




**T.C.**

**SELÇUK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# ORGANİK ARAYÜZEYLİ GaAs SCHOTTKY DİYODLARIN ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU

**Feza BOY**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Fizik Anabilim Dalını**

**ŞUBAT-2013**

**KONYA**

**Her Hakkı Saklıdır**

# ÖZET

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

## ORGANİK ARAYÜZEYLİ GaAs SCHOTTKY DİYODLARIN ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU

**Feza BOY**

**Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**
**Fizik Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Mehmet ŞAHİN**

**2013, 57 Sayfa**

**Jüri**
**Prof.Dr. Haluk ŞAFAK**
**Doç. Dr. Mehmet ŞAHİN**
**Yrd.Doç.Dr. Ömer Faruk YÜKSEL**

Bu tez çalışmasında organik (perylene-diimide) ara yüzeyli Ag/n-GaAs yarıiletken Schottky diyodun elektriksel karakterizasyonu geniş bir sıcaklık aralığında sistematik bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Numune hazırlama aşamasında öncelikle (100) doğrultusunda büyütülmüş n-GaAs tabakaya, In ohmik kontak yapılmıştır. Daha sonra spin kaplama yöntemiyle, n-GaAs tabkanın diğer yüzeyi perylene-diimide ile kaplanmış ve bunun üzerine Ag doğrultucu Schottky kontakları ısısal buharlaştırma yöntemiyle oluşturulmuştur. İlk olarak, hazırlanan diyotların 75-350 K sıcaklık aralığında akım-gerilim (I-V) ölçümleri gerçekleştirilmiş ve diyod karakteristiği sergiledikleri görülmüştür. I-V karakteristiklerinden idealite faktörü, engel yüksekliği, seri direnç gibi diyota ait bazı parametreler hesaplanmıştır. Bu parametreler, Cheung-Cheung yöntemiyle de hesaplanmış ve her iki yöntemden elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ayrıca perylene ara yüzeyli Schottky diyotun ara yüzey durumlarını belirlemek için oda sıcaklığında 1MHz frekansında sığa-gerilim (C-V) karakteristikleri de incelenmiştir. Bu ölçümlerden, taşıyıcı yoğunluğu, engel yüksekliği gibi diyota ait bazı elektriksel parametreler belirlenmiştir. I-V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği ile C-V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği değerleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Sonuçta her iki yöntem ile belirlenen değerlerin uyum içinde olduğu gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** organik yarıiletkenler, metal-yarıiletken kontaklar, Schottky kontak, elektriksel özellikler, Perylene-diimide.

# ABSTRACT

## MS THESIS

## ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF GaAs SCHOTTKY DIODES WITH ORGANIC INTERFACE

**Feza BOY**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY**
**THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE**
**IN DEPARTMENT OF PHYSICS**

**Advisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet ŞAHİN**

**2013, 57 Pages**

**Jury**
**Prof.Dr. Haluk ŞAFAK**
**Assoc. Prof. Dr. Mehmet ŞAHİN**
**Ass. Prof. Dr. Ömer Faruk YÜKSEL**

In this thesis, electrical characterization of an Ag/n-GaAs semiconductor Schottky diode with organic (perylene-diimide) interface has been systematically carried out over a wide temperature range. In sample fabrication stage, first, the ohmic In contact has been performed on one surface of n-GaAs wafer grown in direction of (100). Later, the other surface of the wafer has been coated with perylene-diimide by spin-coating method and then the Schottky contacts have been constituted on the organic material via thermal evaporation method. The current-voltage (I-V) characteristics of prepared Schottky diodes have been measured at a temperature range of 75-350 K and it has been observed that the diode have a rather good rectification behavior at all temperature. By using the I-V characteristics, the idealite factor, barrier height and some other diode parameters have been calculated for all temperatures. These parameters have also been calculated by means of Cheung-Cheung methods and given as comparatively. Besides, for determine the interface states of Schottky diode with perylene interface, capacitance-voltage (C-V) characteristics have been investigated at room temperature at 1MHz frequency. From these measurements, the concentration of carriers, barrier height and some other diode parameters have been obtained. The barrier heights of diode have been compared with the results obtained by I-V and C-V methods. It has been seen that there is a good agreement with each other.

**Keywords:** organic semiconductors, metal-semiconductor contacts, Schottky contacts, electrical properties, Perylene-diimide.

# ÖNSÖZ

Schottky diyodlar, teknolojik alanda sürekli olarak ihtiyaç duyulan bir aygıt olması nedeniyle, her zaman ilgi çeken ve üzerinde çalışılan bir konu olmuştur. Bu teknolojik öneminden dolayı, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne Yüksek Lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada, Ag/PDI/n-GaAs Schottky diyodun elektriksel karakterizasyonu farklı sıcaklıklarda ayrıntılı bir şekilde yapılmıştır.

Bu tez çalışması sırasında, ilgi ve alakalarından dolayı bana elinden gelen gayreti gösteren ve beni sürekli motive eden danışman hocam Doç. Dr. Mehmet ŞAHİN'e teşekkürü bir borç bilir, minnetlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca numunelerin hazırlanmasında, deneylerin yapılmasında ve sonuçların değerlendirilmesindeki katkılarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Ö. Faruk YÜKSEL'e teşekkürlerimi sunarım. Organik malzeme temininde destek veren Doç. Dr. Mahmut KUŞ'a teşekkür ederim. Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi için imkân sağlayan Selçuk Üniversitesi Fizik Bölümüne ve Bilimsel Araştırma Koordinatörlüğüne teşekkür ederim. Diğer taraftan sığa-gerilim ölçümlerinin değerlendirilmesinde katkılarından dolayı Türkiye Atom Enerjisi Kurumundan Doç. Dr. Nihat TUĞLUOĞLU'na da teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, bu tez çalışması süresince benden manevi desteklerini esirgemeyen ve beni sabırla sürekli destekleyen sevgili eşime ve çocuklarıma şükranlarımı sunarım.

Bu tez çalışması S.Ü. BAP Koordinatörlüğü tarafından 11201013 nolu proje ile desteklenmiştir.

Feza BOY
KONYA 2013

# İÇİNDEKİLER

**ÖZET** ..... **iv**

**ABSTRACT** ..... **v**

**ÖNSÖZ** ..... **vi**

**İÇİNDEKİLER** ..... **vii**

**SİMGELER VE KISALTMALAR** ..... **viii**

**1. GİRİŞ VE KAYNAK ARAŞTIRMASI** ..... **1**

**2. TEORİK BİLGİ** ..... **3**

2.1. Metal - Yarıiletken Kontakların Teorisi ..... 3
2.1.1. n-tipi doğrultucu kontak ..... 4
2.1.2. n-tipi omik kontak ..... 7
2.1.3. p-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar ..... 8
2.1.4. p-tipi yarıiletken omik kontaklar ..... 11
2.2. Metal-Yarıiletken Kontaklarda Akım -İletim Mekanizmaları ..... 12
2.2.1. Termiyonik emisyon teorisi (TE) ..... 13
2.3. Organik Yarıiletkenler ..... 17
2.3.1. Organik yarıiletkenlerin temel özellikleri ..... 18
2.3.2. Organik yarıiletkenlerde akım iletim mekanizması ..... 19
2.3.3. Organik yarıiletken aygıtlar ..... 20

**3. MATERYAL VE YÖNTEM** ..... **21**

3.1. Giriş ..... 21
3.2. GaAs Kristalinin Temizlenmesi ..... 21
3.1.1. Numune yüzeylerini kimyasal olarak temizleme aşamaları ..... 21
3.2. Omik Kontağın Oluşturulması ..... 22
3.3. Organik Filmin Hazırlanması ve Schottky Kontağın Yapılması ..... 24
3.4. Deneylerde Kullanılan Ölçüm Düzenekleri ..... 25

**4. ÖLÇÜM SONUÇLARI VE TARTIŞMA** ..... **28**

4.1. Sıcaklığa Bağlı Akım-Gerilim (I-V) Karakteristikleri ..... 28
4.2. Cheung-Cheung Fonksiyonları Yardımıyla Akım-Gerilim Karakteristikleri ..... 33
4.2. Sığa-Gerilim Karakteristikleri ..... 37

**5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER** ..... **41**

**KAYNAKLAR** ..... **43**

**ÖZGEÇMİŞ** ..... **47**

## SİMGELER VE KISALTMALAR

| Simgeler | Açıklamaları |
|---|---|
| **A** | Alan |
| **Å** | Angström |
| **Al** | Alüminyum |
| **Ag** | Gümüş |
| $\mathbf{A^*}$ | Etkin Richardson sabiti |
| **C** | Sığa |
| $\mathbf{CH_3OH}$ | Metanol |
| $\mathbf{D_n}$ | Elektron difüzyon sabiti |
| $\mathbf{D_p}$ | Deşik difüzyon sabiti |
| $\mathbf{D_s}$ | Arayüzey durum yoğunluğu |
| $\mathbf{E_g}$ | Yarıiletken yasak enerji aralığı |
| $\mathbf{E_c}$ | İletkenlik bant kenarı enerjisi |
| $\mathbf{E_v}$ | Değerlik (valans) bant kenarı enerjisi |
| $\mathbf{E_f}$ | Fermi enerjisi |
| **E(x)** | Schottky bölgesindeki elektrik alan |
| $\mathbf{E_a}$ | Aktivasyon enerjisi |
| $\boldsymbol{\varepsilon_o}$ | Boşluğun dielektrik geçirgenliği |
| $\boldsymbol{\varepsilon_i}$ | Yalıtkan malzemenin diielektrik geçirgenliği |
| $\boldsymbol{\varepsilon_s}$ | Yarıiletken malzemenin dielektrik geçirgenliği |
| **Hz** | Hertz (Frekans birimi) |
| $\mathbf{H_2O}$ | Su |
| $\mathbf{H_2O_2}$ | Hidrojen peroksit |
| $\mathbf{H_2SO_4}$ | Sülfirik asit |
| $\mathbf{HNO_3}$ | Nitrik asit |
| **HCl** | Hidroklorikasit |
| **HF** | Hidroflorik asit |
| **h** | Planck sabiti |
| **ħ** | İndirgenmiş Planck sabiti ($h/2\pi$) |
| **I** | Akım |
| $\mathbf{I_o}$ | Doyma akımı |
| $\mathbf{I_{gr}}$ | Üretim- yeniden birleşme (rekombinasyon) akımı |
| $\mathbf{I_{Ro}}$ | Üretim-yeniden birleşme akımı yoğunluğu |
| $\mathbf{J_{sm}}$ | Yarıiletkenden metale doğru doyma akımı |
| $\mathbf{J_{ms}}$ | Metalden yarıiletkene doğru doyma akımı |
| $\mathbf{J_o}$ | Doyma akım yoğunluğu |
| $\mathbf{J_{Fn}}$ | Doğru beslem altında metalden yarıiletkene geçen elektron akım yoğunluğu |
| $\mathbf{J_{Fp}}$ | Doğru beslem altında metalden yarıiletkene geçen deşik akım yoğunluğu |

| | |
|---|---|
| **K** | Kelvin |
| **k** | Boltzmann sabiti |
| $\mathbf{m_e^*}$ | Elektron etkin kütlesi |
| $\mathbf{m_h^*}$ | Deşik (Hole) etkin kütlesi |
| $\mathbf{m_o}$ | Serbest elektron kütlesi |
| $\mathbf{N_d}$ | Verici (donor) atom yoğunluğu |
| $\mathbf{N_a}$ | Alıcı (akseptör) atom yoğunluğu |
| $\mathbf{N_c}$ | İletkenlik bandındaki etkin durumların yoğunluğu |
| $\mathbf{N_v}$ | Değerlik bandının etkin durumların yoğunluğu |
| $\mathbf{N_{ss}}$ | Yüzey durum yoğunluğu |
| $\mathbf{N_{sb}}$ | Yarıiletken ile dengede olan ara yüzey durumlarının yoğunluğu |
| $\mathbf{N_{sa}}$ | Metal ile dengede olan ara yüzey durumlarının yoğunluğu |
| **n(x)** | Elektron yoğunluğu |
| **p(x)** | Deşik yoğunluğu |
| **n** | İdealite faktörü |
| $\mathbf{n_i}$ | Saf elektron yoğunluğu |
| $\mathbf{Q_m}$ | Metal üzerindeki yük |
| $\mathbf{Q_{ox}}$ | Oksit tabaka yükü |
| **q** | Elektrik yükü |
| $\mathbf{R_s}$ | Seri direnç |
| **Si** | Silisyum |
| **T** | Mutlak sıcaklık |
| **V** | Voltaj |
| $\mathbf{V_d}$ | Difüzyon potansiyeli |
| $\mathbf{V_F}$ | Doğru beslem |
| $\mathbf{V_R}$ | Ters beslem |
| $\mathbf{W_d}$ | Tüketim tabakasının kalınlığı |
| $\upsilon_x$ | Taşıyıcı hızı |
| $\mathbf{\Phi_o}$ | Nötral enerji seviye |
| $\mathbf{\Phi_B}$ | Potansiyel engel yüksekliği |
| $\mathbf{\Phi_{Bo}}$ | Sıfır beslem potansiyel engel yüksekliği |
| $\mathbf{\Phi_s}$ | Yarıiletkenin iş fonksiyonu |
| $\mathbf{\Phi_m}$ | Metalin iş fonksiyonu |
| $\mathbf{\Phi_e}$ | Etkin potansiyel engel yüksekliği |
| **d** | Yalıtkan tabaka kalınlığı |
| $\Omega$ | Ohm |
| $\rho$ | Özdirenç |
| $\chi_s$ | Elektron ilgisi |
| $\psi_s$ | Yüzey potansiyeli |

| | |
|---|---|
| $\pi$ | pi sayısı |
| $\mu_n$ | Elektron mobilitesi |
| $\mu_h$ | Deşik (hole) mobilitesi |
| **Ag/PDI/n-GaAs** | Gümüş/Perylene-diimide/n-tipi GalyumArsenik Schottky diyot |
| **a.c.** | Alternatif akım/gerilim sinyali |
| **d.c.** | Doğru akım/gerilim sinyali |
| **FE** | Alan emisyonu |
| **MIS** | Metal/yalıtkan/yarıiletken |
| **MS** | Metal/yarıiletken |
| **TFE** | Termiyonik alan emisyonu |
| **TE** | Termiyonik emisyon |
| **I-V** | Akım-Gerilim |
| **C-V** | Sığa-Gerilim |

# 1. GİRİŞ VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Elektrik keşfedildikten sonra, katıların iletkenliği hakkında yapılan araştırmalarda bazı katıların elektriği iyi ilettiği, bazılarının kısmen ve bazılarının da hiç iletmediği gözlendi. Genel olarak iletkenliğin tanımlanması, iletim ve valans bantlarındaki taşıyıcı (elektron ve deşik) yoğunluğu ile bu iki bant arasındaki yasak enerji bant aralığına göre yapılır. Buna göre katılar; iletken, yalıtkan ve yarı-iletken olmak üzere üç guruba ayrılır. Eğer valans bandı tamamen dolu değilse ya da iletim ve valans bandı birbirine çok yakın veya üst üste binmiş ise bu tür katılara iletken denir. Valans bandı tamamen dolu ve yasak enerji band aralığı çok geniş olan katılara yalıtkan denir. Taşıyıcı sayısı az, yasak enerji bandı yalıtkan ile iletken arasında bir bölgede ise, bu tür katılara yarı-iletken adı verilir (Kittel, 1996). Yarıiletkenlerin iletkenliği genellikle; sıcaklığa, aydınlanma şiddetine, elektrik alana, manyetik alana ve safsızlık atomlarının yoğunluğu gibi parametrelere bağlı olarak önemli ölçülerde değişir.

Metal-yarıiletken doğrultucu sistemler üzerindeki ilk sistematik araştırma Braun tarafından yapılmıştır. Braun, 1874'de toplam direncin uygulanan gerilim polaritesine ve yüzey durumlarına bağımlı olduğunu kaydetmiştir (Braun, 1874). Değişik biçimlerdeki nokta-kontak doğrultucuların pratik uygulamaları, 1900 yılının başlarında yapılmıştır (Bose, 1904). 1931 yılında Wilson, katıların band teorisine dayalı olarak yarıiletkenlerin akım iletim teorisini formüle etti (Wilson, 1931). Bu teori, daha sonra, metal-yarıiletken kontaklara uygulandı. 1938'de Schottky, metal yarıiletken yapıdaki potansiyel engelin, kimyasal bir tabaka olmayıp, sadece yarıiletken içerisindeki kararlı uzay yüklerinden kaynaklandığını ileri sürdü (Schottky, 1938). Bu düşünceden doğan model Schottky engeli olarak bilinir. 1938'de Mott, Mott engeli olarak bilinen, yarıiletken kontaklar için teorik bir model geliştirdi (Mott, 1966). 1957 yılında Henisch tarafından, doğrultucu metal-yarıiletken kontakların temel teorisi ve tarihi gelişimi, "Doğrultucu Yarıiletken Kontaklar" adlı bir kitapta toplandı (Henisch, 1984).

Doğru akım ve mikrodalga uygulamalarındaki öneminden ve diğer temel fiziksel parametrelerin analizinde araç olarak kullanılmasından dolayı, metal yarıiletken kontaklar üzerinde yoğun şekilde çalışma yapılmıştır. Yapılan son çalışmalarda, modern transistor teknolojisi ve düzeltilmiş vakum teknolojisi yardımı ile ideale yakın metal-yarıiletken kontaklar üretilmiştir.

Son zamanlarda birçok araştırmacı Schottky kontağın elektriksel özelliklerini modifiye etmek için ara yüzey malzemesi olarak organik yarıiletken malzeme kullanımı

üzerine çalışmalar yapmaktadır (Yakuphanoğlu ve ark., 2010; Aydoğan ve ark., 2010; Okur ve ark., 2009; Gupta ve ark., 2005, Aydın ve ark., 2011; Yahia ve ark., 2011; Yüksel ve ark., 2011). Araştırmacıları organik yarıiletken üzerine çalışmaya yönelten birçok sebep vardır. Bunlar; organik yarıiletkenlerin spin kaplama ve baskı gibi ucuz ve tek seferde oldukça fazla üretim yapılabilen kaplama teknikleriyle ucuz maliyetle üretilebilmeleri, bükülebilir olmaları ve yüksek nonlineerlik gibi daha birçok özelliğe sahip olmaları şeklinde sıralanabilir (Güllü ve ark., 2010). Bu özellikleri sayesinde elektronik ve optoelektronik alanında organik ışık yayan diyot (Organic Light Emitting Diode-OLED), organik Schottky engel diyotları, organik alan etkili transistörler (Organic Field Effect Transistor-OFET), fotovoltaik güneş pilleri ve spintronik gibi teknolojik uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır (Yahia ve ark. 2011).

Yarıiletken güneş pillerinin belirli bir sınıfını metal-yarıiletken kontaklı piller oluşturmaktadır. Bu güneş pillerini daha da geliştirebilmek için benzer temel yapı olan metal-yarıiletken diyotların akım iletim ve kapasitif özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir.

GaAs, III-V grubu yarıiletkeni olup, diyod, transistor ve güneş pilleri gibi yarıiletken aygıtların yapımında önemli bir malzeme olarak göze çarpmaktadır (Wang, 2004). Özellikle GaAs tabanlı olarak yapılan aygıtların yüksek hızlı, düşük güç tüketimli aygıtlar olduğu tespit edilmiştir (Ambica, 2005). Dolayısıyla farklı GaAs metal-yarıiletken yapılar üzerinde yoğun çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalar genellikle Au/GaAs yapısı üzerinde yoğunlaşmıştır (Karataş, 2005).

Bu tez çalışmasında Ag/perylenediimide/n-GaAs (Ag/PDI/n-GaAs) organik arayüzeyli Schottky diyodunun Akım-Gerilim (I-V) ve Sığa-Gerilim (C-V) ölçümleri, geniş bir sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sonucu elde edilen veriler kullanılarak bu yapıya ait idealite faktörü, engel yüksekliği, kontak direnci, doyma akımı gibi çeşitli diyot parametreleri belirlenmiştir. Sonuçlar sıcaklığın fonksiyonu olarak verilmiş ve olan fiziksel etkileri tartışılmıştır.

Bu tez beş bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde organik yarıiletkenlerin tarihsel gelişimi ve literatür özeti verilmiştir. İkinci bölümde Schottky diyotların özellikleri ve organik yarıiletkenlerin genel özellikleri anlatılmıştır. Üçüncü bölümde kullanılan malzemenin temizlenme ve üretim aşamaları belirtilmiştir. Ayrıca numuneler üzerinde yapılan ölçümler de bu bölümde anlatılmıştır. Sonuçlar ve tartışma başlığı ile verilen dördüncü bölümde, ölçümlerden alınan veriler değerlendirilmiştir. Son bölümde, genel bir değerlendirme yapılmış ve önerilerde bulunulmuştur.

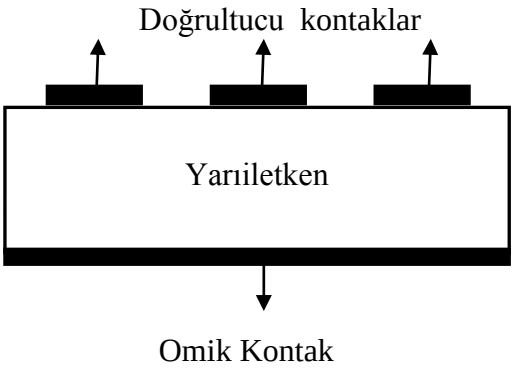
# 2. TEORİK BİLGİ

## 2.1. Metal - Yarıiletken Kontakların Teorisi

Schottky diyotların karakteristik özelliklerinin anlaşılabilmesi için yalıtkan ve yarıiletken kristallerin iletkenlik özellikleri bilinmelidir. Bunun için kristale uygun kontaklar yapılmalıdır. Yarıiletken kristal ile kontak yapılacak malzeme, mümkün olduğunca çok küçük bir dirençle atomik boyutta temas etmelidir. Kontak, genel anlamıyla iki maddenin birbiriyle temas etmesidir. İdeal kontak oluşturmak için, kontak olarak kullanılan malzemelerin yüzeylerinin yeteri kadar temiz ve pürüzsüz olması gerekir. Metal ve yarıiletken kontak yapıldığında, termodinamik denge kuruluncaya kadar, yani her iki maddenin Fermi enerji seviyeleri eşit oluncaya kadar, hem metalden yarıiletkene hem de yarıiletkenden metale doğru yük alışverişi olur. Dolayısıyla, metal-yarıiletken ara yüzeyinde yüklerin ayrışmasıyla bir potansiyel engel yüksekliği ($\Phi_B$) oluşur. Bu bölgeye, hareketli yükler olmadığından, yüksek dirençli bir yalıtkan tabaka denir. Aynı zamanda bu bölgeye, bu konuda ilk çalışan bilim adamına atfen Schottky tabakası da denir. Schottky-Mott modeline göre potansiyel engel, iki maddenin iş fonksiyonları arasındaki farktan kaynaklanmaktadır.

Metalin iş fonksiyonu ($\Phi_m$) ve yarıiletkenin iş fonksiyonu ($\Phi_S$) olmak üzere, bir elektronu Fermi seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan minimum enerji olarak tanımlanır. Fermi seviyesi, katkılanan alıcı veya verici atomların miktarına göre değiştiği için değişken bir yapıya sahip niceliktir. Diğer taraftan, yarıiletkenlerde katkı miktarına bağlı olmayan ve $\chi_S$ ile gösterilen elektron ilgisi önemli bir parametredir. $\chi_S$, iletkenlik bandının en üst sınırından, bir elektronu vakum seviyesine çıkarmak için gerekli enerji miktarıdır.

Metal-yarıiletken kontaklar, doğrultucu ve omik olmak üzere ikiye ayrılırlar. Akım taşıyıcılarını (elektron ve deşik) bir doğrultudan diğerine göre daha kolay geçiren kontaklara doğrultucu kontak denir. Metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları kontağın omik kontak veya doğrultucu kontak olmasını belirler. Metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda $\Phi_m > \Phi_S$ olması durumunda doğrultucu kontak ve $\Phi_m < \Phi_S$ olması durumunda ise omik kontak oluşur. Metal/p-tipi yarıiletken kontaklarda ise $\Phi_m > \Phi_S$ olması halinde omik kontak ve $\Phi_m < \Phi_S$ olması durumunda ise doğrultucu kontak oluşur. Şekil 2.1 de, bir metal/yarıiletken kontak şematik olarak gösterilmiştir (Li, 2006).



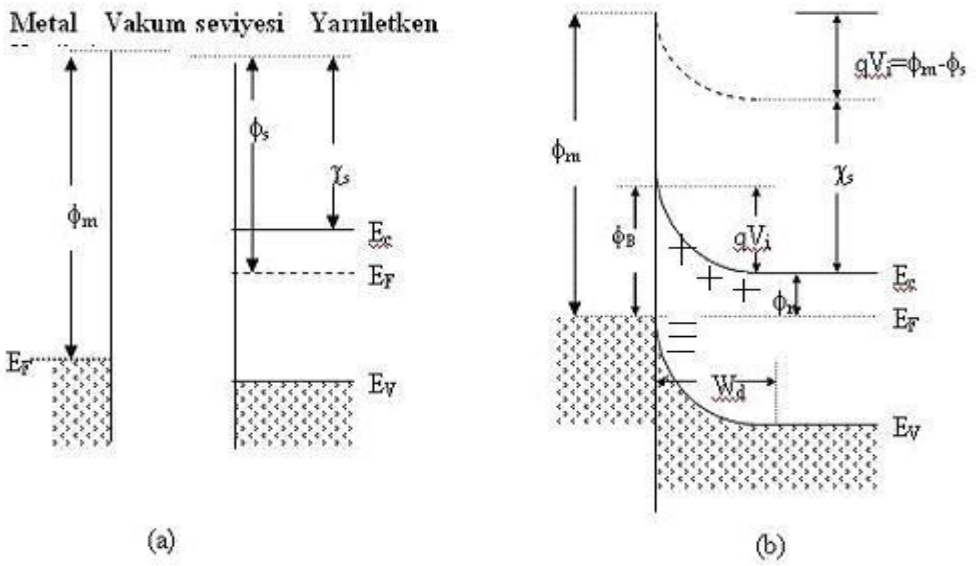

**Şekil 2.1.** Bir Schottky kontağın şematik görünümü

| | | |
|---|---|---|
| n-tipi | $\Phi m > \Phi s$ | doğrultucu kontak |
| | $\Phi m < \Phi s$ | omik kontak |
| p-tipi | $\Phi m < \Phi s$ | doğrultucu kontak |
| | $\Phi m > \Phi s$ | omik kontak |

### 2.1.1. n-tipi doğrultucu kontak

n-tipi yarıiletkenin ve metalin iş fonksiyonuna bağlı olarak $\Phi_m > \Phi_s$ ise, metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak oluşur. Kontak oluşturulmadan önce, metal ve n-tipi yarıiletken malzemenin enerji bant diyagramı Şekil 2.2.a'da görülmektedir. Şekil 2.2.a, yarıiletken yüzey durumlarını içermez, bunun sonucu olarak yüzeyin band yapısı, yarıiletkenin gövde (bulk) band yapısı ile aynı olup bandlarda bir eğilme yoktur. Şekil 2.2.b'de kontak oluşturulup termodinamik dengeye ulaşıldıktan sonraki enerji band diyagramı görülmektedir. Burada, metal ve yarıiletken arasında yük alışverişi olduğu için bandlarda bir bükülme söz konusudur.

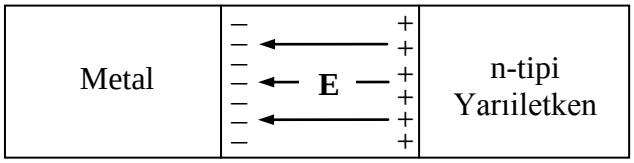
Metal, yarıiletkenle kontak yapıldığında, metaldeki elektronlardan daha yüksek enerjiye sahip olan yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar, yarıiletkenin Fermi seviyesiyle metalin Fermi seviyesi eşit olana kadar metale doğru akarlar (Shroder, 2006). Yarıiletkendeki elektronlar metale gittiği için, yarıiletkenin sınıra yakın bölgesinde serbest elektron konsantrasyonu azalır. İletkenlik band kenarı $E_c$ ile Fermi seviyesi $E_F$ arasındaki fark, azalan elektron konsantrasyonu ile arttığı ve termal dengede $E_F$ tamamen serbest kaldığı için iletkenlik ve valans band kenarı Şekil 2.2.b'deki gibi eğilir. Metale geçen iletkenlik band elektronları, arkalarında pozitif yüklü verici (donor) iyonları bırakırlar, böylece yarıiletkenin metale yakın kısmında




**Şekil 2.2.** Metal/*n*-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için ($\Phi_m>\Phi_S$) elektron enerji-band diyagramı. (a) Birbirinden ayrılmış nötral malzemeler (b) kontak oluşturulduktan sonra termal denge durumu (Sze, 1981).

hareketli yükler tüketilir. Ara yüzeyin yarıiletken tarafında pozitif yükler oluşur ve metale gelen elektronlar, ince bir negatif yük tabakası oluştururlar. Bu tabaka ara yüzeyden Thomas-Fermi film mesafesi (≅0,5Å) kadar uzakta bir uzunluğun içinde kalır. Sonuçta metal tarafındaki yüzey yükleri ile n-tipi yarıiletken tarafındaki uzay yüklerinin oluşturduğu dipol tabakası, kontakta bir potansiyel engelinin oluşmasına yani yarıiletken tarafında bantların yukarı doğru bükülmesine neden olur. Bu durumda Şekil 2.3'de görüldüğü gibi yarıiletkenden metale doğru bir elektrik alan oluşur.

Yarıiletkenin yasak enerji aralığı kontak sebebiyle değişmediği için valans bant kenarı $E_V$, iletkenlik band kenarı $E_C$'ye paralel olarak kayacaktır. Yarıiletkenin vakum seviyesi de aynı şekildeki değişecektir. Bunun sebebi, yarıiletkenin elektron yakınlığının kontak ile değişmemesidir. Böylece termal dengedeki metal-yarıiletken sistemde, engel yüksekliğini belirlemek için önemli bir nokta olan geçiş bölgesinde vakum seviyesinin sürekliliği sağlanmış olur. Metal-yarıiletken arayüzeyinde oluşan bu engelin yüksekliği




**Şekil 2.3.** Metal ve yarıiletken kontağın termal denge durumu

$$\Phi_B = (\Phi_m - \chi_S) \quad (2.1)$$

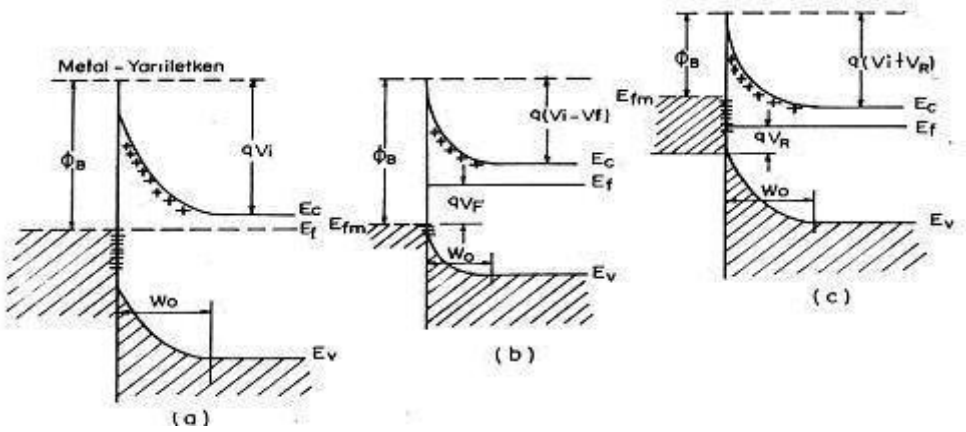
ile verilir (Wilson, 1931). $\Phi_S = \chi_S + \Phi_n$ ve $\Phi_m = qVi + \Phi_S$ olduğu için ,

$$\Phi_B = (qV_i + \Phi_n) \quad (2.2)$$

elde edilir. Burada $\Phi_n = (E_c - E_F)$ olup, $q$ elektronik yüktür. Denk.(2.1), birbirlerinden bağımsız olarak Schottky ve Mott tarafından ifade edilmiştir. Potansiyel engeli, uzay yük bölgesindeki yük dağılımından hesaplanabilir. Pek çok durumda engelin $\phi_B$ yüksekliği, termal enerji *kT/q*'dan çok büyüktür. Yarıiletkenin uzay yükü bölgesi hareketli yüklerden yoksundur ve bunun sonucunda yüksek dirençli yalıtkan bir tüketim bölgesi oluşmaya başlar. Bu sabit uzay yükleri için elektrik alanın büyüklüğü, uzay yük tabakası kenarından olan uzaklıkla lineer olarak artar. Bunun sonucu olarak engel yüksekliği parabolik olur (Henisch, 1984). Mott, yarıiletken içinde yüklerin bulunmadığı ince bir bölge olduğunu kabul eder. Bu ince bölgede elektrik alanın büyüklüğü sabittir ve potansiyel, bu bölge boyunca lineer olarak artar. Bu Mott engeli olarak bilinir (Mott, 1966). Mott engeli, yüksek yoğunlukta katkılanmış yarıiletken ile metal arasına, az katkılanmış ya da katkılanmamış saf bir yarıiletken konulduğu zaman kullanılır.

Şekil 2.4.a'da termal denge durumunda doğrultucu kontağın enerji band diyagramı görülmektedir. Termal denge durumunda, yarıiletkenden metale geçen elektronlarla metalden yarıiletkene geçen elektronlar dengelenir ve net bir akım oluşmaz. Yarıiletkenin tüketim tabakası çok az hareketli taşıyıcı içerdiği için, bu bölgenin direnci metalin ve yarıiletkenin nötr kısmının direnci ile kıyaslandığında çok yüksektir. Bu yüzden dışarından uygulanan voltajın tamamı bu bölgeye düşer. Dışarıdan uygulanan bu voltaj termal dengedeki band diyagramını değişikliğe uğratır. Bu değişimin sebebi, tüketim bölgesine düşen potansiyelin değişmesi ve band bükülmelerindeki değişikliklerden dolayı oluşur.

Metal tarafı pozitif, yarıiletken tarafı negatif olacak şekilde $V=V_F$ voltajı uygulandığında, tüketim bölgesinin genişliği azalır. Şekil 2.4.b'de gösterildiği gibi bu bölgedeki voltaj, $qV_i$'den $q(V_i-V_F)$'ye azalır. Bu durumda yarıiletkendeki elektronların önündeki engel yüksekliği azalmış olacaktır, Bunun sonucu olarak da yarıiletkenden metale doğru elektron akımı termal denge değerine göre artacaktır. Metalden yarıiletkene elektron akımı termal denge değerine göre değişmez.




Şekil 2.4. Metal/*n*-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için elektron enerji Band diyagramı. (a) Termal denge durumu; (b) doğru beslem; ve (c) ters beslem (Sze, 1981).

Metal tarafı negatif, yarıiletken tarafı pozitif olacak şekilde $V=V_R$ voltajı uygulandığında, tüketim bölgesinin genişliği artar. Şekil 2.4.c'de gösterildiği gibi bu bölgedeki voltaj, $qV_i$'den $q(V_i+V_R)$'ye artar. Bu durumda yarıiletkendeki elektronların önündeki engel yüksekliği artmış olacaktır. Bunun sonucu olarak da yarıiletkenden metale doğru elektron akımı termal denge değerine göre iyice azalacaktır ve herhangi bir akım geçişi gözlenmeyecektir (Balkanski ve Wallis, 2000).

### 2.1.2. n-tipi omik kontak

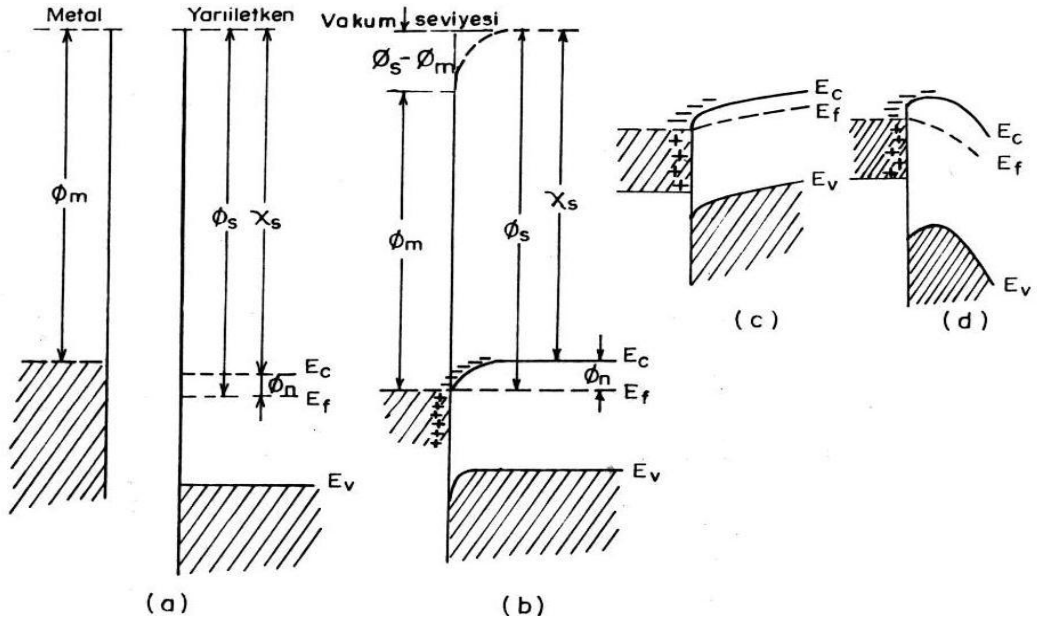
*n*–tipi yarıiletken iş fonksiyonu $\Phi_s$ metalin iş fonksiyonu $\Phi_m$'den büyük ise ($\Phi_m < \Phi_S$) omik kontak oluşur. $\Phi_m < \Phi_S$ olan *n*–tipi yarıiletken ile oluşturulan omik kontağın enerji band diyagramı Şekil 2.5'de gösterilmektedir. Malzemeler ayrı durumda iken enerji band diyagramı Şekil 2.5.a'da görüldüğü gibidir.

Metal/n-tipi yarıiletken omik kontak oluşturulduktan sonra elektronlar metalden yarıiletkenin içine, geride pozitif bir yüzey yükü bırakarak akarlar ve kontağın yarıiletken tarafında bir negatif yüzey yüküne sebep olurlar (Neaman, 2003). Termal dengeye ulaşıldığında yarıiletkenin Fermi seviyesi Şekil 2.5.b'de gösterildiği gibi $\Phi_S$ -$\Phi_m$ kadar yükselir. Yarıiletkende negatif yüklerin yığılması ile oluşan tabaka, Debye mesafesi kadar bir kalınlık içinde sınırlanır ve bunlar yüzey yükleridir. Metal içindeki elektronların konsantrasyonu çok fazla olduğu için metal tarafındaki pozitif yükler, metal-yarıiletken arayüzeyinden yaklaşık 0,5Å bir uzaklık içinde sınırlanmış olan yüzey yükleridir. Yarıiletken içinde oluşan bir tüketim bölgesi yoktur ve yarıiletkenden metale ya da tersi yönde elektronların akması için bir potansiyel engeli yoktur. Arayüzey yakınındaki

bölgede elektron konsantrasyonu artırılır ve sistemin en yüksek dirençli bölgesi, yarıiletken bölgesinde oluşur. Şekil 2.5.c ve 2.5.d'de, doğru ve ters beslem altında yarıiletken bölgesi görülmektedir. Akımın, bu bölgenin direnci ile belirleneceği açıktır ve uygulanan voltajın yönünden bağımsızdır. Böyle doğrultucu olmayan kontaklar, omik kontak olarak isimlendirilir ve akımı iki yönlü iletir (Henisch, 1984).

Yarıiletkene pozitif ve metale negatif bir voltaj uygulandığında, metaldeki elektronlar yarıiletken tarafına kolay bir şekilde geçerler ve bundan dolayı omik kontaklara enjeksiyon kontakları da denir (Sze, 1981).

Pratikte omik kontak elde edilebilmek için n-tipi yarıiletken yüzeyine buharlaştırılan metal, yarıiletkenle alaşım haline getirilir. Böylece yarıiletkenin yüzeyinde bir $n^+$ tabakası oluşur. Bu tabaka yarıiletken gövdeye göre elektron bakımından çok daha zengindir.




**Şekil 2.5.** $\Phi_m < \Phi_S$ için metal/*n*-tipi yarıiletken omik kontağın elektron enerji band diyagramı. (a) Birbirinden ayrı nötral materyaller; (b) termal dengede kontak; (c) yarıiletken negatif beslemde ve (d) yarıiletken pozitif belsemde (Sze, 1981).

### 2.1.3. p-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar

Metal ve p-tipi yarıiletken malzemenin iş fonksiyonuna bağlı olarak $\Phi_m < \Phi_S$ ise bu kontak doğrultucu olacaktır. Şekil 2.6'da, p-tipi bir yarıiletken için doğrultucu kontak enerji-band diyagramı gösterilmektedir. Uzay yük bölgesindeki deşiklerin yoğunluğu, akseptör konsantrasyonu ile kıyaslandığında ihmal edilebilecek kadar azdır. Böylece

kontağın yarıiletken tarafında, uzay yük bölgesi, iyonize akseptör atomlarının konsantrasyonuna bağlı olarak $W_o$ genişlikli bir tüketim tabakası içerir. Bu durum Şekil 2.6.b'dekine benzer şekilde, sadece iyonize donorların rolünü, iyonize akseptörler üstlenmiştir. p-tipi yarıiletkende akım, deşikler tarafından taşındığı için Şekil 2.6.b'de deşikler için bir engel yüksekliği aramalıyız.

Oda sıcaklığında metalin iş fonksiyonu, yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçük ise ($\Phi_m < \Phi_S$), kontak yapılmadan önce, Şekil 2.6.a'da görüldüğü gibi yarıiletkenin Fermi seviyesi, metalin Fermi seviyesinin altındadır. Bu durumda, Fermi seviyeleri arasındaki fark, $\Phi_S - \Phi_m$ kadar olur (Rhoderick, 1988). Metal ile yarıiletken arasında kontak yapıldıktan sonra, metal ve yarıiletkenin Fermi enerji seviyeleri aynı hizaya gelinceye kadar metaldeki fazla elektronlar, yarıiletkene doğru akarlar. Böylece elektron akışından dolayı yarıiletken tarafındaki deşikler iyonize olurlar.

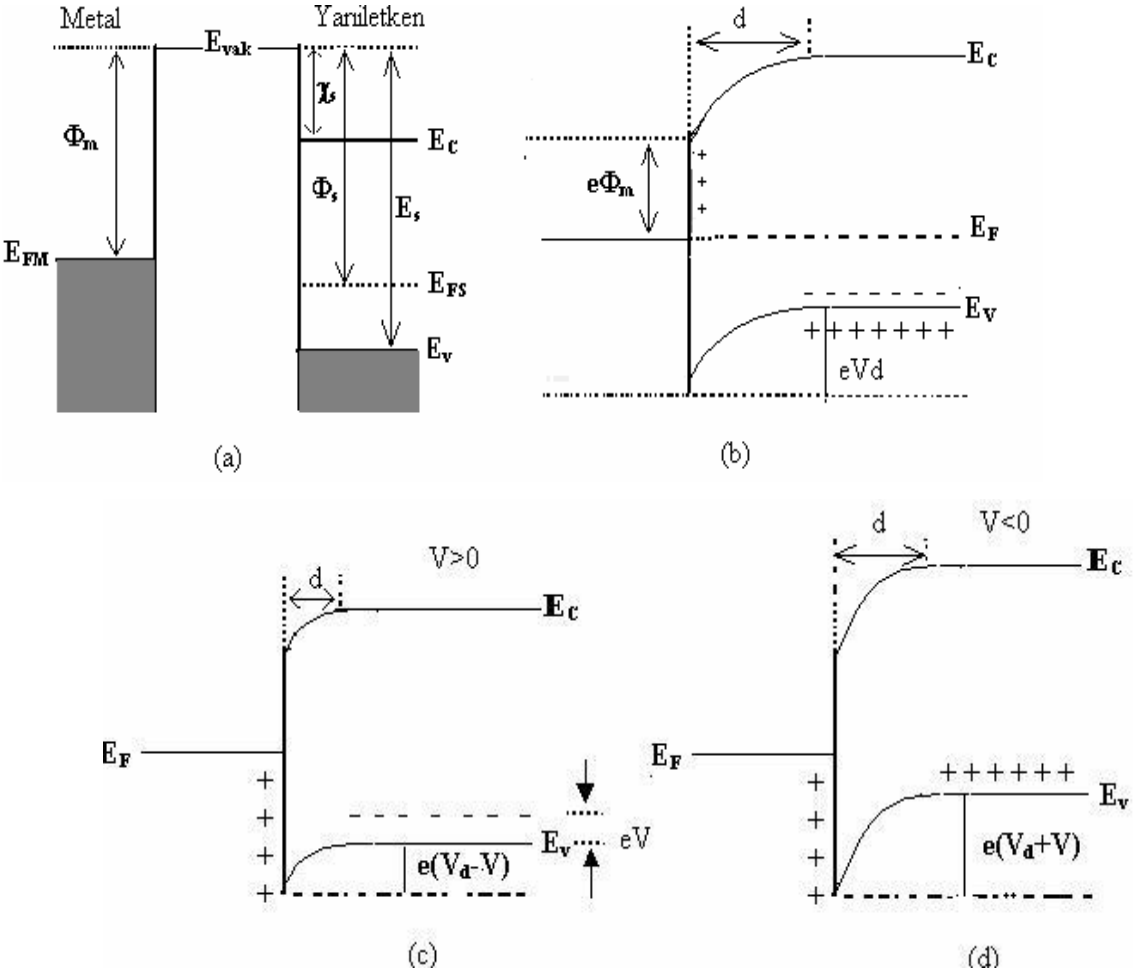
Yarıiletkenin yüzey tabakasındaki negatif yüklü iyonize olmuş alıcılar (akseptör), *d* kalınlığındaki bir uzay yük tabakası içerisinde dağılırlar. Kontaktan sonra yarıiletkenin enerji seviyeleri $\Phi_S - \Phi_m$ kadar yükseldiğinden, yarıiletken tarafındaki deşikler için görülen engel yüksekliği,

$$eV_d = \Phi_S - \Phi_m \qquad (2.3)$$

olacaktır. Burada $V_d$ kontak potansiyel farkı veya eklemi oluşturan potansiyel olarak bilinir. Yarıiletken içerisindeki bu potansiyel, metalin yüzeyine göre alınır (Neamen, 2003). Metal-yarıiletken kontağın metal tarafındaki deşikler için görülen engel yüksekliği ise,

$$e\,\Phi_B = E_S - \Phi_m \qquad (2.4)$$

olur. Termal uyarılmadan dolayı, yarıiletken ve metal tarafındaki bazı deşikler potansiyel engelini aşacak kadar enerji kazanıp yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene geçebilirler. Bu durum sonucunda termal denge oluştuğunda, metalden yarıiletkene ve yarıiletkenden metale olan akımlar eşit olur. Dengeyi bozmak için yarıiletkene pozitif V gerilimi uygulanırsa (Şekil 2.2.c), yarıiletkenden metale oluşan deşik akımında $exp(eV/kT)$ çarpanı kadar bir değişme olurken, metalden yarıiletkene olan deşik akımında bir değişiklik olamaz.




**Şekil 2.6.** Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontağın enerji-band diyagramı. a)Kontaktan önce, b) Kontaktan sonra ve termal dengede, c) V≠0 olması (pozitif gerilim), d) V≠0 durumunda (negatif gerilim) (Sze, 1981).

Bu değişimden dolayı yarıiletkendeki bütün enerji seviyeleri, $eV$ kadar düşer ve yarıiletkenden metale geçen deşikler için potansiyel engel yüksekliği $eV$ kadar azalır. Yarıiletkenden metale akan deşiklerden dolayı oluşan akım pozitif olarak alınırsa, metal yarıiletken kontak için akım,

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

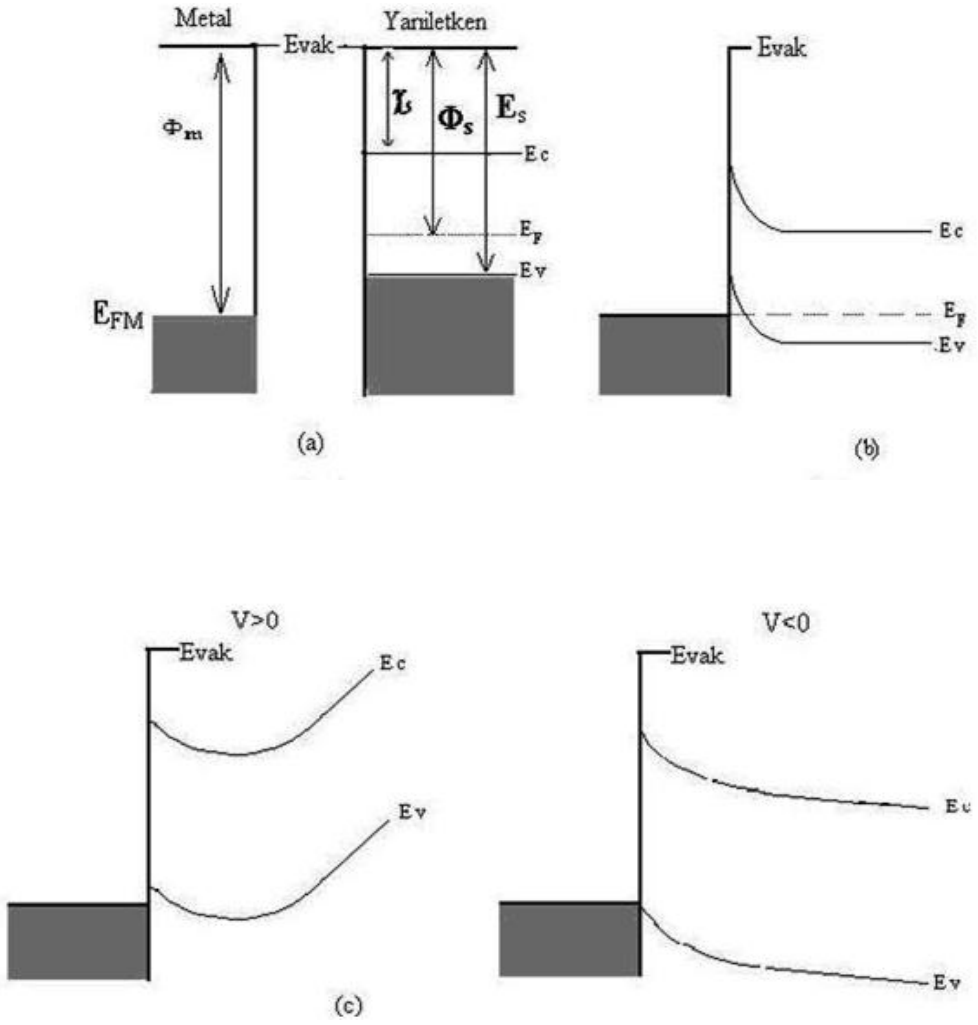
olur ve bu kontak doğrultucu bir kontaktır (Sze, 1981). Burada V>3kT/q olması durumunda yukarıdaki denklem,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right)\right] \tag{2.5}$$

şeklinde yazılabilir.

### 2.1.4. p-tipi yarıiletken omik kontaklar

Metalin iş fonksiyonunun yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyük olduğu ($\Phi_m > \Phi_S$) durumunu ele alalım. Bu durum, Şekil 2.7.a da görüldüğü gibi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi, metalin Fermi enerji seviyesinden $\Phi_m - \Phi_S$ farkı kadar yukarıdadır. Yarıiletken içindeki elektronlar, yarıiletkenden ayrılarak arkalarında pozitif yükler bırakarak metal tarafına geçerler ve böylece metalin ön yüzeyinde negatif yükler oluşur. Ohm kanununa uyan ve her iki doğrultuda akım geçirebilen kontaklar, omik kontak diye adlandırılırlar. Dolayısıyla kontak direnci mümkün olduğu kadar düşüktür ve ancak birkaç mili ohm mertebesindedir. Uygun bir omik kontak için aygıtın performansı çok önemli değildir, düşük bir voltaj uygulanması ile akım geçirilebilir (Milnes ve Feucht, 1972).




**Şekil 2.7.** Metal/p-tipi yarıiletken ohmik kontağın enerji-bant diyagramı. a) Kontaktan önce b) Kontaktan sonra ve termal dengede, c) V≠0 olması durumunda (Sze, 1981).

Yarıiletken tarafında azalan elektron konsantrasyonundan dolayı yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi Şekil 2.7.b'de görüldüğü gibi $\Phi_m - \Phi_S$ kadar aşağı düşer. Yarıiletkende deşik yoğunluğunun artmasından dolayı da, yarıiletken ön yüzeyi daha fazla p-tipi olur. Metaldeki elektronlar, yarıiletkenin içindeki izinli durumlara kolayca geçebilirler. Bu yük hareketi deşiklerin yarıiletkenden metale doğru akışına karşılık gelir. Metal tarafına geçen deşikler (yüksek elektron konsantrasyonundan dolayı) nötralize olurlar. Ters beslem altında, metalin iletkenlik bandından termal olarak oluşan deşikler de kolayca yarıiletken tarafına geçebilirler. Böylece hem metalden yarıiletkene hem de yarıiletkenden metale doğru kolayca akım geçebildiğinden bu tür kontaklar, omik kontaklar olarak bilinir (Sze, 1981). Şekil 2.7.c ise metal-yarıiletken omik kontağın doğru ($V>0$) ve ters beslemdeki ($V<0$) enerji bant diyagramlarını göstermektedir.

## 2.2. Metal-Yarıiletken Kontaklarda Akım -İletim Mekanizmaları

Metal-yarıiletken kontakların dış gerilim altında akım-iletim mekanizmalarının tayini önemlidir. Kontakta arayüzey durumları, seri direnç, metal ile yarıiletken arasındaki oksit tabaka, gerilimin yönü, sıcaklık, yarıiletkenin tipi gibi faktörlerin Schottky diyotlardaki etkisini dikkate alarak, hangi durumda, hangi iletim mekanizmasının oluştuğunu belirlemek, sonuçların doğruluğu açısından önemlidir. MS ve MIS yapılı kontaklarda başlıca akım-iletim mekanizmaları (Henisch, 1984; Ambica, 2005)

-Termiyonik Emisyon Teorisi (TE)

-Difüzyon Teorisi

-Termiyonik Emisyon-Difüzyon Teorisi (TED)

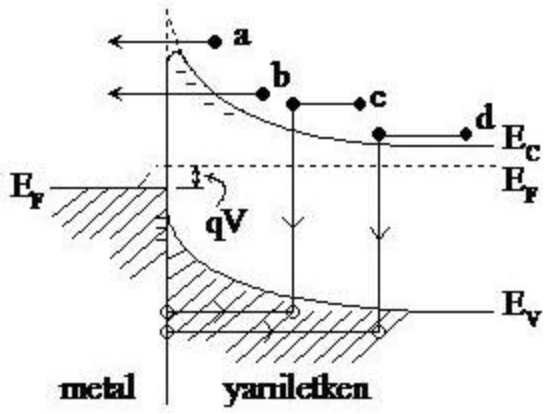
- Kuantum Mekaniksel Tünelleme Termiyonik Alan Emisyonu (TAE)

- Alan Emisyonu (AE), Çok katlı tünelleme

-Uzay yük bölgesinde yeniden birleşme

-Yüksüz bölgede yeniden birleşme

-Deşik enjeksiyonu




**Şekil 2.8.** Metal/yarıiletken (MS) kontaklarda doğru beslem altındaki akım iletim mekanizmaları (Sze, 1981).

Şekil 2.8'de doğru beslem altında metal/n-tipi yarıiletkende termal iletim mekanizması gösterilmiştir. Burada, (a) potansiyel engelin tepesini aşan elektronların iletimi, (b) elektronların kuantum mekaniksel tünellemesi, (c) Uzay yük bölgesinde yeniden birleşme (yüksek katkılı yarıiletkenler ile çoğu omik kontaklar için uygundur), (d) doğal bölgede deşik enjeksiyonunu ifade eder (Kutluca, 2007).

### 2.2.1. Termiyonik emisyon teorisi (TE)

Termoiyonik emisyon sıcak bir yüzeyden taşıyıcıların (elektronlar-deşikler) yayınlanması anlamına gelir. Bu olay metal-yarıiletken doğrultucu kontaklarda, yeterince (engeli aşmaya yetecek kadar) termal enerji kazanan taşıyıcıların, potansiyel engel üzerinden, metalden yarıiletkene veya yarıiletkenden metale geçmeleri olarak bilinir (Crowell ve Sze, 1966). Metal/n-tipi yarıiletken yapılarda bu mekanizma elektronlar, metal/p-tipi yarıiletken yapılarda ise bu mekanizma deşikler tarafından sağlanır (Bengi ve ark, 2007; Ziel, 1968). Metal tarafı uygulanan voltajdan bağımsızdır. Bundan dolayı termal enerjileri nedeniyle metal tarafındaki engeli aşan elektronların oluşturduğu bu akım yoğunluğu, $J_o$ termiyonik akım yoğunluğudur. Beethe'nin MS kontaklarda akımın, çoğunluk taşıyıcılar tarafından iletildiğini kabul ederek kurduğu Termiyonik Emisyon Teorisinin varsayımları şunlardır (Sharma, 1984; Sze, 1981; Schroder, D. K., 2006).

- Potansiyel engelinin yüksekliği, kT/q enerjisinden çok büyüktür
- Schottky bölgesinde taşıyıcı çarpışmaları olmamaktadır. Yani taşıyıcıların ortalama serbest yolları Schottky bölgesinin kalınlığından daha fazladır.

-Görüntü (hayali) kuvvetlerin etkisi ihmal edilmekte, engelin biçimi önemsiz olup akım engel yüksekliğine zayıfça bağlıdır.

Kontak yüzeyini x-yönüne dik olarak alırsak, kontak yüzeyine dik doğrultuda elektronların x yönündeki hız bileşeni $\upsilon_x$ olacaktır. Dolayısıyla yarıiletken gövdede hızları $\upsilon_x$ ile $\upsilon_x + \Delta\upsilon_x$ arasında olan elektronların yoğunluğu,

$$dn_x = N_d \left(\frac{m_n^*}{2\pi kT}\right)^{\frac{1}{2}} exp\left(-\frac{m_n^* v^2}{2\pi kT}\right)^{\frac{1}{2}} d\upsilon_x \tag{2.6}$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada $N_d$ verici atomların yoğunluğu, $m_n^*$ elektronun etkin kütlesi, k Boltzman sabiti ve T ise Kelvin cinsinden sıcaklıktır. Eğer yarıiletkene bir gerilim uygulandığı zaman elektronların yarıiletkenden metale doğru olan akım yoğunluğu, hızları $\frac{1}{2}m_n^* v_x^2 > qV_d$ şartını sağlayan elektronların birim zamanda birim yüzeyden geçen sayısının e ile çarpımı;

$$j_{S\to M} = \int_{v_{ox}}^{\infty} qV_x\, dn_x = \int_{v_{ox}}^{\infty} qN_d \left(\frac{m_n^*}{2\pi kT}\right)^{1/2} \upsilon_x exp\left(-\frac{m_n^* v_x^2}{2kT}\right) dv_x$$

$$= qN_d \left(\frac{kT}{2\pi m_n^*}\right)^{1/2} exp\left(-\frac{m_n^* v_x^2}{2kT}\right) = qN_d \left(\frac{kT}{2\pi m_n^*}\right)^{1/2} exp\left(-\frac{qV_d}{2kT}\right) \tag{2.7}$$

şeklinde ifade edilir. Burada $v_x = \left(\frac{2qV_d}{m_n^*}\right)^{1/2}$ olup taşıyıcının, $qV_d$ yüksekliğindeki potansiyel engelini aşması için sahip olması gereken minimum hızdır. Eğer iletkenlik bandının alt kenarı sıfır enerji seviyesi olarak referans alınırsa, verici katkı atomların birim hacimdeki yoğunluğu;

$$N_C = \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} exp\left(-\frac{E_f}{kT}\right) \quad \text{ve} \quad N_V = \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} exp\left(\frac{E_f}{kT}\right) \tag{2.8}$$

eşitliği ile verilir (Shuer, 1990). Bu ifade, Denk. (2.4)'de yerine konulur ve gerekli düzenlemeler yapılırsa,

$$J_{S\to M} = \left(\frac{4\pi q m_n^* k^2 T^2}{h^3} \exp\left(-\frac{qV_d + E_f}{kT}\right)\right) \tag{2.9}$$

ifadesi elde edilir. Metal tarafında yarıiletkenin iletkenlik bandının kenarına göre

görülen potansiyel engel yüksekliği;

$$q\Phi_B = qV_d + E_f \tag{2.10}$$

$$A^* = \frac{4\pi q m_n^* k^2}{h^3} \tag{2.11}$$

ifadesi elektronlar için etkin Richardson sabiti olmak üzere, yarıiletkenden metale olan akım yoğunluğu ifadesi için

$$J_{S\to M} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \tag{2.12}$$

eşitliği elde edilir. Metal/n-tipi yarıiletken Schottky kontağı doğru beslemde iken engel yüksekliği azalacağından dolayı, akım yoğunluğu değeri *exp(eV/kT)* çarpanıyla orantılı olarak artar. Böylece yarıiletkenden metale doğru akım yoğunluğu

$$J_{S\to M} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \tag{2.13}$$

şekline dönüşür. Termal denge durumunda, yarıiletkenden metale ve metalden yarıiletkene doğru olan akım yoğunlukları eşit olur. Dolayısıyla toplam akım yoğunluğu ifadesi;

$$J_n = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right)\left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right] \tag{2.14}$$

şeklinde olacaktır. Burada köşeli parantez önündeki tüm ifade sızıntı akımı olarak da adlandırılan doyma akım yoğunluğudur. Yani,

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \tag{2.15}$$

şeklindedir. Burada Denk.(2.15)'de doyma akım yoğunluğu normalde, uygulanan gerilimden bağımsız olması beklenirken, hayali-kuvvet etkisinden dolayı uygulanan gerilime bağlı olarak kısmen değişim göstermektedir. Şekil 2.11'de görülen Schottky etkisi, uygulanan gerilim ve deşikler ile elektronlar arasındaki elektrostatik etkileşmeden dolayı engel yüksekliğinde, q*(ΔΦ$_B$)* kadar bir alçalma olur. Bu engel

alçalması ise,

$$q\,(\Delta\Phi_B) = \alpha_0(V_d + V)^{1/4} \tag{2.16}$$

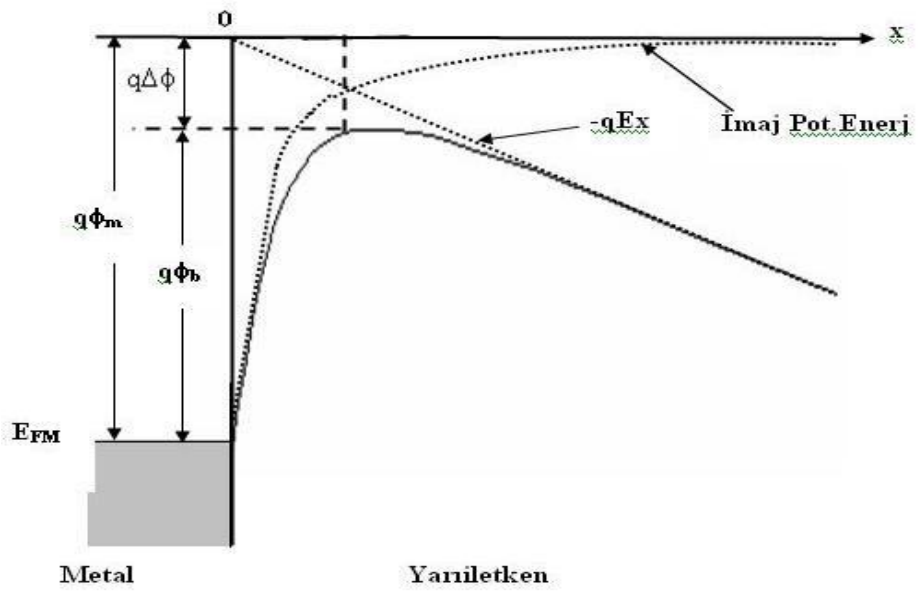
şeklinde yazılır. Dolayısıyla akım yoğunluğu ifadesinde $q\Phi_B$'nin yerine $\Phi_B$-$\Delta\Phi_B$ yazılırsa,

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right)\exp\left(\alpha_0(V_d + V)^{1/4}\right) \tag{2.17}$$

eşitliği elde edilir. Görüldüğü gibi doyma akım yoğunluğu gerilime bağlıdır. Burada $\Phi_B$ sıfır beslemde ve Schottky etkisi olmadığı durumdaki engel yüksekliği, $\alpha_0$ sabiti ifadesi ise,

$$\alpha_0 = \left\{\frac{q^4 N_d}{8(\varepsilon_s\varepsilon_0)^3\pi^2}\right\}^{1/4} \tag{2.18}$$

olup buradaki $\varepsilon_s$ ve $\varepsilon_0$ sırasıyla yarıiletkenin ve boşluğun dielektrik sabitleridir.

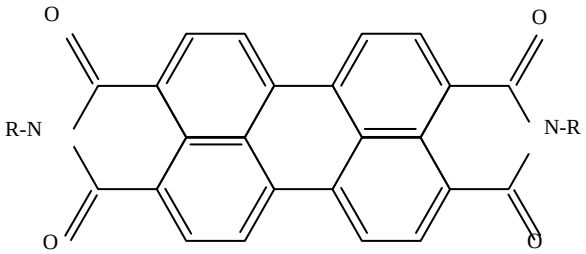



**Şekil 2.11.** Metal yarıiletken doğrultucu kontakta Schottky etkisinden dolayı potansiyel engel azalması (Sze, 1981).

## 2.3. Organik Yarıiletkenler

Organik elektronik aygıtlar optoelektronik teknolojisinde oldukça dikkat çekmektedir. Bu aygıtlar fonksiyonlarına göre üç başlıkta incelenebilir. Bunlar; organik ışık yayan diyot (OLED), organik güneş pilleri ve organik ince film transistörler (OTFT)'dir. Bu aygıtlar genelde anot/organik malzeme/katot şeklindeki bir sandviç yapıya sahiptirler. OLED'ler genelde, aygıtın ışıkla temasına izin veren ve mekanik desteği sağlayan düz bir cam üzerine büyütülür. Ortadaki aktif organik malzeme, organik yarıiletken olarak adlandırılır. Bu moleküller elektriksel iletimden sorumlu olan gevşek $\pi$-elektronları içerir. OLED ve güneş pillerinde, organik yarıiletkenler genellikle normal yarıiletkenlerin aksine bir yalıtkan gibi davranır. Şekil 2.12'de bir organik yarıiletken olan PDI'in moleküler yapısı görülmektedir.

Kristal olarak bilinen inorganik malzemeler, elektronik aygıtlarda (ışık yayan diyotlar-LED, Si tabanlı alan etkili transistörler, vb.) aktif malzeme olarak kullanılır (Sze, 1981). İnorganik yarıiletkenler yapısı çok serttir. Organik aygıtlarda ise amorf denilen organik yarıiletkenler ya da polikristal yarıiletken malzemeler kullanılır. İnorganik yarıiletkenlere göre organik yarıiletkenlerin bazı üstün özellikleri vardır. İlk olarak, organik yarıiletkenler esnek yapıdadır. Bu özelliklerinden ötürü bükülebilir elektronik aygıtlar elde etmek için plastik bir yüzey üzerine büyütülebilirler. Böylece bükülebilir ve taşınabilir organik güneş pilleri elde edilir. Ayrıca zayıf bağlı Van Der Waals kuvvetlerinden dolayı organik yarıiletkenlerin sıcaklık süreçleri, inorganiklere göre daha zayıftır. Bundan dolayı belli bir süre içinde çok fazla üretim yapılabilinir. Organik sentezindeki çok yönlülükten dolayı, organik malzemeler aygıtın uygulamasına göre farklı özelliklerde sentezlenebilir. Örneğin molekülün moleküler ağırlığı, yasak enerji aralığı, moleküler orbital enerji seviyeleri, yapısal özellikler ve katkılama gibi malzemeye ait birçok özellik ve parametreleri değiştirilebilir (So, 2010).




**Şekil 2.12.** PDI'nin moleküler yapısı.

Organik elektronik malzemelerin avantajlarının olduğu gibi bazı dezavantajları da mevcuttur. Bu durum, organik malzemenin kararlılığını etkilemektedir. Organik yarıiletken malzemelerin yapısındaki Van Der Waals kuvvetlerinin etkilerinden dolayı, organik yarıiletkenler üzerinde bir esnekliğine yol açar. Buna bağlı olarak bu malzemelerin erime noktasını ve cam geçiş sıcaklığını $T_g$'yi düşürür. Genel olarak organik malzemelerde $T_g$ sıcaklığı 100˚C'den daha düşük olduğundan dolayı, organik yarıiletkenlerin ince filmleri ısıya dayanıklı değildir. İnce film, $T_g$ sıcaklığına ulaştığında, organik film kristal olma eğilimindedir. Bundan dolayı organik filmin ısısal olarak daha dayanıklı olmasını sağlayacak çalışmalar devam etmektedir. Diğer bir zorluk ise organik elektronik aygıtlardaki elektriksel süreçlerin anlaşılmasında yatar.

Çizelge 2.1'de bazı organik ve inorganik yarıiletkenlerin yasak enerji aralıkları, erime noktası ve mobiliteleri verilmiştir. Çizelgeden anlaşılacağı gibi organik yarıiletkenlerin taşıyıcı mobiliteleri inorganiklere göre çok daha küçüktür.

**Çizelge 2.1.** Bazı inorganik ve organik malzemelerin band aralığı, erime noktası ve mobiliteleri

| | **Malzeme** | **Band Aralığı (eV)** | **Erime Noktası ˚C** | **Mobilite ($cm^2$/Vs) Deşik** | **Mobilite ($cm^2$/Vs) Elektron** |
|---|---|---|---|---|---|
| İnorganik Yarıiletkenler | Si | 1.11 | 1685 | 500 | 1900 |
| | GaAs | 1.35 | 1510 | 400 | 8800 |
| | GaP | 2.24 | 1750 | 150 | 300 |
| | Ge | 0.67 | 1231 | 1820 | 3800 |
| Organik Yarıiletkenler | TPD | 3.2 | 176 | $10^{-3}$ | $10^{-7}$ |
| | $\alpha$-NPB | 3.0 | 280 | $10^{-4}$ | $10^{-4}$ |
| | m-MTDATA | 3.2 | 205 | $10^{-5}$ | - |
| | Al$q_3$ | 2.7 | >300 | $10^{-8} - 10^{-9}$ | $10^{-6}$ |

### 2.3.1. Organik yarıiletkenlerin temel özellikleri

Organik yarıiletkenler iki guruba ayrılır. Bunlar karbon tabanlı küçük moleküller ve polimerlerdir. Monomerler, kendisini tekrarlamayan oldukça küçük moleküllerdir ve aynı zamanda moleküler organik elektronik materyaller olarak da adlandırılırlar. Polimer organik elektronik materyaller ise tekli, ikili veya daha çok monomerin (kopolimer) bağlı zincirlerinden oluşur. Hem monomer hem de polimer malzemeler, konjuge bantların bel kemiğini içerir. Moleküldeki iletim, bu bantlar sayesinde gerçekleşir. Polimerlerin, küçük moleküllere göre daha çok çözelti durumunda olmasından dolayı spin kaplama yöntemiyle büyütülmesini gerektirirler. Buna karşılık küçük moleküller, genellikle vakumda buharlaştırma ya da süblimleşme gibi yöntemler

ile büyütülmektedirler. Ayrıca polimerlerin bir üstünlüğü de, ince aktif tabakada pinholler ve küçük molekül filmlerdeki diğer kusurlar olmadan üretilebilmesidir. Bu durum, aygıtın daha düşük potansiyel altında oluşumunu kolaylaştırır (Rockett, 2008).

Organik elektronik malzemeler kendi yapıları boyunca devamlı bir çift bağ yapısına sahiptir. Yani tamamen konjuge yapıdadır. Konjuge moleküller, çiftli bağları kırarak yükleri iletebilir. Kırılan bandın yeniden oluşturulması ışık yayınımına sebep olabilir.

Konjuge organik malzemelerde temel özellik molekülün uzunluğu boyunca çift bağların sürekli bir seri olmasıdır. Burada zincirdeki her bir karbon atomu, yakın komşularıyla bir bağ yapar ve ikili bağ zincirleri oluştururlar. Çünkü her bir karbon atomu ikili bağ yapısına bir bağ katkı yapar (Rockett, 2008).

### 2.3.2. Organik yarıiletkenlerde akım iletim mekanizması

Organik katı bir molekülde deşik ve elektronların geçişini incelemek için iyonik moleküler seviyelerin göz önüne alınması gerekmektedir. Örneğin, M nötr molekülünden bir katyon $M^+$ oluşturularak bir elektron kopartılabilir. Hareket eden bu elektron, bir molekülden diğerine geçer. Elektron geçişi aynı zamanda, negatif yüklü bir $M^-$ iyonu gerektirir. Polimerlerde bu durum pozitif ve negatif polaronlar tarafından gerçekleştirilir. Moleküler krsitallerden düzensiz organik katılara gidildiğinde, farklı moleküler düzenlemelerden dolayı bölgesel değişen polarizasyon enerjisi göz önüne alınır (Brütting, 2005).

Organik yarıiletkenlerde taşıyıcı yük geçiş mekanizması aşamaları, band ve hopping geçişi olmak üzere iki şekilde gerçekleşir. Band geçişi genellikle çok yüksek sıcaklıklarda olmayan yüksek saflıktaki organik kristallerde gözlenir. Bununla birlikte, elektronik lokal bozulmalar zayıf olduğundan, band genişliği inorganik yarıiletkenlerle kıyaslanacak kadar küçüktür (oda sıcaklığında birkaç $kT$ civarında). Bu yüzden moleküler bir kristalde oda sıcaklığındaki mobiliteler $1-10\,cm^2/Vs$ arasındaki değerleri alır. Bant geçişinin karakteristik bir özelliği olarak sıcaklık bağımlılığı, düşük sıcaklıklara gidildikçe $\mu \propto T^{-n}$ şeklinde daha güçlü bir davranış izler (Brütting, 2005). Diğer bir geçiş türü olan hopping geçiş mekanizması ise 1993'te Landau tarafından önerilen bir mekanizmadır. Organik bir yarıiletkende yük taşıyıcıları hareket ettiği zaman kusurlardan, düzensizliklerden ya da polarizasyondan kaynaklanan potansiyel tarafından lokalize olurlar. Yük iletimi, ısısal olarak aktiflendirilmiş örgü

titreşimlerinden dolayı iki komşu molekül arasındaki yüklerin zıpladığı bir molekül içi süreçtir. Hopping hareketi, adyabatik olmayan elektron transfer reaksiyonu olarak bilinir (So, 2010). Bu tür geçişlerde mobilite değeri düşerek $10^{-3} cm^2/Vs$ değerine yaklaşır.

Organik yarıiletkenlerdeki taşıyıcı yoğunluğunu arttırmak için

- Elektrokimyasal katkılama
- Kontaklardan taşıyıcı enjektesi
- Taşıyıcıların fotonlarla oluşturulması
- Alan etki katkılama

gibi işlemler yapılabilir (Brütting, 2005).

### 2.3.3. Organik yarıiletken aygıtlar

Son zamanlarda organik yarıiletkenler avantajlarından dolayı organik yarıiletken aygıt yapım çalışmaları farklı bir ivme kazandı. Elektronik ve optoelektronik teknolojilerinde daha çok, OLED, OFET ve organik güneş pilleri gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır.

OLED'ler elektrik akımı uygulandığında ince bir film tabakası halinde organik moleküller kullanılarak imal edilmiş ışık üretebilen cihazlardır. İki metal arasına bir ya da daha fazla organik yarıiletken tabaka konulmasıyla hazırlanır. Anot ve katot iş fonksiyonları bakımından farklıdır. Hem anot hem katot yarı geçirgen olabilir. Elektrolüminesans durumunda cihaz ışık yayan diyot (OLED) olarak adlandırılır. OLED'ler çoğunlukla düz ekran için kullanılmaktadır. LCD teknolojisine alternatif olarak sunulmaktadır. Düşük enerji tüketmesi, ince ve hafif olması gibi özelliklere sahip olmaları nedeniyle son zamanlarda cep telefonlarında kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Başlangıçta gösterge uygulamaları için geliştirilen OLED'ler parlak renkli görüntüleri ile düşük güçte geniş görüş açısı sağlayan ekranların yapılabilmesini sağladılar (Zafer, 2006; El-Nahass ve ark., 2005).

# 3. MATERYAL VE YÖNTEM

## 3.1. Giriş

Bu bölümde Ag/PDI/n-GaAs Schottky diyotlarının yapımında kullanılacak malzemeler, numunelerin hazırlanmasında izlenecek yollar, numunelerin hazırlanması, temizlenmesi ve yapımı için takip edilen aşamalar anlatılacaktır. Ayrıca, yapılan deneysel çalışmalarda alınan I-V ve C-V ölçülerinin değerlendirilmesine ait bilgiler yer almaktadır. Bununla birlikte Ag/PDI/n-GaAs Schottky diyotlar ile yarıiletkenlerin elektriksel karakteriszasyonu için gerekli olan parametrelerin hesabında kullanılan yöntemlerden de bahsedilecektir.

## 3.2. GaAs Kristalinin Temizlenmesi

Bu çalışmada hazır olarak alınmış, (100) doğrultusunda büyütülmüş 1,5 cm x 1,5 cm boyutlarında, yaklaşık olara $500\ \mu m$ kalınlığında ve $1-20\ \Omega cm$ özdirencine sahip Tellür (Te) katkılı n-tipi GaAs (n-GaAs) kristali kullanılmıştır.

Diyot yapımında kullanılacak numunelerin yüzeyinin organik ve mekanik kirlerden iyice temizlenmiş olması, alınacak sonuçların doğruluğu ve güvenirliği açısında çok önemlidir. Yarıiletken yüzeyinin parlatılma işlemi fabrikada üretim işlemi esnasında yapıldığından dolayı ayrıca mekanik temizleme işlemi yapılmadı ve doğrudan kimyasal temizleme yapıldı. Numune yüzeylerinin kimyasal temizlenmesinde aşağıdaki işlemler sırasıyla uygulanarak tamamlanmıştır.

### 3.1.1. Numune yüzeylerini kimyasal olarak temizleme aşamaları

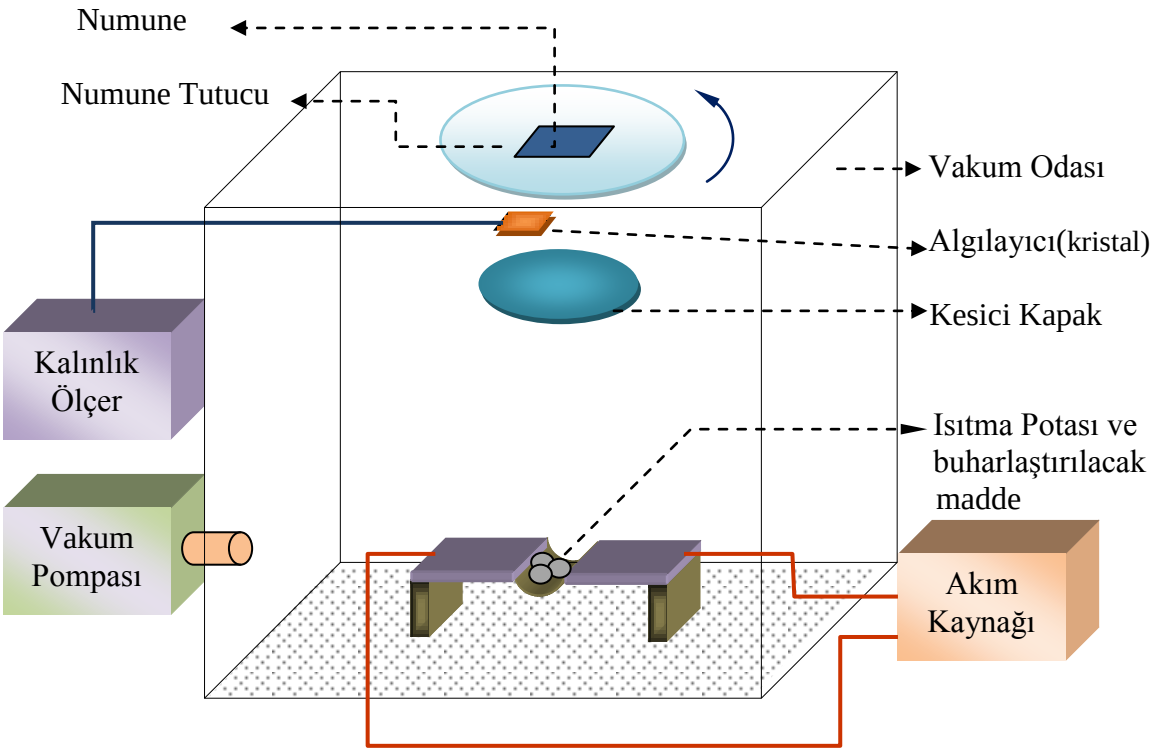
1. Kristali yağdan ve diğer kirlerden arındırmak için Trikloretilen *($C_2HCl_3$)* ile 10 dakika ultrasonik temizlemede tutuldu.
2. Aseton *($CH_3COCH_3$)* ile10 dakika ultrasonik temizleme yapıldı.
3. Propanol *($CH_3CH(OH)CH_3$)* ile 10 dakika ultrasonik temizleme gerçekleştirildi.
4. 20 hacim Sülfirikasit *($H_2SO_4$)* ve 20 hacim Hidrojen peroksit *($H_2O_2$)* karışımında 10 dakika ultrasonik olarak temizleme yapıldı.
5. Amonyak *($NH_3$)*, hidrojen peroksit *($NH_3 + H_2O_2$)* ve deiyonize su karışımında 10 dakika ultrasonik olarak temizleme gerçekleştirildi.

6. 15 hacim deiyonize su ve 1 hacim %38-40'lık *HF* karışımında 2 dakika yıkama yapıldı.
7. 2 hacim Nitrik asit *($HNO_3$)*, 1 hacim %38-40'lık *HF* ve 1 hacim Asetik asit *($CH_3COOH$)* karışımında 4 dakika tutularak kristal yüzeyi parlatıldı.
8. 15 hacim deiyonize su ve 1 hacim %38-40'lık *HF* karışımında 2 dakika yıkama gerçekleştirildi.
9. Numuneler Azot gazı ($N_2$) ile kurulandı.

Ayrıca, kristal her temizleme aşamasında *18 MΩ*'luk deiyonize su ile durulandı.

### 3.2. Omik Kontağın Oluşturulması

Yüzey temizlendikten sonra %99,99 saflığındaki indiyum (In) metali termal buharlaştırma yöntemi ile n-GaAs kristali üzerine büyütülmüştür. MS kontağın oluşturulmasında Selçuk Üniversitesi Fizik Bölümü İnce Film Laboratuarında bulunan ince film ünitesi (Nanovak NVTS21) kullanılmıştır. Bu ince film ünitesinin blok diyagramı Şekil 3.1'de, fotoğrafı ise Şekil 3.2'de verilmektedir. Kimyasal olarak temizlenen In, maskeler yardımıyla ince film ünitesi içindeki potalara, kaplanmak istenen miktar kadar konulup sistem kapatılmıştır. Ünite içindeki vakumun istenilen değere düşürülmesi için bir süre beklenmiştir. $5.10^{-6}$ Torr basınçta buharlaştırma işlemi başlatılmıştır. Kaplanan In yaklaşık olarak 1500 Å kalınlığındadır. Daha sonra düşük özdirençli omik kontak elde etmek için vakumda 340˚C sıcaklığında yaklaşık 3 dakika ısısal işleme tabi tutulmuştur.



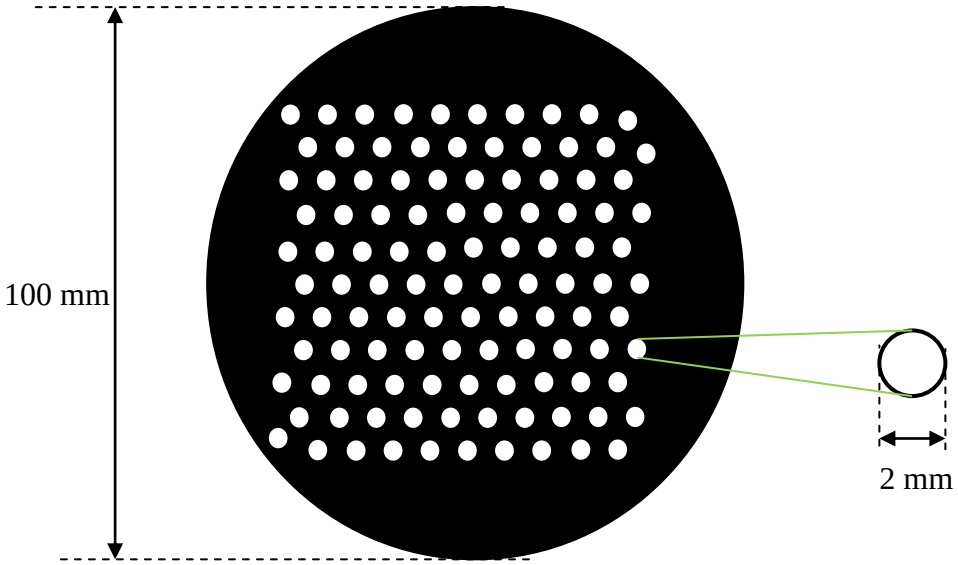

**Şekil 3.1.** Omik ve doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan termal buharlaştırma sisteminin blok diyagramı.



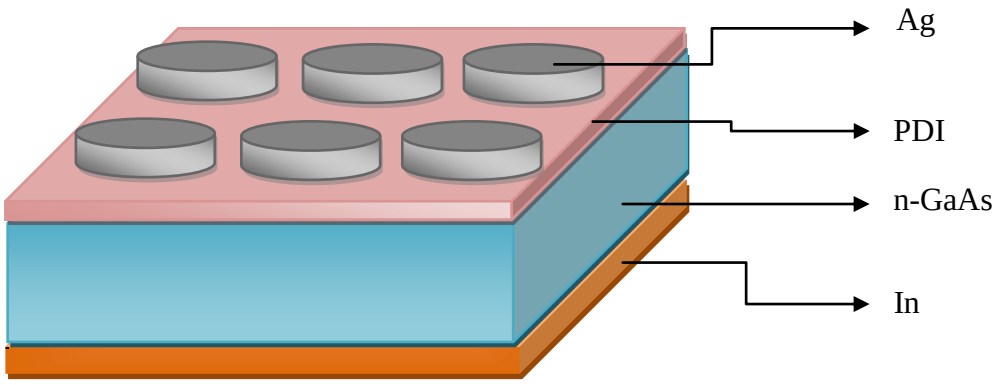

**Şekil 3.2.** Omik ve doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan buharlaştırma sisteminin fotoğrafı.

### 3.3. Organik Filmin Hazırlanması ve Schottky Kontağın Yapılması

Omik kontak yapılmış olan numune üzerine, drop casting kaplama metodu ile organik perylenediimide (PDI) kaplanmıştır. PDI kaplanmış numuneler, Schottky kontakları oluşturmak için bir maske kullanılarak termal buharlaştırma metodu ile %99,99 saflıktaki gümüş (Ag) metali ile kaplanmıştır. Burada kullanılan maske, Şekil 3,3'te görüldüğü gibi 2 mm çaplı deliklerden oluşmuştur. Buharlaştırma sistemi $5 \times 10^{-6}\, Torr$ basınca ulaşıldığında içerisinde Ag bulunan molibdenyum telden akım geçirilmeye başlanır. Akım geçen tel ısınmaya başlar ve üzerindeki gümüşü ısıtır. Sistemde ki molibdenyum telden akım geçerken tel yüksek sıcaklık değerlerine ulaşır ve Ag'nin sıcaklık erime noktasına (962˚C) gelindiğinde gümüş erimeye, daha sonra kaynama noktasında (2212˚C) buharlaşmaya başlar. Buharlaşan gümüş, yarıiletken numunenin yüzeyine yapışarak ince film tabakasını oluşturur. Sonuç olarak, 1500 Å kalınlığında Ag kaplanmış ve doğrultucu kontak işlemi sonlanmış olmaktadır. Bu son işlemle birlikte Ag/PDI/n-GaAs Schottky diyotu elde edilmiştir. Schottky diyotun aygıt yapısı Şekil 3.4' de gösterilmiştir.



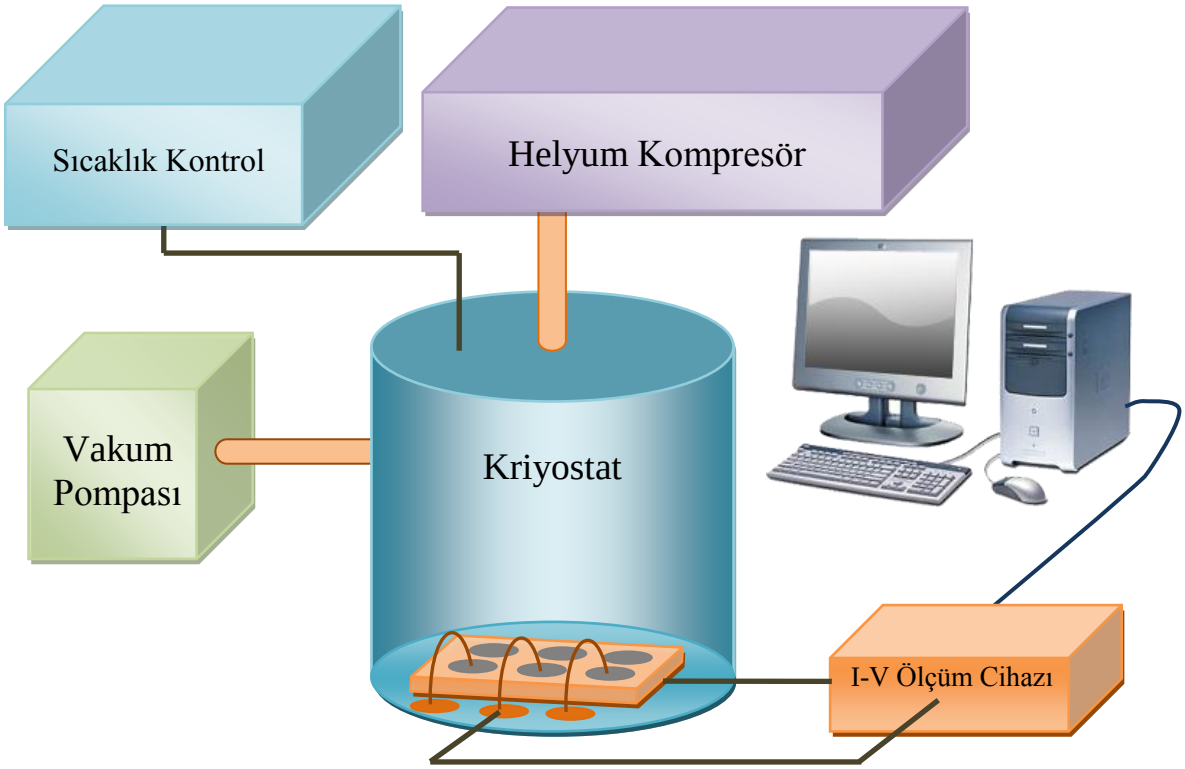

**Şekil 3.3.** Doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan maske.




**Şekil 3.4.** Ag/PDI/n-GaAs ( MIS) diyodun şematik gösterimi.

### 3.4. Deneylerde Kullanılan Ölçüm Düzenekleri

Elektriksel karakterizasyon ölçümleri, Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi İnce Film Karakterizasyon Laboratuarında yapılmıştır. Akım-gerilim (I-V) ölçümlerinde Keithley 2410 programlanabilir sabit akım kaynağı kullanıldı. Kapasite-gerilim (C-V) ölçümlerinde ise Hewlett Packard 4192 LF Empedans Analizörü (5 Hz –13MHz) kullanıldı. Tüm bu ölçümler laboratuardaki bilgisayarda yüklü olan labview programı yardımıyla gerçekleştirildi. Farklı sıcaklık bölgelerindeki ölçümler için ARS Kapalı devre Kriyostat (Model: DE202 AI) kullanıldı. Sıcaklık denetimi Lake Shore 331 sıcaklık kontrol sistemi kullanılarak sağlandı. Akım-gerilim (I-V) ölçümleri ve sığa-gerilim (C-V) ölçümlerinin yapıldığı düzenekler sırasıyla Şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de gösterilmiştir.




**Şekil 3.5.** Akım-gerilim (I-V) ölçümleri için kullanılan deneysel düzeneğin blok diyagramı.




**Şekil 3.6.** Akım-gerilim (I-V) ölçümleri için kullanılan düzeneğin fotoğrafı.



**Şekil 3.7.** Kapasite-gerilim (C-V) ölçümleri için kullanılan empedans analizörünün fotoğrafı.

# 4. ÖLÇÜM SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, materyal ve metot kısmında anlatıldığı gibi numune temizlenerek oluşturulan Ag/PDI/n-GaAs Schottky diyotlarının farklı sıcaklıklarda belirlenen akım-gerilim (I-V) karakteristikleri değerlendirilecektir. Ayrıca, oda sıcaklığında belli bir frekans değerinde ölçülen sığa-gerilim (C-V) karakteristikleri analiz edilecektir. Bu değerlendirmeler sonucunda diyoda ait birçok parametre belirlenecek ve bu parametrelerin sıcaklıkla değişimi yorumlanacaktır.

## 4.1. Sıcaklığa Bağlı Akım-Gerilim (I-V) Karakteristikleri

Hazırlanan metal/organik/yarıiletken (Ag/PDI/n-GaAs) Schottky diyotlarının doğru beslem akım-gerilim (*I-V*) karakteristikleri, termo-iyonik emisyon teorisine (TE) (Rhoderick ve Williams, 1988) göre incelendi. Bu teoriye göre akım ifadesi,

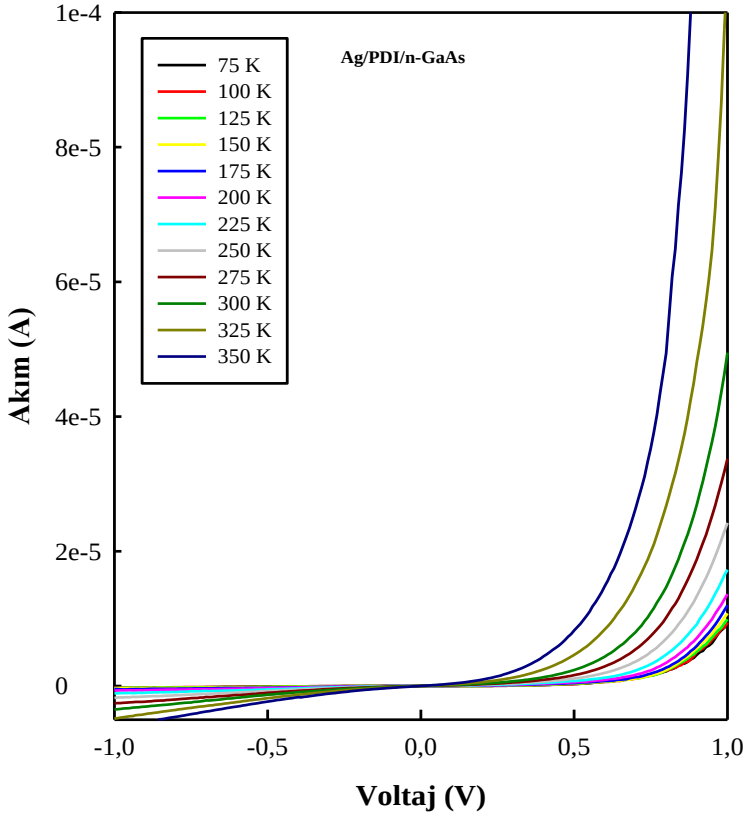
$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1\right] \tag{4.1}$$

olur. Burada $I_0$ doyma akımı olup yarı-logaritmik *ln*I - V grafiğinde, eğrinin lineer kısmının sıfır gerilimde ($V = 0$) akım eksenine fit edilerek bulunur ve

$$I_0 = AA^*T^2 exp\left(-\frac{q\Phi_{B0}}{kT}\right) \tag{4.2}$$

eşitliği ile verilir. Burada $q$ elektronun yükü, $V$ uygulanan doğru beslem gerilimi, A diyodun alanı, $k$ Boltzmann sabiti, $A^*$ n-tipi GaAs için etkin Richardson sabiti ($A^*$ = 8.16 $A\ cm^{-2}\ K^{-2}$), $\Phi_{B0}$ sıfır beslemdeki engel yüksekliği, $n$ diyotun idealite faktörü ve $T$ ise Kelvin cinsinden sıcaklıktır. Şekil 4.1'de, bu Schottky diyodun farklı sıcaklıklardaki *I-V* eğrileri çizilmiştir. Grafiğin doğru beslem kısmından, akımın artan sıcaklıkla üstel olarak arttığı görülmektedir. Yine grafikten, düşük sıcaklıklarda bu akım artışının daha az, oda sıcaklığına yakın sıcaklıklar ve bunun daha üzeri sıcaklıklarda ise artışın daha dik olduğu görülmektedir.

Denk. (4.1) yardımıyla Ag/PDI/n-GaAs Schottky diyotu için elde edilen 75-350 K sıcaklık aralığındaki tipik yarı-logaritmik doğru beslem *I-V* karakteristikleri Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



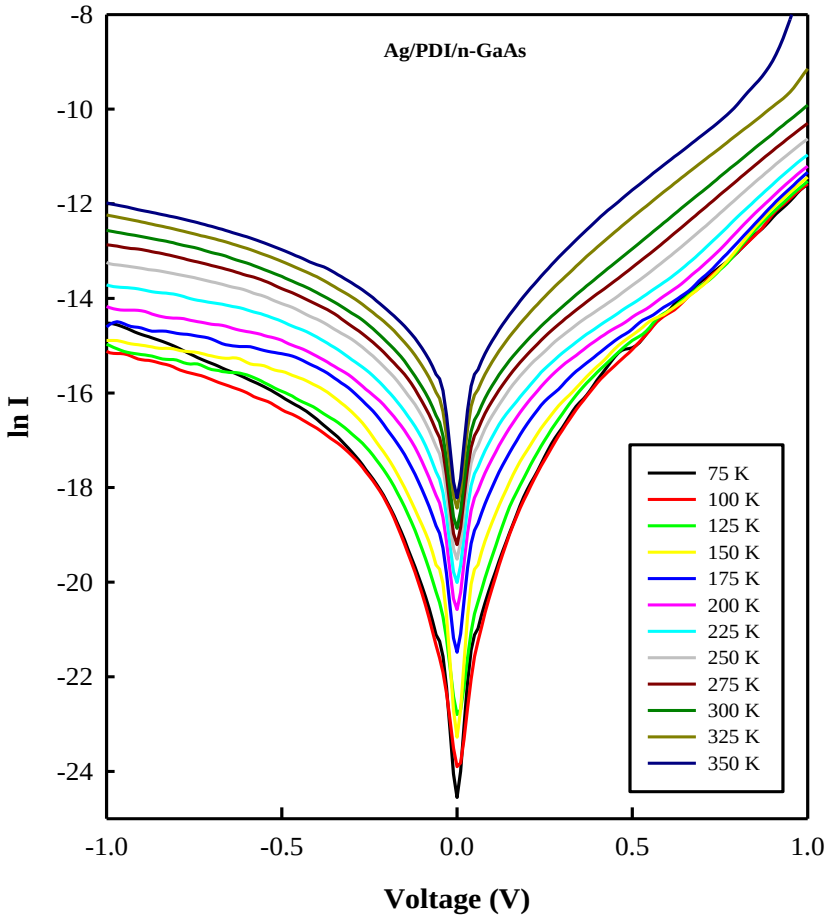

**Sekil 4.1.** Ag/PDI/GaAs Schottky diyodunun ters ve doğru beslem $I-V$ grafikleri

Şekil 4.2'de görüldüğü gibi yarı logaritmik doğru beslem *ln*I – V eğrileri geniş bir bölgede lineerdir. Ayrıca bu *ln*I – V eğrileri özellikle düşük sıcaklıklarda iki lineer bölgeye sahiptir. Birinci bölge artan sıcaklıklarda kaybolma eğilimindedir. Hesaplamalarda orta gerilim bölgesi olan ikinci bölge dikkate alınmıştır. Yine şekilde görüldüğü gibi *ln*I – V eğrilerinin bu bölgedeki eğimi, sıcaklıkla hemen hemen hiç değişmemektedir.

İdealite faktörünün değeri, yarı-logaritmik akım-voltaj grafiğinin orta gerilim bölgesinde, Denk. 4.1'den faydalanılarak lineer kısmının eğiminden (*dV/dln(I)*) her sıcaklık için ayrı ayrı hesap edilmek üzere,

$$n = \frac{q}{kT}\left(\frac{dV}{d\ln I}\right) \tag{4.3}$$

denkleminden elde edilir. İdealite faktörü, doğru beslemde akım-gerilim karakteristikleri kullanılarak hesaplanan ve diyotun ideallikten sapma miktarını gösteren boyutsuz bir parametredir. Potansiyel engel yüksekliği ($\Phi_{Bo}$) ise; *ln*I – V grafiğinde, lineer kısmının sıfır besleme extrapole edilmesiyle bulunan $I_0$ doyma akım



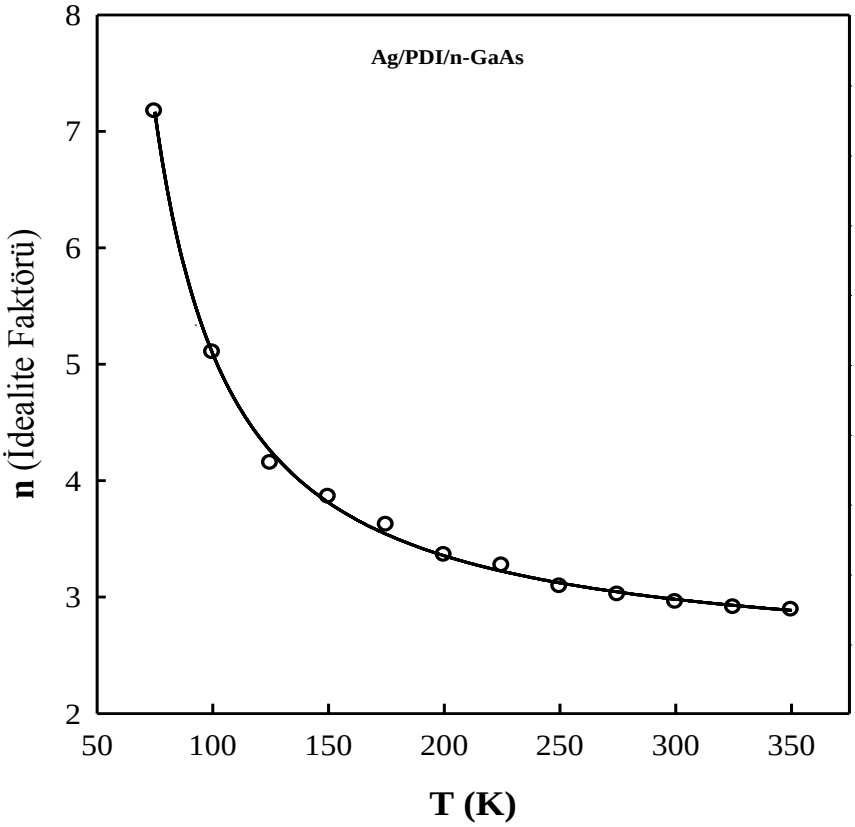

**Şekil 4.2.** Ag/PDI/GaAs Schottky diyodunun ters ve doğru beslem $\ln I - V$ grafikleri

değeri ve diyotun alanı kullanılarak denk. (4.2)'den bulunur. *ln*I – V eğrilerinin eğiminden Denk. (4.3)'e göre elde edilen idealite faktörü değerleri artan sıcaklıkla azalmakta ve sıcaklığın tersi ile Şekil 4,3'de görüldüğü gibi lineer olarak,

$$n(T) = n_0 + T_0/T \qquad (4.4)$$

şeklinde değişmektedir. Bulunan değerler Denk.(4.3) ifadesinde yerine yazılıp her bir sıcaklık için $n$ değeri belirlenmiştir.

Çizelge 4.1'den de görüldüğü gibi yarı-logaritmik doğru beslem *ln*I – V eğrilerinden elde edilen $\Phi_{Bo}$ ve n değerleri, sıcaklığa çok sıkı bir şekilde bağlıdır. Artan sıcaklıkla $\Phi_{Bo}$ değeri artarken, n değeri azalmaktadır. Sıfır beslem engel yüksekliği ($\Phi_{Bo}$) ve diyot idealite faktörünün (n) sıcaklığa bağlı değişimi sırasıyla Şekil.4.3 ve Şekil.4.5'de verilmektedir. Denk. (4.2) eşitliğinin her iki tarafının logaritması alınıp $\phi_{Bo}$'a göre çözülürse Denk. (4.5) ile verilen engel yüksekliği ifadesi elde edilir.



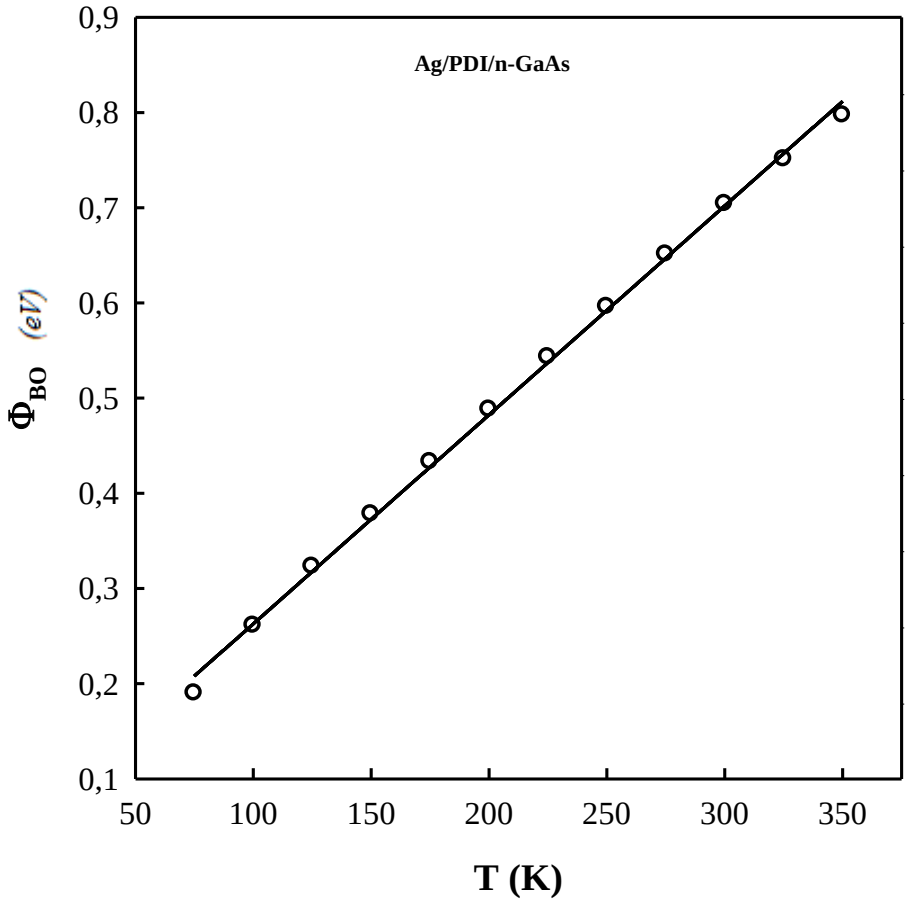

**Şekil 4.3.** Ag/PDI/n-GaAs (MS) Schottky diyotunun idealite faktörünün sıcaklıkla değişim grafiği.

$$\phi_{Bo} = \frac{kT}{q} In\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \qquad (4.5)$$

Bu denklem yardımıyla her bir sıcaklık değeri için elde edilen engel yüksekliği değerleri Çizelge 4.1 de verilmiştir. İdealite faktörü ile engel yüksekliği için, en düşük (75 K) ile en yüksek (350 K) sıcaklıkları için bu değerler, sırasıyla n=7,17-2,89 ve $\Phi_{Bo}$ =0,190-0,797 eV arasında elde edilmiştir. İdealite faktörünün değerinin ideal durumda (n=1) olması beklenir. Ancak pratikte bu duruma hemen hemen hiç rastlanmaz. Çünkü engel yüksekliği uygulanan gerilime bağlıdır. Bu bağımlılık, yalıtkan tabaka üzerinde potansiyel düşmesine, dolayısıyla *I-V* karakteristiğin değişimine ve idealite faktörün 1'den büyük çıkmasına neden olur. İdealite faktörünün 1'den büyük değerler çıkması, pratikte ideal diyot elde edilmesinin zor olduğu anlamına gelmektedir. İdealite faktöründeki bu artış, organik film kalınlığındaki homojensizlikler, ara yüzey durumları ve ara yüzey yüklerinin düzgün olmayan dağılımları ile açıklanabilir (Güllü ve ark., 2010). Ayrıca görüntü yük düşmesi ve üretim-yeniden birleşme süreçleri de idealite faktörünün büyük çıkmasını açıklayan sebepler arasında yer almaktadır (Tung ve ark.,

1992; Crowell ve ark., 1966; Card ve ark., 1971). İdealite faktörünün normalden büyük çıkması, akım taşıma özelliklerinin sadece termo-iyonik emisyon modeli ile açıklanamayacağını ifade eder. Bu durumda ara yüzeyde ikincil bir mekanizmanın varlığından söz edilebilir. Organik-inorganik ara yüzeyin keskin aktif olmayan yapıda oluşmasına rağmen, metal ile yarıiletken arasındaki organik tabakanın ara yüzey durumlarında önemli bir modifikasyona sebep olduğu görülmektedir. Bu yüzden engel yüksekliğindeki değişim, organik tabaka pasivasyonu yoluyla ara yüzey dipolü ile açıklanabilir (Bolognesi ve ark., 2003).

Ag/PDI/n-GaAs diyotunun oda sıcaklığında idealite faktörü 2,96 ve engel yüksekliği 0,704 eV olarak hesaplanmıştır. Daha önce yapılan ve rapor edilen bir çalışmada, Au/PMI/n-Si Schottky kontağın sıcaklığa bağlı elektriksel karakterizasyonu yapılmış, yapılan değerlendirmelerde oda sıcaklığında idealite faktörü ve engel yüksekliği sırasıyla 5,08 ve 0,675 eV olarak bulunmuştu (Yüksel ve ark., 2011).




**Şekil 4.4.** Ag/PDI/n-GaAs (MS) Schottky diyotunun $\Phi_{B0}$–T değişim grafiği.

Her iki çalışmada da benzer organik malzeme kullanılsa da, farklı değerler elde edilmesi, kontaklar için kullanılan alt tabaka ve omik kontak malzemesinin farklılığına bağlı olabilir. Buradan anlaşılacağı üzere idealite faktörü açısından bakıldığında Ag/PDI/n-GaAs Schottky diyotunun, Ag/PMI/n-GaAs (MS) Schottky diyotununa göre, ideal diyot davranışına daha yakın olduğu söylenebilir (Şimşir ve ark., 2012).

### 4.2. Cheung-Cheung Fonksiyonları Yardımıyla Akım-Gerilim Karakteristikleri

Diyodun $I-V$ grafiğinin karakteristik lineer bölgesinde termo-iyonik emisyon teorisi kullanılır. Bu bölge $kT/q \ll V \ll IR_s$ şeklinde yüksek seri direnç ile sınırlıdır. Bu bölge $I_0$ ve $\phi_B$ nin güvenilir değerlerini hesaplamak için çok dardır. Düşük gerilim bölgesinde yeniden birleşme süreçlerinin katkısı, yüksek gerilim bölgesinde ise seri direncin büyük olması halinde, diyotun üzerine düşmesi gereken gerilimin çoğunluğu seri direnç üzerine düşeceğinden lineerlik bozulur. Bu nedenle termo-iyonik emisyon modelinin tek başına kullanılması yetersiz kalacaktır (Kutluca H., 2007). Cheung-Cheung tarafından önerilen modelde seri direnç katkısı da göz önüne alınarak akım ifadesi Denk (4.6) eşitliği ile verilmiştir (Cheung ve Cheung, 1986).

$$I = \left[AA^{*}T^{2}exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right)\right]\left[exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{nkT}\right)\right] \tag{4.6}$$

Bu ifadenin her iki tarafın *ln*'ini alıp, $dV/dIn(I)$ ifadesini çekecek olursak

$$\frac{dV}{d(InI)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \tag{4.7}$$

sonucu elde edilir. Benzer şekilde Denk(4.6)'in *ln*'ini alıp bazı düzeltmeler yapılırsa,

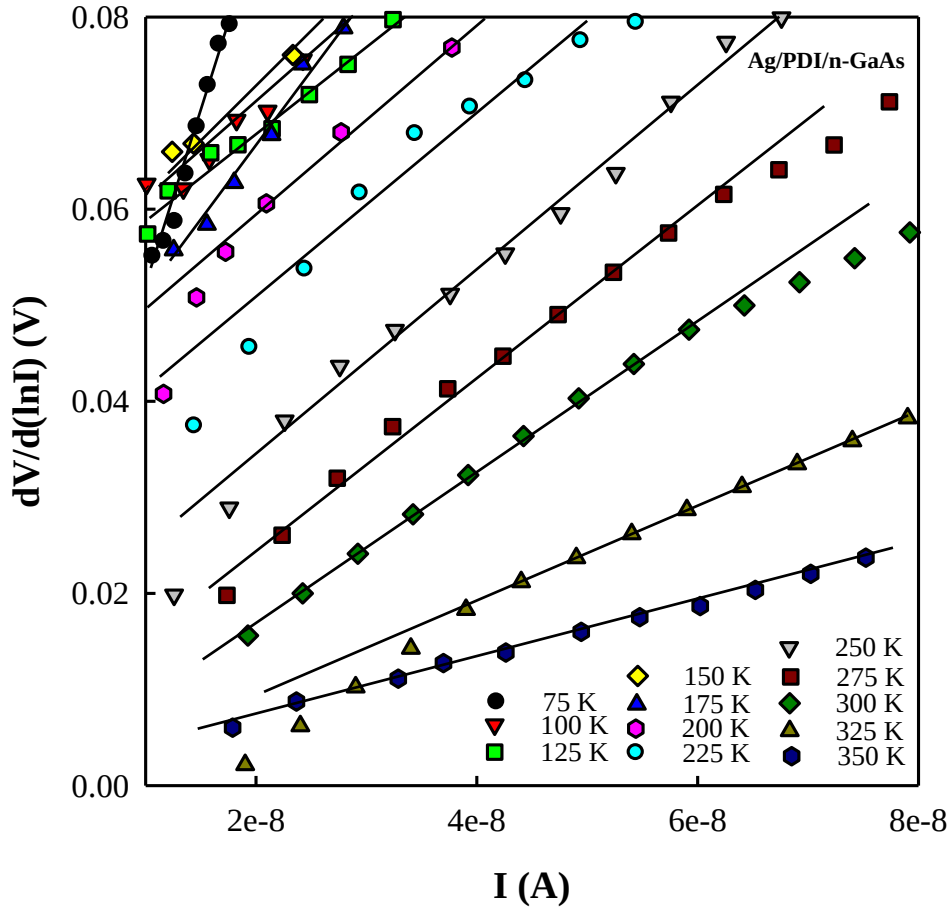
$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q}\right) In\left(\frac{I}{AA^{*}T^{2}}\right) = n\phi_B + IR_S \tag{4.8}$$

İfadesi elde edilir. Burada Denk (4.7) ifadesine göre $\frac{dV}{d(InI)} - I$ grafiğindeki lineer bölgenin eğimi, diyotun $R_s$ seri direncini verir. Yine aynı grafiğin koordinat eksenini kesim noktası ise *n* idealite faktörünü verir. Şekil 4.5'de Ag/PDI/n-GaAs Schottky engel

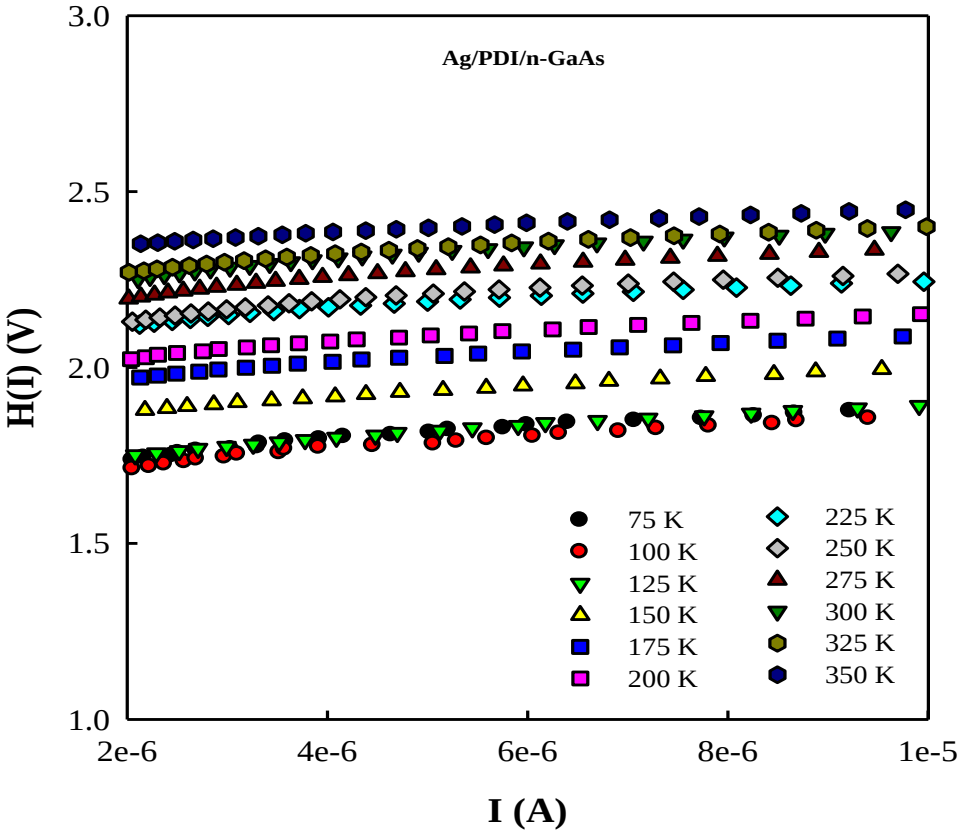
diyotu için $\frac{dV}{d(InI)} - I$ eğrisi verilmiştir. Benzer şekilde Denk. (4.8)'nin akıma göre grafiği çizilirse, elde edilen eğrilerin eğimi seri direnci, eğrinin düşey ekseni kestiği nokta ise $\Phi_B$ engel yüksekliğini verir. Şekil 4.6'da Ag/PDI/n-GaAs diyotunun farklı sıcaklıklarda H(I)-I grafiği görülmektedir.

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'dan görüldüğü gibi eğriler, her bir sıcaklık değeri için iyi bir lineerlik göstermektedir. Şekil 4.5 de sıcaklık arttıkça karşılık gelen akım değeri azalmaktadır. Oda sıcaklığı ve üzerindeki sıcaklıklarda bu artış değerinin biraz daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.5 de aynı eğilim gözlenmekte, akım değeri sıcaklıkla azalmaktadır.

Burada Cheung ve Cheung fonksiyonları bize alternatif olarak bazı diyot parametrelerinin hesaplanması için bir yöntem sunar. Çizelge de Cheung-Cheung metoduyla $H(I) - I$ grafiğinin kesim noktasında elde edilen engel yüksekliği $(\phi_B)$ ve




**Şekil 4.5.** 75-350 K sıcaklık aralığında Ag/PDI/n-GaAs Schottky diyotu için $dV/dInI - V$ grafiği.




**Şekil 4.6.** Ag/PDI/n-GaAs Schottky diyotu farklı sıcaklık değerleri için $H(I) - V$ grafiği.

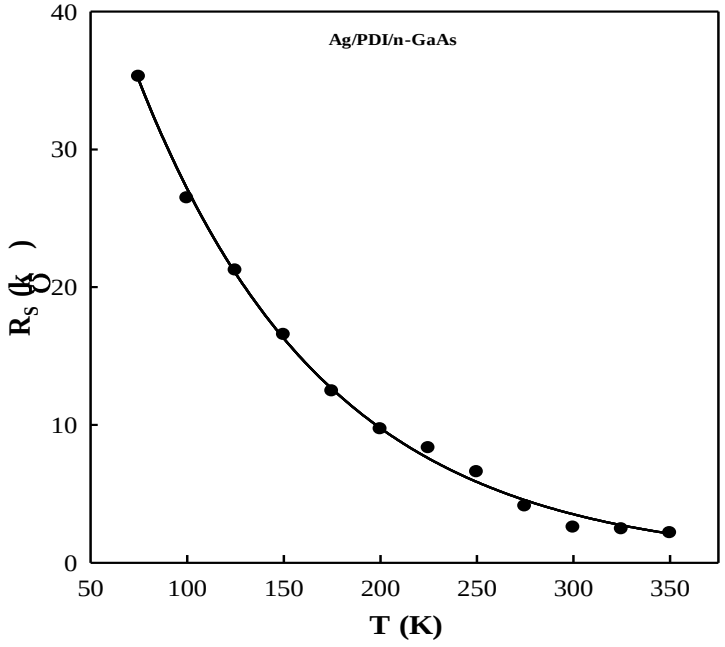
$\frac{dV}{d(InI)} - I$ grafiğinin kesim noktasından elde edilen idealite faktörü ($n$) değerleri, akım-gerilim karakteristiklerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Burada metotlar farklı da olsa bulunan değerlerin iyi bir uyum gösterdiği gözlenmektedir. *I-V* ölçümlerinin oda sıcaklığındaki ölçümlerinden hesaplanan idealite faktörü ile Cheung-Cheung fonksiyonları yardımıyla hesaplanan idealite faktörü değerlerinin 2,96 olduğu görülmektedir. Bu sonuçların aynı çıkması ölçümlerdeki hassasiyetin yüksek olduğunu göstermektedir. Yine $I - V$ ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliğinin ($\phi_{Bo}$) değeri ile Cheung-Cheung fonksiyonlarından hesaplanan engel yüksekliğinin ($\phi_{Bo}$) değerinin yaklaşık olarak aynı olduğu ve 0,704 $eV$ olarak ölçüldüğü görülmektedir.

Seri direncin sıcaklıkla değişimi, Şekil 4.7'de Cheung-Cheung fonksiyonları yardımıyla $\frac{dV}{d(InI)} - I$ ve $H(I) - V$ grafiklerinin eğiminden hesaplanarak bulunmuştur. Çizelge 4.1'de, farklı metotlarla hesaplanan $R_s$ değerleri verilmiştir. Çizelgede hem $dV/dInI - V$ grafiğinden hem de $H(I) - V$ grafiğinden elde edilen seri direnç

değerlerinin uyumlu olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 4.7'den görüldüğü gibi seri direnç, artan sıcaklıkla üstel olarak azalmaktadır. Burada idealite faktörünün sıcaklıkla düşmesi, seri dirençteki azalmadan kaynaklanmaktadır. Bu değişim, serbest taşıyıcı yoğunluğunun sıcaklıkla artış ya da azalışının bir sonucudur (Chand ve Kumar 1996). Ayrıca iletim bandındaki taşıyıcı sayısının artması ya da azalması seri direnci değiştirecektir (Soylu 2007).

**Çizelge 4.1.** Ag/PDI/n-GaAs (MS) Schottky engel diyotu için farklı metotlarla elde edilen diyot parametreleri.

| T (K) | I-V | | dV/d(lnI)-I | | H(I)-I | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | n | $\phi_{B0}$ (eV) | n | $R_s$ (kΩ) | $\phi_B$ (eV) | $R_s$ (kΩ) |
| 75 | 7.17 | 0.190 | 7.18 | 35.270 | 0.189 | 35.122 |
| 100 | 5.10 | 0.261 | 5.10 | 26.450 | 0.260 | 26.523 |
| 125 | 4.15 | 0.323 | 4.17 | 21.221 | 0.322 | 21.280 |
| 150 | 3.86 | 0.378 | 3.87 | 16.539 | 0.378 | 16.519 |
| 175 | 3.62 | 0.433 | 3.61 | 12.442 | 0.431 | 12.421 |
| 200 | 3.36 | 0.488 | 3.36 | 9.692 | 0.487 | 9.717 |
| 225 | 3.27 | 0.543 | 3.27 | 8.317 | 0.540 | 8.318 |
| 250 | 3.09 | 0.596 | 3.09 | 7.604 | 0.594 | 7.629 |
| 275 | 3.02 | 0.651 | 3.03 | 4.092 | 0.650 | 4.077 |
| 300 | 2.96 | 0.704 | 2.96 | 2.552 | 0.703 | 2.578 |
| 325 | 2.91 | 0.751 | 2.91 | 2.430 | 0.750 | 2.441 |
| 350 | 2.89 | 0.797 | 2.90 | 2.145 | 0.796 | 2.161 |




**Şekil 4.7.** Ag/PDI/n-GaAs engel diyotu için seri direncin sıcaklıkla değişimi.

## 4.2. Sığa-Gerilim Karakteristikleri

Schottky engel diyotta ara yüzey durumlarını belirlemek için sığa-gerilim (C-V) karakteristikleri önemli yere sahiptir. Engel yüksekliği, sığa ölçümleri ile de tayin edilebilmektedir. Bir dc besleme üzerine küçük bir ac gerilim bindirildiği zaman, metal üzerinde bir işaretli, yarıiletkende ise zıt işaretli yükler meydana gelir. MS diyotlar için tüketim tabakası sığası,

$$C = \frac{\partial Q_{sc}}{\partial V} = \sqrt{\frac{q\varepsilon_0\varepsilon_s N_d}{2\left(V_{bi} - V - \frac{kT}{q}\right)}} \qquad \text{Farad}/\ cm^2 \tag{4.8}$$

ile verilir. Burada $V_{bi}$ sıfır beslemdeki built-in potansiyeli, $\varepsilon_0$ boşluğun dielektrik geçirgenliği, $\varepsilon_s$ yarıiletken malzemenin dielektrik sabiti (n-GaAs için 13,1) ve $N_d$ donor yoğunluğudur. Bir takım aritmetik işlemlerden sonra Denk. (4.8)

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_{bi}-V)}{A^2\varepsilon_s\varepsilon_0 q N_d} \tag{4.9}$$

şeklinde yazılabilir. Buradaki $V_{bi}$ potansiyeli, $C^{-2} - V$ grafiğinin lineer kısmının ekstrapole edilmesiyle elde edilir. Denk. (4.9)'un gerilime göre türevini alınırsa,

$$\frac{\partial(1/C^2)}{\partial V} = \frac{2}{A^2\varepsilon_s\varepsilon_0 q N_d} \tag{4.10}$$

elde edilir. Denk. (4.10)

$$N_d = \frac{2}{A^2\varepsilon_s\varepsilon_0 q \frac{\partial(1/C^2)}{\partial V}} \tag{4.11}$$

biçiminde yazılabilir.

Ag/PDI/n-GaAs Schottky diyotu için $C - V$ ölçümleri, $1\ MHz$ frekansta, $V_{rms}$=50 mV ve oda sıcaklığında alınmıştır. Kaplanan ince filmin kalınlığı bu ölçümden, PDI'nın dielektrik sabiti 3,4 alınarak (Nalçacıgil, 2011) 61 nm olarak bulunmuştur. Numune için $C - V$ grafiği Şekil 4.8'de ve $C^{-2} - V$ grafiği Şekil 4.9'da verilmiştir. Şekil 4.8'de görüldüğü gibi sığa değeri, düşük gerilim değerlerinde yavaşça artmakta fakat bu durum belli bir gerilim değerinden sonra keskin bir artış göstermektedir. Yüksek frekanslardaki sığa değeri, sadece uzay yük sığası olarak tanımlanırken bu

durum düşük frekanslarda, uzay yük sığası ve ara yüzey sığasının toplamı olarak tanımlanmaktadır (Yakuphanoğlu ve ark., 2010). Yüksek frekanslarda hesaplanan parametreler ideal duruma daha yakın çıkmaktadır. Şekil 4.9'un lineer kısmının ekstrapole edilmesiyle $V_{bi}$ = 1,405 eV bulunmuştur. Aynı eğrinin lineer kısmının eğiminden (Denk.(4.11)) donor yoğunluğu $N_d$ = 4,282.$10^{13}$ $cm^{-3}$ elde edildi.

Sığa-gerilim ölçümlerinden engel yüksekliği,

$$\phi_B(C-V) = V_{bi} + E_F - \Delta\emptyset_B \tag{4.12}$$

ifadesi ile hesaplanır. Burada $\Delta\Phi_B$ band kenarı engel azalması olup

$$\Delta\emptyset_B = \left(\frac{qE_m}{4\pi\varepsilon_s\varepsilon_0}\right)^{1/2} \tag{4.13}$$

şeklinde verilir. Burada $E_m$, maksimum elektrik alan,

$$E_m = \left(\frac{2qV_{bi}N_A}{\varepsilon_s\varepsilon_0}\right) \tag{4.14}$$

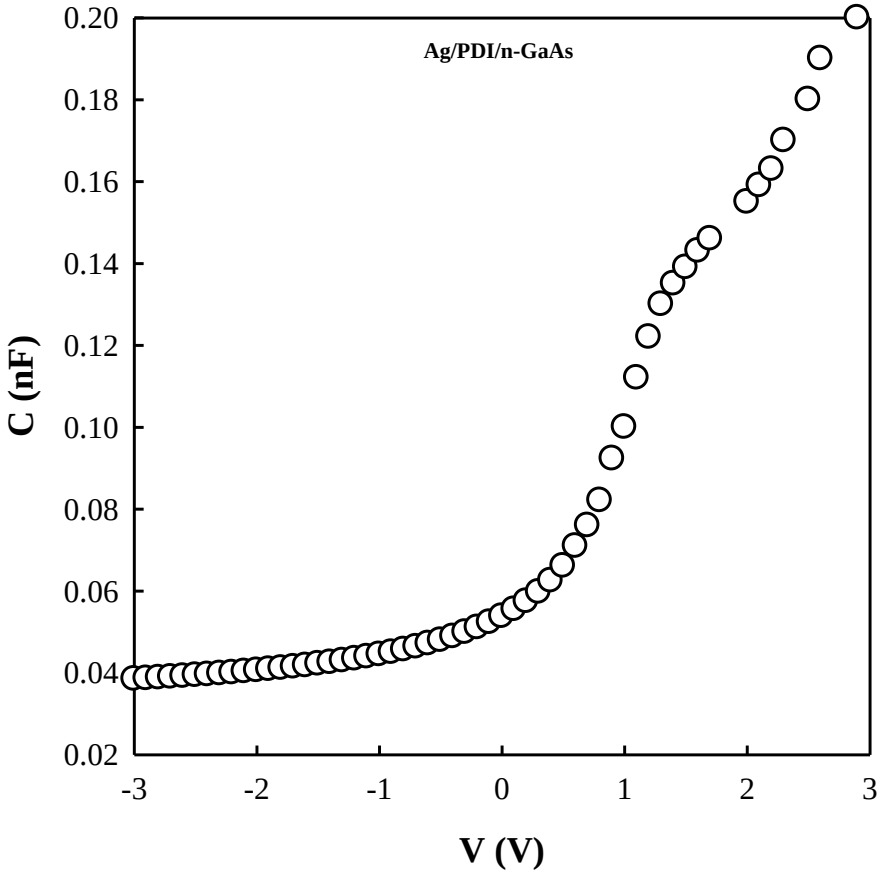
şeklinde verilir. Fermi enerjisi ise,

$$E_F = \frac{kT}{q} ln\left(\frac{N_C}{N_d}\right) \tag{4.15}$$

şeklinde tanımlanır. Eşitlikteki $N_c$ n-GaAs'ın iletim bandındaki durum yoğunluğu olup $N_c = 4.3 \times 10^{17}\ cm^{-3}$'dır (Aydın ve ark., 2011).

Ag/PDI/n-GaAs Schottky yapı için Denk. (4.13), Denk. (4.14) ve Denk. (4.15) kullanılarak, $\Delta\Phi_B$=6,866.$10^{-3}$ eV, $E_m$=4,292.$10^3$ V/cm, $E_F$= 0,272 V/cm elde edilmiştir. Bulunan bu değerlerin Denk (4.12)'de yerine konulması ile Ag/PDI/n-GaAs Schottky diyotun engel yüksekliği $\Phi_B$=1,69 $eV$ bulunmuştur. Engel yüksekliği, sığa-gerilim karakteristiklerinden bulunan değerle akım-gerilim karakteristiklerinden bulunan değer karşılaştırılacak olursa, sığa-gerilimden elde edilen engel yüksekliğinin literatüre uygun değerden daha büyük olduğu görülmektedir. Engel yüksekliğindeki bu artış ara yüzeydeki homojensizliklerle ara yüzeydeki yüklerin dağılımıyla ilgili olduğu şeklinde yorumlandı. Güllü ve ark. (2010) Al/NF/n-Si diyotu ile yaptıkları bir çalışmada 10 $kHz$

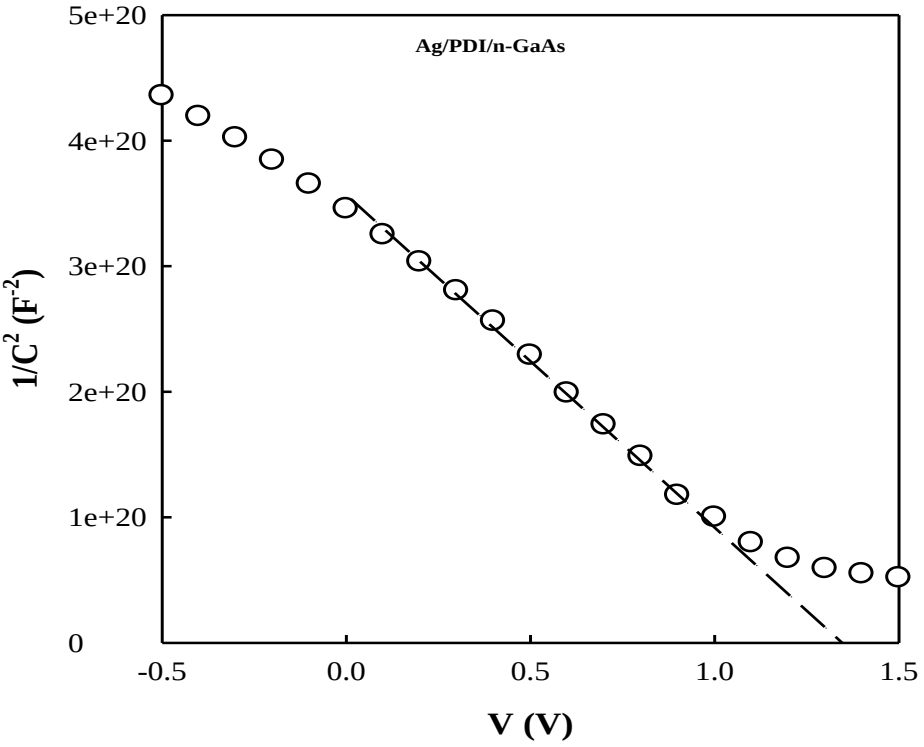
de alınan sığa-gerilim karakteristiklerinden engel yüksekliğini 1,42 *eV* ve akım-gerilim karakteristiklerinden engel yüksekliğini 0,82 *eV* olarak hesaplamışlar. *C-V* ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliği ile *I-V* den hesaplanan değerden büyük olması, ara yüzeydeki düzensizliklerle açıklanabilir. Ayrıca donor veya akseptör yoğunluğunun bu tip organik Schottky diyotlarda $10^{10}-10^{19}\ cm^{-3}$ aralığında değerler aldığı bilinmektedir. Buna göre Ag/PDI/n-GaAs Schottky diyotu için bulunan donor yoğunluğu literatüre uygun çıkmıştır. Sığa-gerilim karakteristiklerinden elde edilen diyota ait birçok parametre Çizelge 4.2 de verilmiştir.




**Şekil 4.8.** Ag/PDI/n-GaAs Schottky diyotu için C-V ve grafiği.

**Çizelge 4.2.** Ag/PDI/n-GaAs engel diyotu için C-V karakteristiklerinden elde edilen diyota ait bazı parametreler

| $N_d\ (cm^{-3})$ | $E_F\ \left(\frac{V}{cm}\right)$ | $V_{bi}$(V) | $\phi_B(eV)$ | $\Delta\phi_B(eV)$ | $W_d\ (cm)$ | $E_{max}$ (V/cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $4.282x10^{13}$ | 0.272 | 1.405 | 1.69 | $6.866x10^{-3}$ | $6.9 \times 10^{-4}$ | $4.072x10^{3}$ |




**Şekil 4.9.** Ag/PDI/n-GaAs Schottky diyotu için $C^{-2} - V$ grafiği.

$W_d$ tüketim tabakası genişliği iyonize donor yoğunluğundan $N_d$ ve built-in potansiyelinden hesaplanabilir.

$$W_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_s}{qN_d}(V_{bi} - V)} \tag{4.16}$$

Burada $V$ uygulanan potansiyel olup ters beslem durumunda negatif, doğru beslem durumunda pozitif işaretini almaktadır. Sıfır beslemdeki Schottky ara yüzeyi için maksimum alan (maksimum engel alanı),

$$E_{max} = \frac{2V_{bi}}{W_d} \tag{4.17}$$

ifadesi ile verilir (El-Nahass ve ark., 2005).

Ag/PDI/n-GaAs Schottky diyotu için sığa-gerilim karakteristiklerinden ve $1\,MHz$ frekansında hesaplanan tüketim tabakası genişliği Denk (4.16)'dan $6.9 \times 10^{-4} cm$ olarak tayin edilmiştir. Oda sıcaklığındaki numune için $E_{max}$ değeri ise $4.072 \times 10^3\ V/cm$ değerinde bulunmuştur.

# 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Ag/PDI/n-GaAs Schottky diyodların elektriksel karekterizasyonu sıcaklığa bağlı olarak ayrıntılı bir şekilde yapılmıştır. Bu Schottky diyod numunelerinin, hazırlanmasında (100) doğrultuda büyütülmüş, yaklaşık olarak 500 μm kalınlığında ve 1-20 Ω-cm özdirence sahip Tellür katkılı n-tipi GaAs (n-GaAs) kristali kullanılmıştır. Hazırlanan bu Ag/PDI/n-GaAs organik arayüzeyli Schottky diyotların, akım-gerilim (*I-V*) karakteristikleri 75 –350 K aralığında ve sığa-gerilim (*C-V*) karakteristikleri ise oda sıcaklığında ve 1 Mhz frekansta incelendi. Bu incelemelerden idealite faktörü, engel yüksekliği, seri direnç, donor yoğunluğu gibi diyota ait birçok parametre hesaplandı.

Akım-gerilim karakteristikleri geniş bir sıcaklık aralığında (75–350 K) alınıp, sıcaklıkla değişimleri yorumlanmıştır. Burada Ag/PDI/n-GaAs Schottky diyodunun artan sıcaklıkla daha iyi bir doğrultucu özellik gösterdiğidir. Böylece akımın, sıcaklıkla üstel olarak arttığı gözlemlenmiştir. Ancak burada 75 K'den daha düşük sıcaklıklarda ölçüm yapılmamıştır. Diyodun daha düşük sıcaklıklarda farklı bir yönelim gösterebileceği tahmin edilmektedir. Hazırlanan bu yapıların elektriksel karakteristiklerinin termiyonik emisyon teorisinden sapma gösterdiği gözlendi. Potansiyel engel yüksekliği sıcaklığın artışı ile artarken, idealite faktörünün ise sıcaklığın artışı ile azaldığı ve tüm sıcaklıklar için değerinin 1 den büyük olduğu gözlendi. Bu Schottky diyod parametrelerinin tayininde kullanılan klasik termiyonik emisyon teorisinden sapmalarının nedeni, metal/yarıiletken ara yüzeyindeki yüzey ve engel homojensizlikleri ile yalıtkan/yarıiletken arasındaki ara yüzey durumlarından kaynaklanmaktadır.

Araştırmacılar düşük sıcaklıklarda Ag/PDI/n-GaAs Schottky diyotun akım-gerilim karakteristiklerini inceleyip diyotun bu farklı davranışını yorumlayabilirler. Ayrıca I-V karakteristiklerinden hesaplanan idealite faktörü değerleri sıcaklık artışıyla 1'e yaklaşmakta olup yaklaşık ideal diyot davranışı göstermektedir. Burada diyod, 350 K sıcaklığında ideal diyot davranışına en uygun durumda olduğu gözlemlenmiştir. Hem akım-gerilim ölçümlerinden hem de Cheung-Cheung metoduyla hesaplanan idealite faktörü, engel yüksekliği değerlerinin uyum içinde olduğu görülmektedir. Bu durum, yapılan ölçüm ve hesaplamaların doğruluğunu kanıtlamaktadır. Yine Cheung-Cheung fonksiyonlarından hesaplanan seri direncin sıcaklıkla azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, idealite faktörünün sıcaklıkla azalmasına bağlı olarak gerçekleşmektedir.

Öte yandan, hazırlanan diyodun ara yüzey durumlarını incelemek için sığa-gerilim karakterizasyonu yapılmıştır. Sığa değerinin düşük gerilim değerlerinde gerilimle daha yavaş artarken yüksek gerilim değerlerinde bu artış daha keskin olmaktadır. C-V ölçümlerinden engel yüksekliği, taşıyıcı yoğunluğu gibi diyota ait birçok parametre hesaplanmıştır. Taşıyıcı yoğunluğunun ara yüzey malzemesi olarak organik malzeme kullanımına bağlı olarak beklenilen aralıkta olduğu görülmektedir (Şimşir ve ark., 2012).

Sonuç olarak perylene-diimide organik yarıiletkeni ile modifiye edilmiş diyotun elektriksel karakterisazyonu yapılmış diyot parametreleri elde edilmiştir. Bu ölçümlerden diyotun ideal davranış sergilediği görülmektedir.

Bundan sonraki aşamalarda, organik yarıiletken malzemenin kalınlığına bağlı olarak değişimler incelenebilir. Ayrıca, bu organik malzeme ile farklı kontak malzemelerinin kullanıldığı diyod yapılar incelenebilir. İncelenebilecek bir diğer yapı ise, perylene-diimide yarıiletkeninin, farklı alt taş yarıiletken malzemeler ile kullanılması olabilir.

**KAYNAKLAR**

Ambrico, M., Losurdo, M., Capezzuto, P., Bruno, G., Ligonzo, T., Schiavulli, L., Farella, I., Augelli, V., 2005, *Solid State Electronics*, **49**, 413-419.

Aydın, M. E., Soylu, M., Yakuphanoğlu, F., Farooq W. A., 2011, Controlling of electronic parameters of GaAs Schottky diode by poly(3,4-ethylenedioxithiophene)-block-poly(ethylene glycol) organic interlayer, *Microelectronic Engineering*, **88**, 867-871.

Aydoğan, Ş., İncekara, Ü., Deniz, A. R., Türüt, A., 2010, Extraction of electronic parameters of Schottky diode based on an organic Indigotindisulfonate Sodium (IS), *Solid State Communications*, **150**, 1592-1596.

Aydoğan, Ş., İncekara, Ü., Deniz, A.R., Türüt, A., 2010, Extraction of electronic parameters of Schottky diode based on an organic Orcein, *Microelectronic Engineering*, **87**, 2525-2530.

Aydoğan, Ş., İncekara, Ü., Türüt A, 2010, Determination of contact parameters of Au/Carmine/n-Si Schottky device, *Thin Solid Films*, **518**, 7156-7160.

Balkanski, M., Wallis, R. F., 2000, Semiconductor Physic and Applications , *Oxford Unv. Press*, New York.

Bengi, A, Altındal, S, Özçelik, S., Mammadov, T.S., 2007, Gaussian distribution of inhomogeneous barrier height in Al0.24Ga0.76As/GaAs structures , *Physica B: Condensed Matter*, **396**, 22-28.

Bose, J.C., 1904, U.S. Patent, 775. 840.

Braun, F., 1874, Über die Stromlcitung durch Schwefelmetalle, *Ann. Physik Chem*., **153**, 556-563.

Brütting, W., 2005, Physics of organic semiconductors, *Wiley-Vch-Verlag*, Weinheim.

Card, H.C., Rhoderick, E.H., 1971, Studies Of Tunnel MOS Diodes I. Interfaces Effects In Silicon Schottky Diodes, *J.Phys.D:Appl. Phys.*, **4**, 1589-1601.

Chand, S., Kumar, J., 1996, On the existence of a distribution of barrier heights in $Pd_2Si$/Si Schottky diodes, *Journal Applied. Physics*, **80**, 288-292.

Cheung, S. K., Cheung, N. W., 1986, Extraction of schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics, *Applied Physics Letters*, **49**, 85-87.

Crowell, C. R., Sze, S. M., 1966, Current Transport in Metal-Semiconductot Barriers , *Solid State Electron*, **9**, 1035-1048.

El-Nahass, M. M., Zeyada, H. M., Aziz, M. S., El-Ghamaz, N. A., 2005, Carrier transport mechanisms and photovoltaic properties of Au/p-ZnPc/p-Si solar cell, *Solid-State Electronics*, **49**, 1314-1319.

Gupta, R. K., Singh, R. A., 2004, Schottky diode based on composite organic semiconductors, *Materials Science in Semiconductor Processing*, **7**, 83-87.

Gupta, R. K., Singh, R. A., 2005, Fabrication and characteristics of Schottky diode based on composite organics semiconductor, *Composites and Science and Technology*, **65**, 677-681.

Güllü, Ö., Asubay, S., Aydoğan, Ş., Türüt, A., 2010, Electrical characterization of the Al/new fuchsin/n-Si organic-modified device, *Physica E*, **42**, 1411-1416.

Henisch, H. K., 1984, Semiconductor Contacts ,*Celerondon Press*, New York.

Karataş, Ş., Altındal, Ş.,2005, *Materials Science and Eng.B*, **122**, 133-139.

Karataş, Ş., Altındal, Ş., 2005, *Solid State Electronics*, **49**, 1052-1054.

Kittel, C., 1996, Katıhal Fiziğine Giriş, Çev: B. Karaoğlu, *Güven Kitap Yayın Dağıtım,* İstanbul.

Korucu, D., Efeoğlu, H., Türüt, A., 2012, Evaluation of Lateral Barrier Height Of Inhomogeneous, photolithography-fabricated Au/n-GaAs Schottky Barrier Diodes Form 80 K to 320 K, *Materials Science In Semiconductor Processing*, **15**, 480-485.

Kuş, M., 2006, Sıvı özellikli Perilendimidlerin sentezi ve organik fotosensörlerin fotofiziksel fotokimyasal parametrelerinin incelenmesi, Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.

Kutluca, H., 2007, Schottky diyotların elektriksel karakteristiklerinin sıcaklığa incelenmesi, Yüksek lisans tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

Li, S. S., 2006, Semiconductor Physical Electronics, *Springer*, New York.

Milnes, A. G., Feucht, D. L., 1972, Heterojunctions and Metal-Semiconductor Jonction, *Academic Press Inc*., New York.

Mott, N. F., 1938, Note on the Contact Between a Metal and an Insulator or Semiconductor, *Proc. Camb .Phil. Soc*., **34**, 568-572.

Nalçacıgil, Z., 2011, Perylene Türevi Organik Yarıiletken İnce Filimlerin Optik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Ün. Fen Bilimleri Enstitüsü,* Konya.

Neaman, D. A., 2003, Semiconductor Physical and Devices, *Mc Graw Hill*, New York.

Okur, S., Yakuphanoğlu, F., Özsöz, M., Kadayıfçılar, P. K., 2009, Electrical and interface properties of Au/DNA/n-Si organic-on-inorganic structures, *Microelectronic Engineering*, **86**, 2305-2311.

Rhoderick, E. H., Williams R. H., 1988, Metal Semicondutor Contacts , *Clarendon Press*, New York.

Rockett, A., 2008, The materials science of semiconductors, *Springer-Verlag*, New York.

Schottky, W., 1938, Halbleitertheorie der Sperrschicht, *Naturwissenschaften*., **26**, 843-843.

Schroder, D. K., 2006, Semiconductor Material and Device Charakterization , *John Wiley and Sons Inc.,* New Jersey.

Sharma, B. L., 1984, Metal-Semiconductor Shottky Barrier Junction and Their Applications, *Plenum Press*, New York.

Shuer, M.,1990, Physics of Semiconductor Devices, *Prentice-Hall, Int.Inc.*, New Jersey.

Şimşir, N., Şafak, H., Yüksel, Ö. F., 2012, Investigation Of Current-Voltage Characteristic Of Ag/Perylene-monoimide/n-GaAs Schottky Diode, *Current Applied Physics*, **12**, 1510-1514

So, F., 2010, Organic Electronics; Materials, Processing, Devices and Applications, *CRC Press*, Boca Raton.

Soylu, M., 2007, Au/n-InP ve Au/Pyronine-B/n-InP Schottky yapıların sıcaklığa bağlı elektriksel karakterizasyonu, Doktora tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum.

Sze, S. M., 1981, Physics of Semiconductor Devices , 2nd Ed., *John Wiley*, New York.

Tugluoglu, N., Karadeniz, S., 2012, Analysis Of Current-Voltage and Capacitans-Voltage Characteristics Of Perylene-monoimide/n-Si Schottky Contacs, *Current Applied Physics*, **12**, 1529-1535.

Tunc, T., Gokcen, M., 2012, Prepartion and Electrical Characteristion Of Au/n-Si (110) Sucructure With PVA-Nickel Acetate Composite Film Interfacial Layer, *Journal Of Composite Materials*, **46**, 2843-2850.

Wang, C.C., Huang, H. K., Wang,Y. H., Houng, M. P., Wu, C. L., Chang, C. S., 2004, *Solid State Electronics*, **48**, 1683-1686.

Wilson, A.H., 1931, The Theory of Electronic Semi-Conductor, Proc. Roy. Soc. A, **133**, 458-491.

Yahia, I. S., Farag A. A., Yakuphanoğlu, F., Farooq, W. A., 2011, Temperature dependence of electronic parameters of organic Schottky diode based on fluorescein sodium salt, *Synthetic Metals*, **161**, 881-887.

Yakuphanoğlu, F., Okur, S., 2010, Analysis of electronic parameters and interface states of boron dispersed triethenolemine/p-Si structure by AFM, I-V, C-V-f and G/w-V-f techniques, *Mikroelectronic Engineering*, **87**, 30-34.

Yüksel, Ö. F., Kuş, M., Şimşir, N., Şafak, H., Şahin, M., Yenel, E., 2011, A detailed analysis of current-voltage characteristics of Au/perylene-monoimide/n-Si Schottky barrier diodes over a wide temperature range, *Journal of Applied Physics*, **110**, 024507.

Yüksel, Ö. F., Tuğluoğlu, N., Şafak, H., Kuş, M., 2013, The motification of Schottky barrier height of Au/p-Si Schottky devices by perylene-diimide, *Journal of Applied Physics*, **113**, 044507.

Zafer, C., 2006, Organik boya esaslı nanokristal yapılı ince film güneş pili üretimi, Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.

Ziel, A.V., 1968, Solid State Physical Electronics, *Prentice Hall Inc,*. New Jersey.

# ÖZGEÇMİŞ

## KİŞİSEL BİLGİLER


| | | |
|---|---|---|
| **Adı Soyadı** | **:** | Feza BOY |
| **Uyruğu** | **:** | T. C. |
| **Doğum Yeri ve Tarihi** | **:** | Kulu 09.01.1972 |
| **Telefon** | **:** | 505 355 85 15 |
| **Faks** | **:** | |
| **e-mail** | **:** | fezaboy@yahoo.com |


## EĞİTİM

| **Derece** | | **Adı, İlçe, İl** | **Bitirme Yılı** |
|---|---|---|---|
| Lise | : | Fatih Teknik End. Mes. ve Teknik Lisesi | 1989 |
| Üniversite | : | S.Ü. Fen-Edebiyat Fak. | 1994 |
| Yüksek Lisans | : | Selçuk Üniversitesi | Devam Ediyor |
| Doktora | : | | |

## İŞ DENEYİMLERİ

| **Yıl** | **Kurum** | **Görevi** |
|---|---|---|
| 1995-D. Ediyor | M E B | Öğretmen |

## UZMANLIK ALANI

Fizik, Elektronik

## YABANCI DİLLER

İngilizce

## BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

## YAYINLAR

"Detailed current-voltage and capacitive-voltage characteristics of Ag/PDI/n-GaAs Schottky diodes" başlıklı bir makale çalışması hazırlanmaktadır.