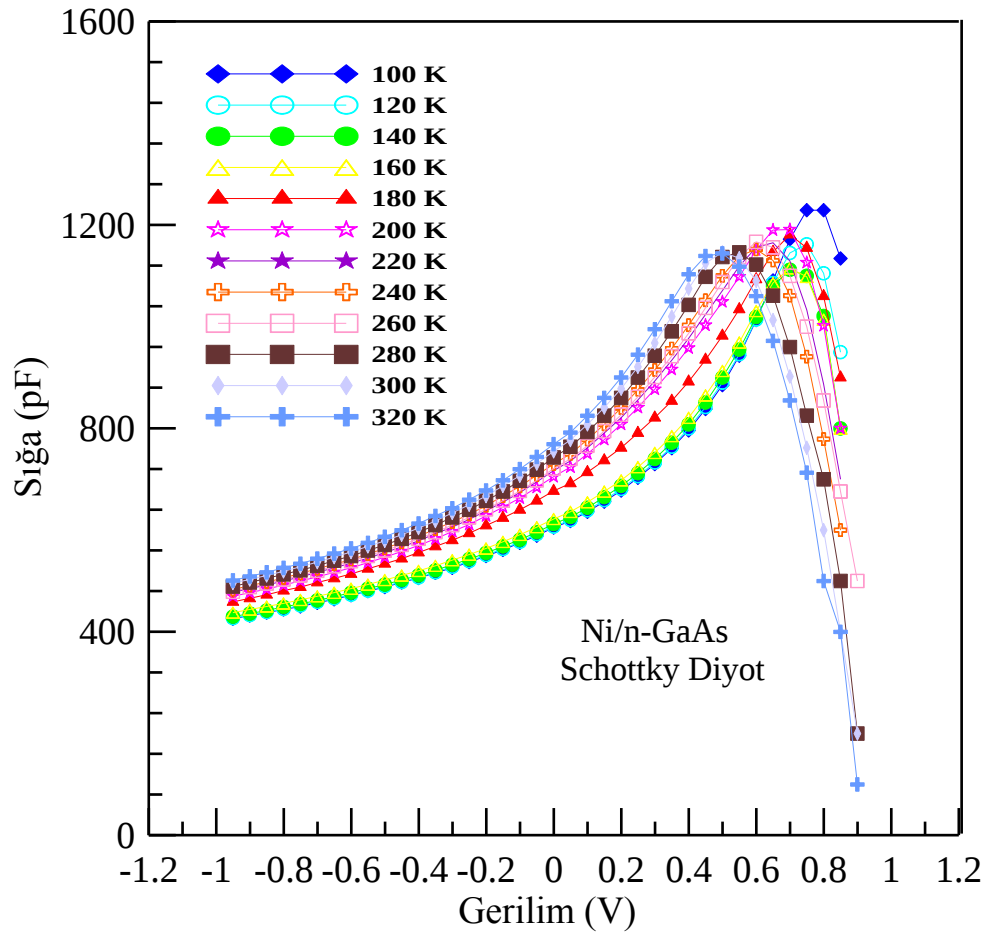
eşitliği bulunur. Sonuç olarak, Fermi enerji seviyesi elde edilmiş olur. Ni/ n -GaAs diyotuna ait Fermi enerji seviyeleri Çizelge 4.2’de belirtildiği gibi, 0.0023 eV ile 0.0501 eV değerleri arasında değişmektedir. C - V grafiğinden engel yükseklikleri

$$\Phi_b = E_f + V_d \quad (4.14)$$

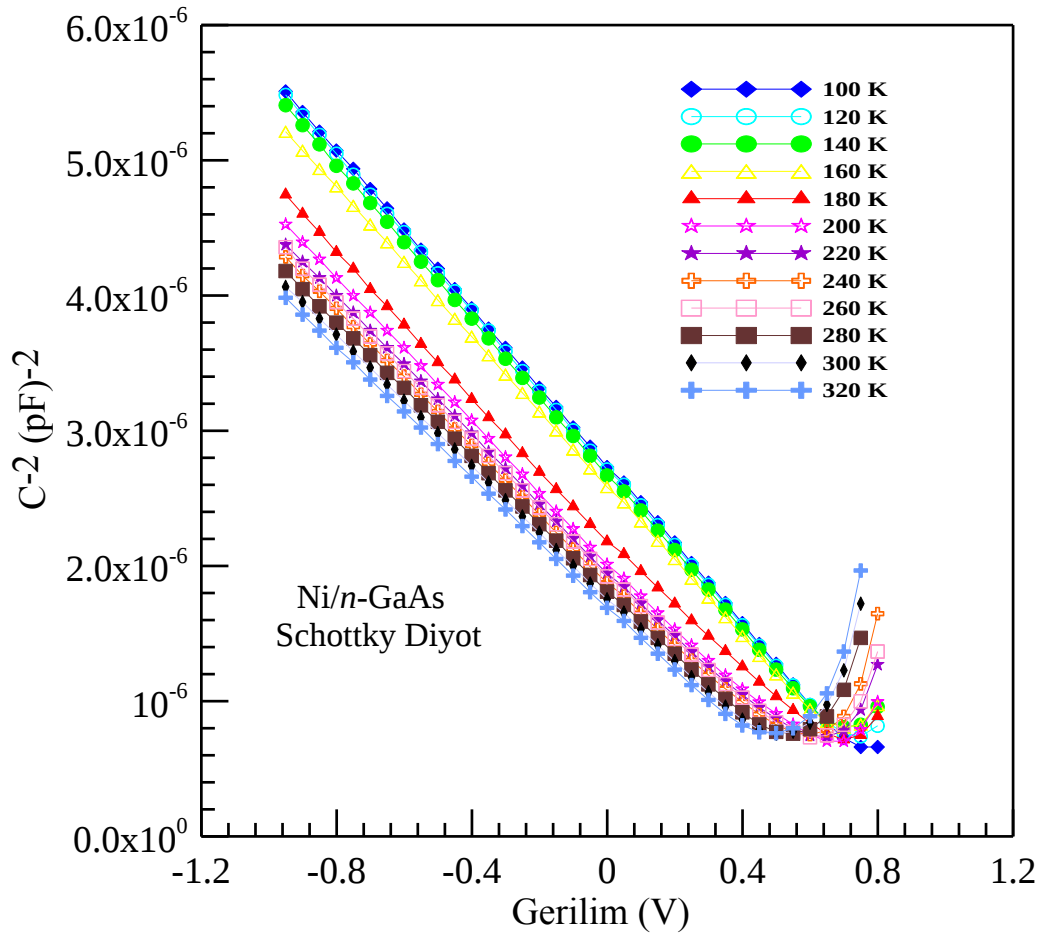
ile verilmektedir (Neamen 1992). Ni/n-GaAs diyoduna ait, C-V ölçümlerinden elde edilen engel yükseklikleri Çizelge 4.2’de gösterildiği gibi 0.753 eV ile 0.932 eV değerleri arasında değişmektedir.

Çizelge 4.2. Ni/n-GaAs diyoduna ait $1/C^2$ ’nin V’ye karşı değişiminden elde edilen temel diyot parametreleri

Sıcaklık(K)	C-V			
	Vd(V)	Ef(eV)	Nd(cm ⁻³) x10 ¹⁶	Φb (eV)
100	0.930	0.0023	5.912	0.932
120	0.931	0.0055	5.953	0.936
140	0.928	0.0091	6.028	0.937
160	0.933	0.0126	6.259	0.946
180	0.796	0.0166	6.404	0.814
200	0.754	0.0209	6.515	0.775
220	0.756	0.0250	6.744	0.781
240	0.737	0.0297	6.834	0.767
260	0.779	0.0345	6.963	0.814
280	0.727	0.0398	6.963	0.767
300	0.717	0.0449	7.094	0.762
320	0.703	0.0501	7.206	0.753

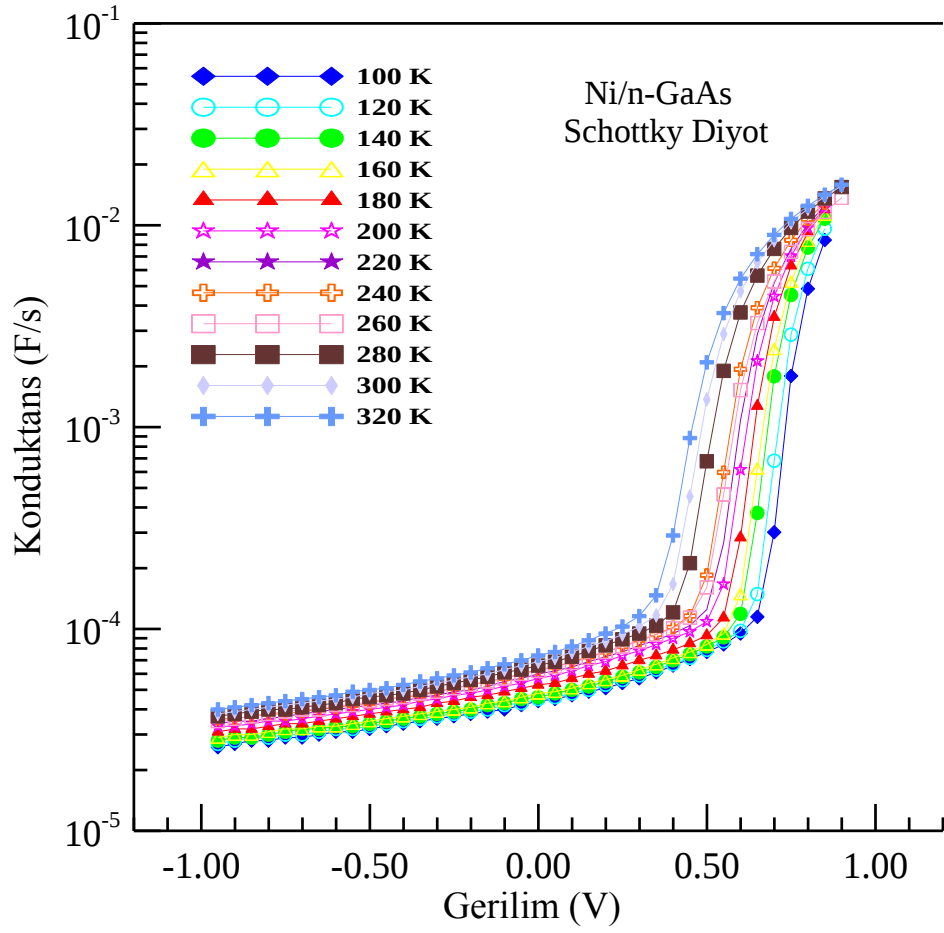


Şekil 4.5. Ni/n-GaAs diyoduna ait sıcaklığa bağlı C 'nin V 'ye karşı değişimi.



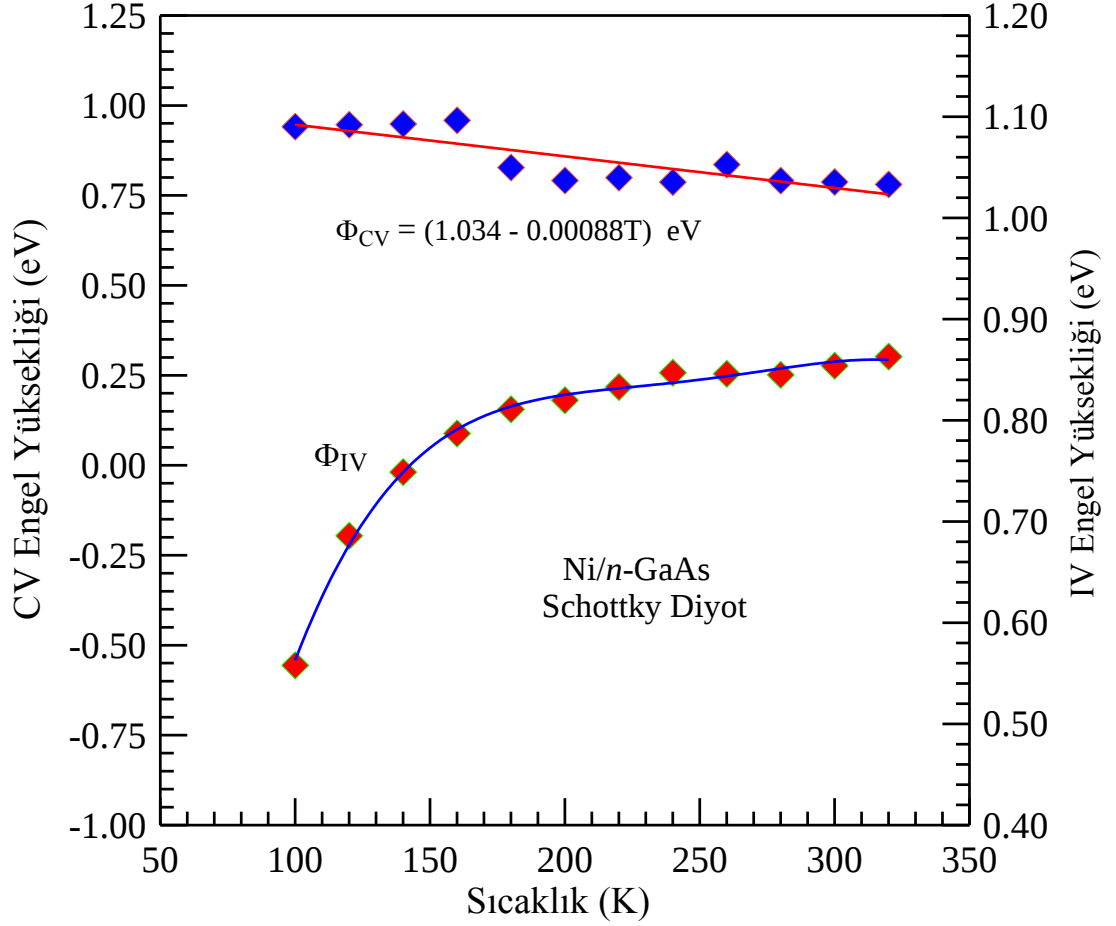
Şekil 4.6. Ni/n-GaAs diyodunun ait sıcaklığa bağlı 0.8 V ile -1,0 V aralığında C^{-2} -V'ye karşı değişimi, (0.8 V) ile (-1.0 V) aralığı ters beslem durumuna karşılık gelmektedir.

Şekil 4.5 'de, düz ve ters beslem bölgelerinde düşük sıcaklıklardan yüksek sıcaklıklara doğru gidildikçe kapasitenin arttığı görülmektedir. Şekil 4.6 'da sıcaklığa bağlı ters beslem grafiğinden (C^{-2} -V) değişimini göstermektedir. Düşük sıcaklıklardan yüksek sıcaklıklara doğru gidildikçe kapasitenin artmasından dolayı C^{-2} değerleri, aynı gerilimde sıcaklıkla ters orantılı olarak değişmektedir.



Şekil 4.7. Ni/n-GaAs diyduna ait sıcaklığa bağlı bağlı 0.8 V ile -1,0 V aralığında Kondüktans (G)'nin V 'ye karşı değişimi

Şekil 4.7'de, düz ve ters beslem bölgelerinde düşük sıcaklıklardan yüksek sıcaklıklara doğru Kondüktans-Gerilim grafikleri görülmektedir. Tüm gerilimlerde, artan sıcaklıkla kondüktansın arttığı görülmektedir. Ayrıca, tüm sıcaklıklarda, -1.0 Volttan +1.0 Volta doğru, artan gerilim değeriyle kondüktans değeri artmaktadır.



Şekil 4.8. Ni/n-GaAs diyduna ait sıcaklığa bağılı I - V ve C - V grafiğinden elde edilen engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi

Şekil 4.8 'teki verilere yapılan fit $\Phi_{CV} = 1.03(T=0) - 0.00088T$ denklemini verir. Bu fit denklemdaki 0.88 meV/K'lık eğim engel yüksekliğinin sıcaklık katsayısı olarak bilinir. Schottky Engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi genellikle Schottky diydun yapımında kullanılan yarıiletkenin yasak band aralığının sıcaklık bağımlılığını izler.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Çalışmamızda, iki yüzü parlatılmış, [100] doğrultusunda büyütülmüş, 300-400 μm kalınlığında ve donör konsantrasyonu $7,3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ olan n -tipi GaAs(Si) yarıiletkeni kullanılmıştır. Vakum altında saçırma (sputtering) metoduyla 1.0 mm çaplı Nikel Schottky diyotlar elde edilmiştir. Üretilen Ni/ n -GaAs Schottky diyotların belirli bir sıcaklık aralığında (100-320 K) I - V (akım-gerilim) ve C - V (kapasite-voltaj) karakteristikleri incelenmiştir.

Ni/ n -GaAs Schottky diyot edildikten sonra 100 K'den başlayarak 20 K'lik adımlarla 320 K'e kadar her sıcaklıkta I - V ve C - V ölçümleri alındı. Bu Ni/ n -GaAs/In Schottky diyotların I - V karakteristikleri Şekil 4.1'de verilmiştir. Bu diyota ait her bir sıcaklığa karşılık gelen idealite faktörü değerleri I - V grafiklerinin lineer bölgelerinin eğiminden hesaplandı. Bir diyodun idealliği idealite faktörünün bir değerine yaklaşması ya da uzaklaşması ile belirlenebilir. Sıcaklığa bağlı I - V grafiklerinden hesaplanan idealite faktörünün sıcaklıkla değişimi Şekil 4.2' de görülmektedir. Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi idealite faktörleri 1,781 (100K) ile 1,032 (320K) arasında, engel yükseklikleri ise; 0,558 eV (100K) ile 0,863 eV (320K) arasında değişmektedir. Bu değişimlerden görüleceği gibi; sıcaklığın artması ile idealite faktörü azalırken, engel yüksekliği artmaktadır. Bu değişimler metal/yarıiletken arayüzeyindeki atomik inhomojen engelin bir fonksiyonu olarak açıklanabilir (Biber vd 2001; Werner *et al.* 1991; Sullivan *et al.* 1991; Tung 1992). Bu durum atomik yapının farklı fazlardan, yüzey kusurlarından ve arayüzey etkisinden ortaya çıkabilir.

Akım iletimi metal/yarıiletken arayüzeyi boyunca sıcaklığa bağlı olduğundan, düşük sıcaklıklarda elektronlar ancak daha düşük engelleri aşabilirler. Bu yüzden, akım daha düşük Schottky engel yükseklikli bölgelerden geçen akım akışıyla belirlenir. Sıcaklık artmasıyla daha fazla elektron yüksek Schottky engellerini aşmak için yeterli enerjiye sahip olur ve böylece baskın olan engel yüksekliği beslem voltajı ve sıcaklıkla artarken idealite faktörü azalır (Sullivan *et al.* 1991; Tung 1992).

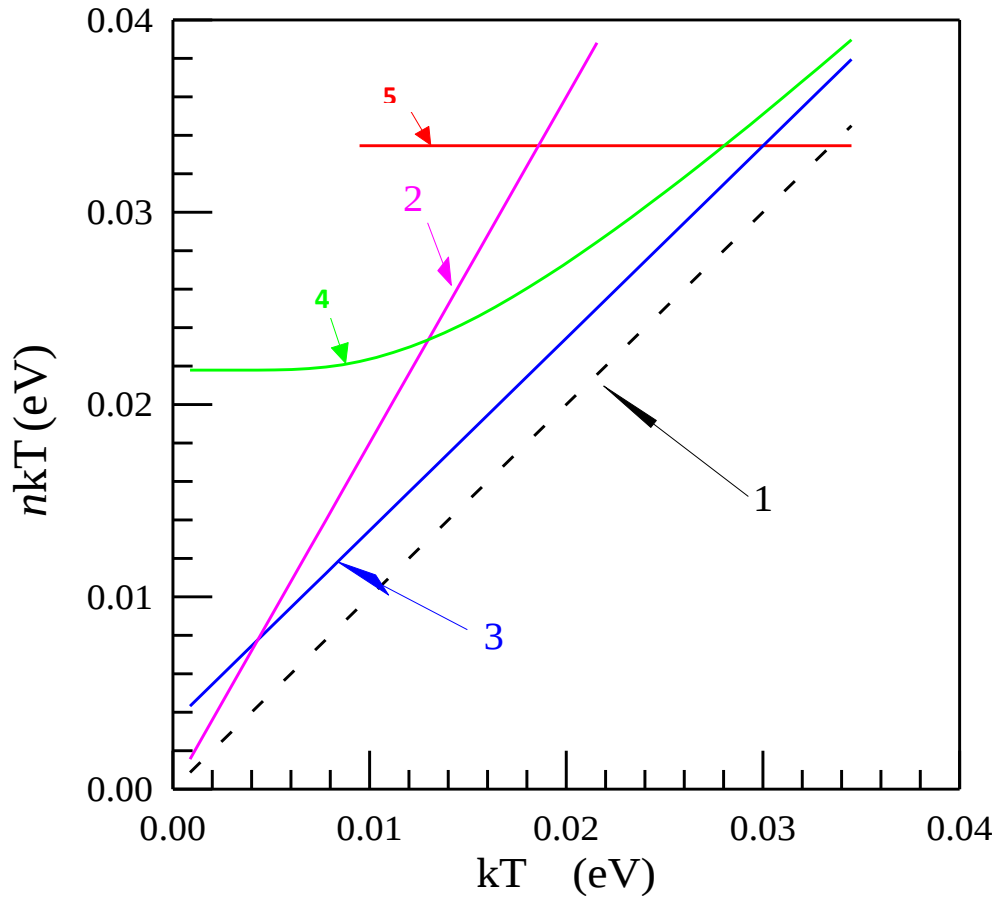
Şekil 4.8 'de Sıcaklığa bağlı olarak I - V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliğinin ve C - V ölçümlerinden elde edilen engel yükseklikleri verilmiştir. Bu ölçümlerden elde edilen engel yükseklikleri değerleri birbirinden farklıdır. Kapasite-Voltaj ölçümlerinden elde edilen engel yükseklikleri sıcaklığın artmasıyla azalırken, akım-voltaj ölçümlerinden elde edilen engel yükseklikleri artan sıcaklıkla artmaktadır. Potansiyel engelin uzaysal dağılımı akım-voltaj ve kapasite-voltaj ölçümleri farklı şekilde etkilendiğinden her iki ölçümden elde edilen engel yükseklikleri birbirinden farklı olmaktadır. Arayüzeydeki akım Φ_b 'ye üstel bağlı olduğundan engel yüksekliğinde uzaysal değişim akımın daha minimum engelden geçmesine neden olur. Bu nedenle, Schottky diyotlarda C - V karakteristiklerinden elde edilen engel yüksekliklerinin (Φ_{CV}), I - V karakteristiklerinden elde edilen engel yüksekliklerinden (Φ_{IV}) daha büyük çıkması beklenen bir durumdur (Rhoderick and Williams 1988; Jürgen *et al.* 1991). Yüksek konsantrasyonlu yarıiletkenler için (C - V) ve (I - V) karakteristiklerinden elde edilen engel yükseklikleri arasındaki fark daha büyüktür (Sullivan *et al.* 1991).

Yukarıda ifade edildiği gibi, C - V karakteristiklerinden elde edilen engel yüksekliklerinin (Φ_{CV}) azalan sıcaklıkla artmaktadır. Şekil 4.8 'deki verilere yapılan fit $\Phi_{CV} = 1.03(T=0) - 0.00088T$ denklemini verir. Bu fit denklemdeki 0.88 meV/K'lik eğim engel yüksekliğinin sıcaklık katsayısı olarak bilinir. Schottky Engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi, genellikle, Schottky diyodun yapımında kullanılan yarıiletkenin yasak band aralığının sıcaklık bağımlılığını izler. Yani, engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlı değişimi band aralığının sıcaklığa bağımlılığından ileri gelir. Bundan dolayı, değişiminden dolayı her ikisinin sıcaklığa bağlı değişimleri hemen-hemen aynı olmalıdır. (Yildirim *et al.* 2009)

Vurgaftman (2001) ve Passler n-tipi GaAs yarıiletkenin enerji band aralığının sıcaklık katsayısı için, sırasıyla, -0.46 ve -0.477 eV/K'lik değerler elde ettiler (Turut 2012, A. Turut, *Turk. J. Phys.* 36, 235 (2012)). Özdemir vd (2006) ve Karataş ve Altındal (2005), Au/n-GaAs Schottky diyotlar için, sıcaklık bağımlı C - V karakteristiklerinden, sırasıyla, -0.674 ve -0.60 eV/K'lik değerler elde ettiler. Missous *et al.* (1992) Au/n-GaAs ve Al/n-GaAs Schottky engelli diyotlar için, sıcaklık bağımlı deneysel C - V

karakteristiklerinden, sırasıyla, -0.23 ve -0.32 eV/K'lık değerler rapor ettiler. Hardikar (1999) ve Biber (2003) Cu/n-GaAs Schottky diyotlar için, sıcaklık bağımlı C-V karakteristiklerinden, sırasıyla, -0.47 ve -0.78 eV/K'lık değerler deneysel olarak hesapladılar. Görüldüğü gibi, metal-yarıiletken kontaklarda veya Schottky diyotlarda, engel yüksekliğinin sıcaklık katsayısının metalden metale değişmektedir. Literatürlerin çoğunda, bu değişimin metalin kimyasal tabiatıyla veya metalin elektronegatifliğiyle ilişkilendirilebileceğine işaret edilmiştir.

I - V grafiğinden elde edilen $\ln(I_0/T^2)$ 'nin $(kT)^{-1}$ 'e veya $(nkT)^{-1}$ 'e karşı çizilen grafiği Şekil 4.3 'te verilmiştir. $\ln(I_0/T^2)$ 'nin $(kT)^{-1}$ grafiğinde yüksek sıcaklıklarda doğrusal kısmına yapılan fit ile Richardson sabiti $A^*=0.13 \text{ A/(K}^2\text{cm}^2)$ ve engel yüksekliği $\Phi_b=0.75 \text{ eV}$ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen Richardson sabiti değerinin teorik değer olan $8.16 \text{ A/(K}^2\text{cm}^2)$ değerinden farklı çıkması arayüzeydeki potansiyel dalgalanmalarıyla ve homojen olmayan engel yükseklikleri ile açıklanabilir. Şekil 4.3'te görüldüğü gibi, 100-320 K sıcaklık aralığında, $\ln(I_0/T^2)$ 'nin $(nkT)^{-1}$ grafiği lineer lineer bir değişim göstermiştir. Bu grafikten elde edilen 1.0 eV'luk etkin engel yüksekliği değeri, Şekil 4.8'deki C-V karakteristiklerin verdiği 1.034 eV 'lik değere eşittir.



Şekil 5.1. kT 'ye karşı nkT grafiği

Şekil 4.4, nkT 'nin kT 'ye karşı değişimini gösterir. Bu grafik, idealite faktörü ve engel yüksekliğinin sıcaklık bağımlılığını açıklar. Şekilde ki kesikli doğru $n=1$ 'e, yani ideal Schottky diyet karakteristiğine karşılık gelir. Bu grafiğin deneysel verileriyle elde edilen eğrisini aşağıda birçok deneysel durumu açıklamak için verilen nkT 'nin kT grafiğini dikkate alarak yorumlayabiliriz (Saxena 1968; Tung 1992).

Yukarıdaki şekilde, Schottky teorisine uyan veya bu teoriden sapan çeşitli eğriler görülmektedir. 1. Eğer diyet, ideal Schottky davranışına uyuyorsa eğimi 1 olan ve Şekil 5.1 'de 1 ile gösterilen doğruya uyacaktır. Bu durumda, $nkT=kT$ olur, yani, $n=1$. 2. Eğer diyet, eğimi birden büyük olan ve Şekil 5.1 'de 2 ile gösterilen doğruya uyuyorsa, idealite faktörü n 'bir'den büyük bir sabittir ve sıcaklıktan bağımsızdır. 3. Eğer diyet, $(nT=T+T_0)$ eşitliğine uyuyorsa, kT 'ye karşı nkT grafiği Şekil 5.1 'de 3 ile gösterilen ve eğimi 1 olan doğruya paralel olacaktır. Bu durumda, verilen bir sıcaklıkta idealite

faktörü, T_0 ile değişecektir. T_0 artık bir sıcaklık olarak sıfırdan büyük bir sabittir ve sıcaklıktan bağımsızdır, ayrıca, TE akım denklemi

$$I = AA * T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{k(T+T_0)}\right) \left(\exp\left(\frac{qV}{nk(T+T_0)}\right) - 1\right) \quad (5.1)$$

ifadesine uyacaktır. (Saxena, 1968; Tung, 1992) 4. Eğer diyot, Padovani ve Stratton'un (1966) termiyonik alan emisyon (TFE) teorisine uyuyorsa, nkT eğrisi Şekil 5.1'de 4 ile gösterilen eğriye benzeyecektir. Bu durumda

$$nkT = E_{00} \coth(E_{00}/kT) \quad (5.2)$$

geçerli olacaktır. Burada

$$E_{00} = \frac{1}{2} \hbar \left[\frac{N}{m^* \varepsilon_0 \varepsilon} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.3)$$

Eşitlik. (5.3) 'te N , yarıiletkenin safsızlık konsantrasyonu, ε yarıiletkenin dielektrik sabitidir. m^* elektronların etkin kütlesi ve diğer semboller de daha önce kullanılan anlamlarını taşımaktadır. Eğer diyodun I-V karakteristiği yukarıdaki TFE'ye tanımlayıcı ($nT = T + T_0$) eşitliğine uyuyorsa, bu durumda T_0 sıcaklığa bağlı bir sabit değildir. Düşük sıcaklıklarda artar. 5. Eğer alan emisyonu (FE) baskın olursa nkT eğrisi Şekil 5.1 'de 5 ile gösterilen eğriye benzer. Bu durumda, nkT sıcaklıktan bağımsızdır ve

$$nkT = E_{00} \quad (5.4)$$

olur. E_{00} , Eşitlik (5.3) 'te verilmiştir.

Ni/n-GaAs Schottky diyotuna ait verilerle çizdiğimiz Şekil 4.4 'deki nkT eğrisi, Şekil 5.1'de ki 4 ile gösterilen eğriye benzemektedir. Denklem (5.2) 'ye göre, 4.4'teki deneysel nkT verilerine bir fit yapılırsa $E_{00}=10.1$ meV olarak elde edilir. Buradan, Ni/n-GaAs Schottky diyotuna ait I - V karakteristiklerinin düşük sıcaklıklarda TFE akım teorine uyduklarını söyleyebiliriz (Padovani and Stratton, 1966).

Kapasite-Voltaj (C - V) ölçümleri 100-320 K sıcaklık aralığında 20 K'lık adımlarla -1 V ile $+1$ V aralığında “ Hewlett Packard” firmasının “4192A 5Hz-13MHz LF Impedance analyser” cihazı ile yapılmıştır. Ni/n-GaAs diyodun C - V karakteristiği tüm sıcaklıklar için çizildi. Şekil 4.5 'de görüldüğü gibi kapasite artan sıcaklıkla artmaktadır. C^{-2} - V karakteristiği ise lineer bir değişim sergilemektedir. Schottky diyodun ters beslem C^{-2} - V grafiklerinden yararlanarak, belirli bir sıcaklık aralığında (100-320 K) difüzyon potansiyeli (V_d), iyonize olmuş donör konsantrasyonu (N_d), fermi enerji seviyesi (E_f), ve engel yüksekliği (Φ_b) hesaplandı. Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi, V_d değerleri 0.930 V ile 0.730 V arasında, N_d değerleri $5.912 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (100K) ile $7.206 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (300K) arasında, E_f değerleri 0.0023 eV ile 0.0501 eV arasında ve Φ_b değerleri ise 0.932 eV ile 0.753 eV arasında değişmektedir.

Ayrıca, Şekil 4.7 'de, düz ve ters beslem Kondüktans -Gerilim grafikleri verilmektedir. Kondüktans değerleri, düşük sıcaklıklardan yüksek sıcaklıklara doğru artmaktadır, yani, belli bir gerilimde, artan sıcaklıkla kondüktansın arttığı görülmektedir. Ayrıca, belli bir sıcaklıkta, -1.0 Volttan $+1.0$ Volta doğru, artan gerilim değeriyle kondüktans değeri artmaktadır.

Sonuç olarak imal edilen Ni/n-GaAs Schottky diyodunun geniş bir sıcaklık aralığında I - V ve C - V ölçümleri alınmıştır. Sıcaklık artışıyla, I - V karakteristiklerinden elde edilen idealite faktörünün azaldığı ve engel yüksekliğinin ise arttığı gözlenmiştir. Bu değişim metal/yarıiletken arayüzeyindeki atomik inhomojen engelin bir fonksiyonu olarak açıklanmıştır. İdealite faktörü ve engel yüksekliği arasındaki lineer ve ters bir ilişki var olup bu ilişki engel yüksekliğinin yanal inhomojenliğine atfedilmiştir. Bunlara ilave

olarak, düşük sıcaklıklarda TFE akımının etkin olduğu sonucuna da varılmış olunmuştur.

KAYNAKLAR

- A. F. Ozdemir, A. Turut and A. Kökçe, *Semicond. Sci. Technol.*, 21, (2006), 298.
- Biber, M., Cakar, M. and Turut, A., 2001. The effect of anodic oxide treatment on n-GaAs Schottky barrier diodes. *J. Mater. Sci-Mater. Elect.* 12, 575-579.
- Braun, F., 1874. On the current conduction through metal sulphides (in German), *Ann. Phys. Chem.*, 153, 556.
- Brillson, L. J. (1993). *Contacts To Semiconductors*, Noyes Publications, New Jersey.
- Brors, DL., Monning KA., Fair, JA., Coney W. and Sarast KC., 1984. CVD Tungsten- a solution for the poor step coverage and high contact resistance of Aluminum. *Solid State Technology*, 27, (4), 313-314.
- Chattopadhyay, P. and RayChaudhuri, R., 1991. Modified conductance technique for the determination of series resistance of mis tunnel-diodes. *Solid-State Elect.*, 34, (12), 1455-1456.
- Cowley, A. M. and Sze S. M., 1965. Surface States and Barrier Height of Metal-Semiconductor System. *J. Appl. Phys.* 36, (10), 3212
- Crowell C. R., Shoreh B., and La bate E . E., 1965. Surface-State and Interface Effects in Schottky Barriers at n-Type Silicon Surfaces. *J. appl. Phys.*, 36, (12), 3843-3850.
- F. Padovani and G. Sumner, 1965 . Experimental study of Au–GaAs Schottkybarriers, *J. Appl. Phys.* vol. 36, no. 12, pp. 3744–3747
- Fraser, D. B., 1983. In *VLSI Technology* (ed. S. M. Sze). Mc Graw-Hill, Singapore.
- Freeouf, J. L., 1981. *Apply. Phys . Lett.*, 39, 727.
- Freeouf, J. L., Jackson, T. N., Laux, S. E., and Woodall, J. M., 1982. Effective barrier heights of mixed phase contacts: Size effects, *Appl. Phys. Lett.*, 40, 634.
- Gold'berg, Y. A., Nasledov, D. N. and Tsarenkov, B. V., 1971. Procedure for fabricating surface-barrier structures by chemical deposition of metals on surface of a semiconductor. *Instrum. Exp. Tech.*, 14, (3), 899.
- Huang, T., and Yang, M., 1991. Interfacial reactions of Cr, Cr-Si, and Cr/Si films on GaAs. *J. Appl. Phys.*, 70, 5675-5683.
- I Vurgaftman, J. R. Meyer and L. R. Ram-Mohan, *J. Appl. Phys.*, 89, (2001), 5815.
- J. H. Werner and H. H. Guttler, *J. Appl. Phys.*, 73, (1993), 1315.
- Joyce, B. A. and Neave, J. H., 1971. An investigation of silicon-oxygen interactions using Auger electron spectroscopy. *Surf. Sci.* 27, (3), 499-515.
- Jürgen H., Werner and Herbert H. Güttler., “Barrier inhomogeneities at Schottky contacts”, *J. Appl. Phys.*, 69(3): 1522-1533 (1991)
- M. Biber, *Physica B*, 325, (2003), 138.
- M. Missous, E H Rhoderick, D. A. Woolf and S. P. Wilkes, *Semicond. Sci. Technol.*, 7, (1992), 218.
- M. O Aboelfotoh, *Solid-State Electron.*, 34, (1991), 51.
- Maeda, K., 2002. Identity of Defect Causing Nonideality in Nearly Ideal Au/n-Si Schottky Barriers, *Appl. Surf. Sci.* 190, 445-449.
- Mott, N. F., 1938. Note On The Contact Between A Metal and An Insulator Or Semiconductor, *Proc. Cambridge Philos. Soc.*, 34, 568.
- Mönch, W., 1995. *Semic. Surfaces and Interfaces*, Springer Series on Surface Science, 26 (Springer, Berlin), 2 nd. ed. 348

- N. Yıldırım, H. Korkut and A. Turut, *EPJ. Appl. Phys.*, 45, (2009), 10302.
- Neamen, D. A., (1992), *Semiconductors Physics and Devices*, R. R. Donnelley & Company, Sydney.
- Newman, N., van Schilfgaarde M., Kendelwicz T., Williams M.D. and Spicer W.E., 1986. Electrical study of Schottky barriers on atomically clean GaAs(110) surfaces. *Phys.Rev. B*, 33, 1146-1159.
- Ohdomari, I. and Tu, K. N., 1980. Parallel silicide contacts. *J. Appl. Phys.*, 51,3735-3739.
- Padovani F.A. and Stratton R. 1966 Field and Thermionic-Field Emission in Schottky Barriers,*Solid-State Electronics*, Vol. 9, pp. 695-707.
- Pickard, G.W., 1906, US patent no.836531.
- R. Passler, *Phys. Rev. B*, 66, (2002), 085201.
- Rhoderick, E.H. and Williams, R.H., 1988. *Metal-Semiconductor Contacts*, 2nd ed.(Clerendon, Oxford).
- S. Hardikar, M. K. Hudait, P. Modak, S. B. Krupanidhi, N. Padha, *Appl. Phys. A*, 68, (1999), 49.
- S. Karatas and S. Altındal, *Mater. Sci. Engineer. B*, 122, (2005), 133.
- S. Zhu, C. Detavernier, R. L. Van Meirhaeghe, F. Cardon, G. P. Ru, X. P. Qu and B. Z. Li, *Solid State Electron.*, 44, (2000), 1807.
- Saxena, A.,N. 1968. Forward current-voltage characteristics of Schottky barriers on *n*-type Silicon. *Surface Science* 13, 151-171
- Schottky, W., 1938. The development of silicon crystal rectifiers for microwave radar receivers, *Z. Phys.* 113, 367-414.
- Sharma B. L., “Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junction and Their Application”, *Plenum Press*, New York,176 (1984).
- Shaw, J. M. and Amick, J. A., 1970. Vapor-deposited tungsten as a metallization and interconnection material for silicon devices. *RCA Rev.* 31, (2), 306.
- Sullivan J. P., Tung R. T., Pinto M..R. And W. R.Graham, 1991. Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers: A numerical study. *J. Appl. Phys.*, 70, (12), 7403-7424.
- Sze, S. M., 1981, *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd Edition, Willey, New York
- Thanailakis A. and Northrop D. C., 1973. Metal-germanium Schottky barriers*Solid-State Electronics*, 16, (12), 1383-1389.
- Thanailakis A. and Northrop D. C., 1973. Metal-germanium Schottky barriers*Solid-State Electronics*, 16, (12), 1383-1389.
- Torrey, H. C., Whitmer, C. A., 1948. *Crystal Rectifiers*, mc Gram Hill.
- Tung R. T., 1991. Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers. *Appl. Phys. Lett.* 58, (24), 2821-2823.
- Tung, R. T., 2001. Recent advances in Schottky barrier concepts, *Materials Science and Engineering R* 35, 1-138).
- Tung, R.,T. 1992. Electron transport at metal and semiconductor interfaces: General theory. *Phys. Rev. B*, 45 (23), 13509-13523.)
- Türüt, A. And Sağlam, M., 1992. Determination of the density of Si-Metal interface states and excess capacitance caused by them. *Physica B*, 179, 285-2.
- Werner, J. H. and Guttler, H.H., 1991. Barrier inhomogeneities at Schottky contacts. *J Appl Phys*;69:1522–1533.

- Wilmsen C .W ., (1995). Physics and Chemistry of III-V Compound Semiconductor Interfaces, Edited by Wilmsen C. W. Plenum Press Newyork.
- Ziel, A., 1968. Solid State Physical Electronics. Prentice-Hall International Inc., Minnesota.

ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında Erzurum’da doğdu. İlk ve ortaöğrenimini Erzurum’da tamamladı. 2005 yılında kazandığı Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünden 2009 yılında mezun oldu. 2010 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Fizik Anabilim Dalı Katıhal Fiziği Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı.