

**Au/Antrasen/n-Si/Al SCHOTTKY DİYODUN
TEMEL KARAKTERİSTİK PARAMETRELERİNİN
SICAKLIĞA BAĞLI I - V (AKIM-VOLTAJ) ve C - V
(KAPASİTE-VOLTAJ) ÖLÇÜMLERİNDEN
TAYİN EDİLMESİ**

Hatice KAÇUŞ

**Yüksek Lisans Tezi
Fizik Anabilim Dalı
Katıhal Fiziği Bilim Dalı
Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN
2014**

Her hakkı saklıdır

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Au/Antrasen/n-Si/Al SCHOTTKY DİYODUN TEMEL
KARAKTERİSTİK PARAMETRELERİNİN SICAKLIĞA BAĞLI
I-*V* (AKIM-VOLTAJ) ve *C*-*V* (KAPASİTE-VOLTAJ)
ÖLÇÜMLERİNDEN TAYİN EDİLMESİ**

Hatice KAÇUŞ

FİZİK ANABİLİM DALI
Katıhal Fiziği Bilim Dalı

ERZURUM
2014

Her Hakkı Saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**Au/Antrasen/n-Si/Al SCHOTTKY DİYODUN TEMEL KARAKTERİSTİK
PARAMETRELERİNİN SICAKLIĞA BAĞLI I-V (AKIM-VOLTAJ) ve C-V
(KAPASİTE-VOLTAJ) ÖLÇÜMLERİNDEN TAYİN EDİLMESİ**

Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN danışmanlığında, Hatice KAÇUŞ tarafından hazırlanan bu çalışma 26/06/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği/oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN

İmza :

Üye : Doç. Dr. Emre GÜR

İmza :

Üye : Doç. Dr. Duygu EKİNCİ

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 03../07/2014 tarih ve 27. / 832... nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Atatürk üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP) kapsamında desteklenmiştir.

Proje No: 2013/312

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

Au/Antrasen/n-Si/Al SCHOTTKY DİYODUN TEMEL KARAKTERİSTİK PARAMETRELERİNİN SICAKLIĞA BAĞLI I-V (AKIM-VOLTAJ) ve C-V (KAPASİTE-VOLTAJ) ÖLÇÜMLERİNDEN TAYİN EDİLMESİ

Hatice KAÇUŞ

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı
Katıhal Fiziği Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN

Bu çalışmada n-tipi Si yarıiletkeni üzerine antrasen organik malzemesi ile oluşturulmuş kontağın karakteristikleri çalışıldı. Organik arayüzeyli Schottky diyodun üretiminde (100) doğrultusunda, 400 µm kalınlığında ve 1-10Ω-cm öz dirence sahip n-Si kullanıldı. Değişen sıcaklık aralıklarında (300K-180K) akım-gerilim ve kapasite-gerilim ölçümleri kullanılarak diyodun karakteristik parametreleri elde edildi. Oda sıcaklığında Au/ Antrasen /n-Si/Al yapısının idealite faktörü ve engel yüksekliği değeri I-V karakteristiğinden 1.80 ve 0.87 elde edildi. Ayrıca aynı yöntemle yapılan Au/n-Si/Al referans numunesinin I-V ölçümleri laboratuvar sıcaklığında değerlendirildi. Seri direnç (R_s) değerleri Cheung fonksiyonları ve Norde fonksiyonları yardımıyla bulundu. Cheung fonksiyonlarından elde edilen kontak parametreleri ile Norde fonksiyonundan elde edilen kontak parametreleri karşılaştırıldı. Bu metotlardan elde edilen engel yüksekliklerinin artan sıcaklık değerleriyle lineer olarak arttığı gözlemlendi. Sıcaklığa bağlı arayüzey hal yoğunluğunun, arayüzey hal enerjisine karşı değişimi gösterildi. Her sıcaklık değerinde artan arayüzey hal enerjisi ile arayüzey hal yoğunluğunun azaldığı görüldü. Ayrıca I-V ölçümlerinden yararlanılarak modifiye edilmiş Richardson eğrisi çizildi. Bu eğriden elde edilen Richardson sabiti değeri $A^*=3.2 \cdot 10^{-9} A/K^2 cm^2$ olarak bulundu. Ayrıca antrasen ince filminin enerji band aralığı 1,65 eV olarak hesaplandı. Diyodun ters beslem $1/C^2$ -V karakteristiklerinden difüzyon potansiyeli, fermi enerji seviyesi, engel yüksekliği, donör konsantrasyonu değerleri elde edildi. C-V ölçümlerinden bulunan engel yüksekliği değeri I-V ölçümlerinden bulunan engel yüksekliği değerinden daha büyük olarak bulundu. Bu iki değer arasındaki uyumsuzluk artık kapasite veya engelin inhomojenliğine atfedildi. Au/Antrasen /n-Si/Al diyodunun bulunan bütün karakteristik özelliklerine göre MIS (metal-yalıtkan-yarıiletken) davranışı sergilediği gözlemlendi. Ayrıca Sn'nin kontak metali olarak kullanıldığı Sn/Antrasen/n-Si aygıtın da MIS yapısı sergilediği görüldü.

2014, 74 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Schottky diyot, metal/organik/yarıiletken kontak, Antrasen

ABSTRACT

INDICATION OF BASIC CHARACTERISTIC PARAMETERS OF Au/Anthracene/n-Si/Al SCHOTTKY DIOD DEPENDENT ON HEAT CURRENT- VOLTAGE (*I-V*) and CAPACITY-VOLTAGE (*C-V*) MEASUREMENTS

Hatice KAÇUŞ

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics
Department of Solid State Physics

Supervisor: Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN

In this study, the characteristics of the contact formed with anthracene organic material over n-type Si semiconductor were studied. In the production process of Schottky diode with organic interface, n-Si with the direction of (100), the thickness of 400 μm and the 1-10 Ωcm resistivity was used. The characteristic parameters of the diode were obtained by being used current-voltage and capacity-voltage measurements within the different temperature intervals (300K-180K). The ideality factor and barrier height value of the Au/ Anthracene /n-Si/Al within the *I-V* characteristic were calculated as 1.80 and 0.87 eV in the room temperature. In addition, the *I-V* measurements of the reference sample of the Au/n-Si/Al fabricated with the same method were evaluated in the laboratory temperature. The values of the serial resistance (R_s) were found with Cheung and Norde functions. The contact parameters obtained from the Cheung functions were compared with the contact parameters obtained from the Norde functions. It was observed that the barrier heights increased in a linear way with the ascending temperature values. The alteration of the interface station density connected to the temperature towards the interface station energy was shown. In each temperature value, it was seen that while the interface station energy was increasing, the interface station density was decreased. In addition, the modified Richardson curve formed with the help of *I-V* measurements was drawn. The Richardson constant value obtained from this curve was found as $A^*=3.2 \cdot 10^{-9} \text{A/K}^2 \text{cm}^2$. The energy band interval of the athracene thin film was calculated as 1.65 eV. the values of the diffusion potential of the reverse bias $1/C^2$ -*V* characteristics of the diode, the level of fermi energy, barrier height and donor contractions wee obtained. The value of the barrier height found from the *C-V* measurements was higher than the value found from *I-V* measurements. This discrepancy between two values might be described with the residual capacity or the inhomogeneity of the barrier. The obtained all features of the Au/ Anthracene /n-Si/Al diode's characteristics showed similar MIS' features (metal, insulator, semiconductor). Also Sn/Antrasen/n-Si diode's characteristics showed similar MIS' features.

2014, 74 Pages

Keywords: Schottky diode, metal/organic/semiconductor contract, Anthracene

TEŞEKKÜR

Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma, Fen Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyelerinden Sayın Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN danışmanlığında gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarım boyunca desteğini gördüğüm, bilgilerinden yararlandığım değerli hocam Sayın Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN'a teşekkürlerimi arz ederim.

Laboratuvar çalışmalarım süresince kıymetli vakitlerini harcayan Sayın Arş. Gör. Ali Rıza DENİZ'e ve Sayın Zakir ÇALDIRAN'a teşekkürlerimi sunarım. Numunelerin elektrokimyasal kaplamaları aşamasında hiçbir yardımını esirgemeyen saygı değer hocam Sayın Doç. Dr. Duygu EKİNCİ'ye sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu günlere gelmemde büyük rolü olan annem ve babama en derin sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Hatice KAÇUŞ

Haziran, 2014

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	7
2.1. Metal/Yarıiletken Kontaklar.....	7
2.1.1. Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar	7
2.1.2. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontaklar	11
2.2. Metal (Omik) / n-Tipi Yarıiletken / Metal (Schottky) Yapısı	13
2.3. Schottky Diyotlarında Termoionik Emisyonla Akım İletimi.....	14
2.4. Tünelleme Eklemleri	15
2.5. Metal-Yarıiletken Schottky Diyotlarda Arayüzey Tabakasının Etkileri	15
2.6. Seri Direncin Etkisi	17
2.7. Cheung Fonksiyonları ile Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi	19
2.8. Norde Fonksiyonları ile Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi	21
2.9. Metal–Yarıiletken Schottky Diyotların Engel Kapasitesi	25
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	30
3.1. Giriş	30
3.2. n-Si Kristalinin Temizlenmesi ve Numunenin Hazırlanması.....	30
3.3. Elektrokimyasal Kaplama İşlemi	32
3.3.1. Elektrokimyasal cihaz	32
3.3.2. Elektrot yüzeylerinin modifikasyonu	33
3.3.3. Antrasendiazonyum tuzunun sentezi.....	33
3.4. Antrasenin UV–vis soğurma spekturumu	35
3.5. Antrasen ince filminin enerji band aralığının belirlenmesi	36
3.6. Deney ve Ölçüm Sistemi	37

4. ARAŞTIRMA BULGULARI	39
4.1. Giriş	39
4.2. I-V (Akım-Voltaj) Ölçümleri ve Cheung Fonksiyonlarının Kullanılması	39
4.3. I-V (Akım-Voltaj) Ölçümleri ve Norde Fonksiyonlarının Kullanılması	52
4.4. Arayüzey Hâl Yoğunluğu	56
4.5. C-V (Kapasite-Voltaj) Ölçümleri ve Yapılan Hesaplamalar	57
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	68
5.1. Sıcaklığa Bağlı I-V Ölçümleri	68
5.2. Sıcaklığa Bağlı C-V Ölçümleri	70
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ	75

SİMGELER DİZİNİ

A	Diyodun etkin alanı
A^*	Richardson sabiti
A^{**}	Diyodun etkin Richardson sabiti
β	Engel yüksekliğinin sıcaklık ile değişim katsayısı
C	Kapasite
E_c	İletkenlik bandının tabanı (minimumu)
E_f	Fermi enerji seviyesi
E_g	Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
E_{ss}	Arayüzey hallerinin enerjisi
E_v	Valans bandının tepesi(maksimumu)
E'_c	Metal içindeki termoiyonik emisyon için gerekli minimum enerji
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
$f_F(E)$	Fermi-Dirac ihtimaliyet fonksiyonu
$g_c(E)$	İletkenlik bandındaki hal yoğunluğu
h	Planck sabiti
I	Akım
I_0	Satürasyon akımı
J	Akım yoğunluğu
$J_{m \rightarrow s}$	Metalden yarıiletkene doğru akan akım yoğunluğu
J_{sT}	Ters-doyma akım yoğunluğu
$J_{s \rightarrow m}$	Yarıiletkenden metale doğru akan akım yoğunluğu
J_T	a.c. tünel akımı
k	Boltzmann sabiti
m_e	Elektronun kütlesi
n	İdealite faktörü
n^{++}	aşırı katkılı n tipi yarıiletken

N_d	Donor konsantrasyonu
N_{ss}	Yarıiletkenle dengede olan hal yoğunluğu
N_v	Yarıiletkenin valans bandındaki hal yoğunluğu
σ	Arayüzey hallerinin tesir kesiti
Φ_b^j	Düz beslem gerilimine bağlı olarak I - V ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliği
Φ_b^c	Kapasite voltaj ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliği
$\rho(x)$	Konuma bağlı uzay yükü yoğunluğu
$\bar{\Phi}_b$	Ortalama engel yüksekliği
σ_i	Standart sapma
$\Psi(x)$	Yüzey potansiyeli
τ	Zaman sabiti
Φ_b	Schottky engel yüksekliği
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
χ_s	Yarıiletkenin elektron ilgisi
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
Q	Birim alan başına düşen yük yoğunluğu
q	Elektronun yükü
p^{++}	aşırı katkılı p tipi yarıiletken
p_i	Asal taşıyıcı konsantrasyonu
R_m	Tünelleme direnci
R_s	Seri direnç
T	Sıcaklık
V_{dif}	Difüzyon potansiyeli
V_x	Enerjinin taşınma yönündeki hızı
w	Uzay yükü bölgesinin genişliği
δ	Metal ile yarıiletken arasındaki oksit tabakanın kalınlığı
ρ_i	Voltaj katsayısı
τ_r	Elektronların bu bölgeyi geçmesi için gerekli zaman

Kısaltmalar

$C-V$	Kapasite-gerilim
IC	Integrated Circuit (Tümleşik Devre)
$I-V$	Akım-gerilim
SCLC	Space Charge Limited Current
TE	Termoiyonik Emisyon
MIS	Metal- Yalıtkan- Yarıiletken
$F(V,\gamma)$	Norde fonksiyonu
a.c	Alternatif akım
d.c.	Doğru akım

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Metal/ <i>n</i> -tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontak.....	9
Şekil 2.2. Düz ve ters beslem altındaki Metal/ <i>n</i> -tipi yarıiletken doğrultucu kontak	10
Şekil 2.3. Metal/ <i>n</i> -tipi yarıiletken omik kontak	12
Şekil 2.4. Düz ve ters beslem altındaki Metal/ <i>n</i> -tipi yarıiletken omik kontak	12
Şekil 2.5. Termal dengede <i>n</i> -tipi Schottky diyodunun enerji band diyagramı	13
Şekil 2.6. Metal/yarıiletken kontakta seri direncin etkisi	18
Şekil 2.7. Metal <i>n</i> -tipi yarıiletken doğrultucu kantağın, (a) potansiyel dağılımı, (b) yük dağılımı	29
Şekil 3.1. Buharlaştırma ünitesi	31
Şekil 3.2. Tavlama fırını	32
Şekil 3.3. Si elektrot yüzeylerinin kaplandığı elektrokimyasal hücrenin şematik gösterimi.	33
Şekil 3.4. Antrasendiazonyum tuzunun kimyasal sentezi ve Si elektrot yüzeylerinin elektrokimyasal modifikasyonu.....	34
Şekil 3.5. Au/Antrasen/ <i>n</i> -Si/Al diyodunun kesit görüntüsü	35
Şekil 3.6. Aminoantrasen ve yarıiletkenin yüzeyine bağlı antrasenin UV–vis soğurma spektrumu	36
Şekil 3.7. Antrasen ince filminin oda sıcaklığında ($\alpha h\nu$) ² 'nin $h\nu$ 'ye karşı grafiği	37
Şekil 3.8. Akım-voltaj ve kapasite-voltaj ölçüm sistemi	38
Şekil 3.9. LakeShore 340 sıcaklık kontrol ünitesi	38
Şekil 4.1. Au/Antrasen/ <i>n</i> -Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı <i>I</i> - <i>V</i> grafiği	42
Şekil 4.2. Referans Au/ <i>n</i> -Si/Al ve Au/Antrasen/ <i>n</i> -Si/Al diyotlarına ait <i>I</i> - <i>V</i> grafiği	43
Şekil 4.3. Au/Antrasen/ <i>n</i> -Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı <i>I</i> - <i>V</i> grafiğinden elde edilen idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerinin sıcaklıkla değişimi..	45
Şekil 4.4. Au/Antrasen/ <i>n</i> -Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı $dV/d(\ln I)$ – <i>I</i> grafiği	46
Şekil 4.5. Au/Antrasen/ <i>n</i> -Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı <i>H(I)</i> – <i>I</i> grafiği	47
Şekil 4.6. Au/Antrasen/ <i>n</i> -Si/Al diyoduna ait Cheung fonksiyonlarından elde edilen seri direnç değerlerinin sıcaklıkla değişimi	48

Şekil 4.7. Au/Antrasen/n-Si/Al diyodunun geleneksel metot ve Cheung fonksiyonları ile hesaplanan idealite faktörlerinin sıcaklığa karşı değişimi.....	49
Şekil 4.8. Au/Antrasen/n-Si/Al diyodunun geleneksel metot ve Cheung fonksiyonları ile hesaplanan engel yüksekliklerinin sıcaklığa karşı değişimi	50
Şekil 4.9. Au/Antrasen/n-Si/Al Schottky diyodunun $\ln(I_0/T^2)$ 'nin $1/T$ 'ye karşı çizilen modifiye edilmiş Richardson grafiği	52
Şekil 4.10. Au/Antrasen/n-Si/Al Schottky diyodunun Norde fonksiyonu grafiği	54
Şekil 4.11. Au/Antrasen/n-Si/Al Schottky diyodunun TE, Cheung ve Norde metotları kullanılarak elde edilen engel yüksekliklerinin sıcaklığa karşı değişimi	56
Şekil 4.12. Au/Antrasen/n-Si/Al Schottky diyodunun arayüzey hal yoğunluğunun arayüzey hal enerjisine karşı değişimi	57
Şekil 4.13. Au/n-Si/Al ve Au/Antrasen/n-Si/Al diyotlarının laboratuvar sıcaklığında $f=500$ kHz sabit frekansta düz ve ters beslem durumunda C-V grafiği	61
Şekil 4.14. Au/Antrasen/n-Si/Al diyoduna ait $f=500$ kHz sabit frekansta sıcaklığa bağlı düz ve ters beslem durumunda C-V grafiği.....	62
Şekil 4.15. Au/Antrasen/n-Si/Al diyoduna ait $f=500$ kHz sabit frekansta sıcaklığa bağlı ters beslem durumunda C-V grafiği	63
Şekil 4.16. Au/Antrasen/n-Si/Al diyoduna ait $f=500$ kHz sabit frekansta farklı sıcaklıklarda $1/C^2$ -V grafiği.....	64
Şekil 4.17. Au/Antrasen/n-Si/Al diyoduna ait $(1/C^2 - V)$ karakteristiğinden $f=500$ kHz sabit frekansta Fermi enerji seviyesinin sıcaklıkla değişimi	65
Şekil 4.18. Sn/Antrasen/n-Si diyoduna ait 500 kHz'deki, ± 0.4 V gerilim aralığındaki kapasite-gerilim karakteristiği.....	67

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Referans Au/n-Si/Al diyoduna ait I - V grafiğinden elde edilen temel diyot parametreleri	43
Çizelge 4.2. Au/Antrasen/n-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı I - V grafiğinden elde edilen temel diyot parametreleri	44
Çizelge 4.3. Au/Antrasen/n-Si/Al diyodunun Norde fonksiyonları kullanılarak elde edilen temel diyot parametreleri	55
Çizelge 4.4. Au/Antrasen/n-Si/Al diyoduna ait $f=500$ kHz sabit frekansta sıcaklığa bağlı $(1/C^2-V)$ değişimlerinden elde edilen temel diyot parametreleri	65
Çizelge 4.5. Au/n-Si/Al referans diyoduna ait $f=500$ kHz sabit frekansta sıcaklığa bağlı $(1/C^2-V)$ değişimlerinden elde edilen temel diyot parametreleri	66
Çizelge 5.1. Sıcaklığa bağlı arayüzey hal yoğunluğunun arayüzey hal enerjisine karşı değişimi	70

1. GİRİŞ

Geçtiğimiz yüzyılın başından günümüze kadar geçen süreçte önemi giderek artan ve üzerinde hala teorik ve deneysel çalışmaların yapıldığı Schottky diyotların endüstriyel açıdan yeri ve önemi tartışılmazdır. Neredeyse bütün elektronik cihazlarda kullanılan bu devre elemanları aynı zamanda güneş pillerinde, alçak gerilim devrelerinde, karıştırıcı olarak mikrodalga alıcılarında, dedektörlerde, sensörlerde, modülatör ve demodülatör gibi farklı alanlarda kullanılmaktadırlar. Bu yapılarda uygun fiziksel koşullar sağlanarak oluşturulan Schottky engel yüksekliği en önemli parametredir. Bu yüzden son zamanlarda engel yüksekliğini yapay olarak arttırmak için birçok çalışma yapılmaktadır. Bunun için metal ve yarıiletken arası çok ince bir arayüzey tabaka ile çeşitli yöntemlerle kaplanmaktadır. Günümüze kadar yapılan çalışmalarda metal ve yarıiletken arası çeşitli tipte arayüzey tabakaları ile kaplanmıştır. Metal ile yarıiletken arasındaki çok ince arayüzey tabakası, hem metal ve yarıiletkeni birbirinden ayırır hem de yük geçişlerini düzenler. Bu tabakasının kontak parametrelerini önemli derecede etkilediği anlaşılmış ve değişik amaçlar için kullanılmak üzere farklı maddeler kullanılarak üretilen Schottky diyotlar üzerine yapılan çalışmalara doğru eğilim başlamıştır. Genellikle arayüzey tabakası olarak polimer olmayan organik maddeler ve polimer maddeler kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemeler esnek, kolay şekilde hazırlanabilir olmasından ve maliyetin uygun olmasından dolayı en çok tercih edilen malzemelerdir. Bu polimer malzemeler elektriksel, mekanik ve fiziksel özelliklerinden dolayı birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır.

Literatür çalışmaları incelendiğinde Silisyum dioksit (SiO_2) ve kalay dioksit (SnO_2) bugüne kadar kullanılan yalıtkan ince filmlerdir (Karadeniz *et al.* 2004; Kanbur *et al.* 2005). Bu arayüzey yalıtkan malzemelerin iletkenliği düşük, optiksel geçirgenliği ve dielektrik katsayısı yüksektir.

Çeşitli ince film büyütme yöntemleri vardır. Bunlar; püskürtme, buharlaştırma, kimyasal biriktirme, saçtırma ve sol-jel yöntemleri olarak sıralanabilir (Czapla *et al.*

1989; Chatelon *et al.* 1994; Bach and Krause 1997). Bu yöntemlerden; sol-jel yönteminde oluşturulan ince filmlerin optik, yapısal ve elektriksel özelliklerinin kontrolü daha kolay ve daha niteliklidir. Ayrıca kullanılan düzeneğin kurulması daha ekonomiktir.

Organik malzemeler, polimer yarıiletkenler, yarıiletken-metal kompleksler farklı yasak enerji aralığına sahiptirler. Ucuz ve değişik özelliklerinden dolayı devre elemanı yapımına uygundurlar.

Yüksel *et al.* (2013) tarafından yapılan bu çalışmada Au/perylene-monoimide (PMI)/p-Si Schottky diyonu imal edilmiş ve elektriksel ve arayüzey karakteristiklerinin (100-300) K sıcaklık aralığında nasıl değiştiği araştırılmıştır.

Bu yapının elektriksel özellikleri üzerindeki analizler termiyonik emisyon modeli varsayımları tarafından yerine getirilmiştir. Arayüzey durumları, jenerasyon-rekombinasyon süreçleri idealite faktörü değerlerinin sapmasına neden olmuştur. Schottky diyonunun elektronik özellikleri hem sıcaklığa hemde organik arayüzey olan perylene-monoimide modifikasyonuna karşı çok hassas olduğu gözlenmiştir. Artan sıcaklıkla idealite faktörünün azaldığı engel yüksekliğinin arttığı görülmüştür. Bu durum engelin homojensizliğine atfedilmiştir. Bu homojensizlik termiyonik emisyon metoduyla engel yüksekliklerinde Gaussian bir dağılımın varlığıyla açıklanmaya çalışılmıştır.

Al/DNA/p-Si Schottky diyonunun 200-300K sıcaklık aralığında I-V değerleri ölçülmüştür. 300 K ve 200K'de ideal olmayan I-V grafiğinden elde edilen ideal faktörleri sırasıyla 1.34 ve 1.70 olarak hesaplanmış ve bu diyonun metal-arayüzey tabakası-yarıiletken (MIS) yapıya sahip olduğu düşünülmüştür. I-V ölçümlerinden belirlenen sıfır beslemdeki engel yüksekliği 300K'de 0.75 eV ve 200K'de engel yüksekliği 0.61 eV azaltılmıştır. Düz beslemde voltaj-sıcaklık (V_F-T) karakteristikliği 20 nA–6µA arasındaki aktivasyon akımlarında ve 300K-200K arasındaki değişen

sıcaklıklarda I-V ölçümlerinden elde edilmiştir. V_F -T karakteristliğinin 20 nA, 100 nA, 6 μ A üç aktivasyon akımı için lineer olduğu tespit edilmiştir (Güllü *et al.* 2010).

P-tipi Si yarıiletkenini üzerine (PNpClPhPPy) polimeri ile oluşturulmuş kontağın karakteristikleri çalışılmıştır. Polimer arayüzeyli Schottky diodun üretiminde (100) doğrultusunda, 400 μ m kalınlığında ve 1 Ω -cm öz dirence sahip p-Si kullanılmıştır. I-V (akım -gerilim) ve C-V(kapasite- gerilim) ölçümleri kullanılarak diodun karakteristik parametreleri elde edilmiştir. Bütün ölçümler oda sıcaklığında ve karanlıkta gerçekleştirilmiştir. Al/ PNpClPh PPy/p-Si/Al yapısının idealite faktörü ve engel yüksekliği değeri I-V karakteristiğinden 0.78eV ve 1.41 elde edilmiştir. Oda sıcaklığında Al/ PNpClPh PPy /p-Si/Al diodunun idealite faktörü ve engel yüksekliği değeri geleneksel Al/p-Si Schottky diodundan önemli ölçüde büyük bulunmuştur. Seri direnç (R_s) Cheung fonksiyonları ve Norde fonksiyonları yardımıyla bulunmuştur. Cheung fonksiyonlarından elde edilen kontak parametreleri ile Norde fonksiyonundan elde edilen kontak parametreleri karşılaştırılmıştır (Aydın 2010).

P-tipi Si'un üzerine organik film kaplanarak Al/Orange/p-Si yapısı elde edilmiştir. Bu MIS yapı iyi bir doğrultucu davranışa yapıya sahiptir. I-V karakteristliğinin düz beslemi kullanılarak Al/OG/p-Si diodunun engel yüksekliği ve idealite faktörü 0.77 eV ve 1.73 olarak hesaplanmıştır. Al/OG/p-Si diodu için hesaplanan 0.77 eV engel yüksekliği referans Al/p-Si diodu için hesaplanan 0.50 eV engel yüksekliği değerinden oldukça daha geniştir. Bu durum organik OG arayüzey tabakasının Si 'un uzay yük bölgesini etkileyerek engel yüksekliğini arttırdığına atfedilmiştir. MIS diodunun arayüzey durumlarının yoğunluğunun 2.79×10^{13} 'den 5.80×10^{12} $\text{eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ 'ye değiştiği bulunmuştur (Güllü *et al.* 2010).

Al/P₂ClAn(C₂H₅(COOH)(poly(2chloroaniline)))/p-Si/Al diodun engel yüksekliği uygulanan frekansın artmasıyla çok yavaş bir şekilde artmıştır ve uygulanan frekansın büyük değerleri için hemen hemen hiç değişmemiştir. Fermi seviyesi ise frekansın değişiminden hemen hemen hiç etkilenmediğine vurgu yapılmıştır (Aldemir 2010).

Aydoğan *et al.* (2005) tarafından yapılan çalışmada Au/polyaniline/p-Si/Al Schottky diyodunun akım-gerilim karakteristikleri 90 K ile 300 K aralığında incelenmiştir. Engel yüksekliğinin azalan sıcaklıkla azaldığı ve idealite faktörünün ise azalan sıcaklıkla arttığı rapor edilmiştir. Son yıllarda ortaya atılan engel yüksekliğinin homojen olmayışını destekler nitelikte sonuçlar bulunmuştur ve Au/PANI/p-Si/Al yapısının iyi bir doğrultmaya sahip olduğuna vurgu yapılmıştır.

Rao Peta *et al.* (2012) tarafından yapılan çalışmada (Pt/Au)/Ga-polarity GaN/Si(111) Schottky diyodunun elektriksel özelliğinin sıcaklığa bağlılığı (200-375) aralığında I-V (akım-voltaj) karakteristikliği kullanılarak elde edilmiştir. Temel diyot parametreleri olan sıfır beslem Schottky bariyer yüksekliği ve idealite faktörü (n) standart termiyonik emisyon teorisi (TE) kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan engel yüksekliği ve idealite faktörü 200 K için 0,50 eV ve 3,2 bulunmuş 375 K için ise 0,78 eV ve 1,4 bulunmuştur. Cheung metoduyla hesaplanan seri dirençin (R_s) artan sıcaklıkla beraber anormal bir davranış izlediği gözlenmiştir. 200 K deki diyot tarafından sergilenen R_s değeri yaklaşık olarak 534 Ω hesaplandı, 300 K için bu değer 132 Ω olarak hesaplanırken 375 K için ise 154 Ω olarak hesaplanmıştır. Φ_b , n , R_s değerlerinin güçlü bir şekilde sıcaklığa bağlı olduğu gözlenmiştir. Engel yüksekliğinin inhomojenliğinden dolayı engel yüksekliği ve idealite faktörü arasında lineer bir ilişki vardır. Richardson sabiti yaklaşık olarak $5.57 \times 10^{-3} \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$ hesaplanmıştır. Fakat bu değer bilinen n-tipi GaN ($26.4 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$) değerinden çok daha küçüktür. Bu davranış kontak arayüzeyinde engel yüksekliğinin inhomojen olmasına atfedilmiştir. Bu sonuçlar engel yüksekliğinin üzerindeki Gauss dağılımı varsayımları olarak yorumlanmıştır.

Aydoğan *et al.* (2010) tarafından yapılan çalışmada Au/Orcein/p-Si/Al fabrikasyonu yapılmış ve bu diyodun akım -voltaj ölçümleri diyot karakteristikliği göstermiştir. Bu diyodun I-V, C-V, C-f karakteristikleri oda sıcaklığında araştırılmıştır. I-V, C-V karakteristiklerinden idealite faktörü, engel yüksekliği, seri direnç gibi bazı parametreler belirlenmiştir. I-V karakteristikliğinden idealite faktörü 2.48 engel yüksekliği 0.70 eV hesaplanmıştır. Orcein tabakasının Au ve p-Si arasında fiziksel bariyer oluşturduğu için bu yapının etkin engel yüksekliğini arttırdığı gözlenmiştir. Bu

diyodun arayüzeyhal (N_{ss}) yoğunluğu I - V grafiğinden belirlenmiştir. Kapasitans ölçümleri frekans ve voltajın bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Kapasitans değerlerinin frekans ve besleme modifiye edildiği görülmüştür.

Onganer *et al.* (1996) tarafından yapılan çalışmada anodik oksidasyon metodu kullanılarak Polipirolün p-tipi Si üzerine kaplanarak elde edilen Schottky diyodun I - V ve C - V karakteristikleri incelenmiştir. I - V karakteristikliğinden bulunan engel yüksekliği $\Phi_b=0.84\text{eV}$ ve C - V karakteristikliğinden bulunan $\Phi_b=0.94\text{ eV}$ olarak bulunmuştur. Bu Schottky diyodun idealite faktörü $n=1.2$ olarak bulunmuştur. Bu çalışma p-Si'un derin seviyelerinin karakterizasyonu için büyük engel yüksekliğine sahip metalik polipirol/p-Si yapıların kullanılabileceğini göstermiştir.

Aydoğan *et al.* (2010) tarafından yapılan çalışmada Au/Carmin/n-Si Schottky fabrikasyonu yapılmış ve bu yapının oda sıcaklığında I - V ve C - V - f karakteristikleri ölçülmüştür. Bu diyodun iyi bir doğrultucu olduğu I - V karakteristikliğinden görülmüştür. Engel yüksekliği, idealite faktörü, seri direnç, arayüzey hal yoğunluğu gibi parametreler elektiksel ölçümlerden belirlenmiştir. Ayrıca I - V karakteristikliğinin değerlendirilmesinde ve Schottky kontak parametrelerinin elde edilmesinde Cheung fonksiyonları ve Norde metodu kullanılmıştır. Düşük frekanslarda kapasitansın arttığı görülmüştür. Bu durum arayüzey durumlarına atfedilmiştir.

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada n-Si yarıiletken kristali yüzeyine elektrokimyasal yöntemle kaplanan antrasen iletken organik malzemesi kullanılarak elde edilen Au/Antrasen/n-Si/Al Schottky diyodunun 140 K ile 300 K sıcaklık aralığında I - V ve C - V karakteristikleri incelenmiştir. Tez çalışmasının birinci bölümü, konunun önemi ve konu ile ilgili literatür çalışmaları belirten “Giriş” kısmından oluşmaktadır. İkinci bölüm, teorik bilgi içeren “Kuramsal Temeller” den oluşmaktadır. Üçüncü bölüm Au/n-Si/Al ve Au/Antrasen/n-Si/Al diyotların imali için numune hazırlanması, temizlenmesi, elektrokimyasal yöntem, omik ve Schottky kontak yapılışını anlatan “Materyal ve Yöntem” den oluşmaktadır. Dördüncü bölüm, hazırlanan

Au/n-Si/Al ve Au/Antrasen/p-Si/Al Schottky diyodlarının I - V (akım-voltaj) ve C - V (kapasite-voltaj) karakteristiklerinin elde edilmesi, sıcaklığa bağılı değişimlerini ve temel diyod parametrelerinin değerlendirilmesini içeren “Araştırma Bulguları” kısmından oluşmaktadır. Son bölümde, araştırma bulgularının değerlendirilmesinin yapıldığı “Tartışma ve Sonuç” bölümü ile tez çalışması tamamlanmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Metal/Yarıiletken Kontaklar

Bir metal ile bir yarıiletken kontak haline getirildiğinde enerji-bant diyagramlarının farklı olmasından dolayı aralarında bir yük alışverişi meydana gelir. Bu olay denge durumuna ulaşınca kadar devam eder. Isıl denge meydana geldiğinde her iki malzemenin Fermi enerji seviyeleri aynı düzeydedir. Metal-yarıiletken kontak, iki malzemenin idealde sıfır dirençle temas etmesi olarak ele alınır.

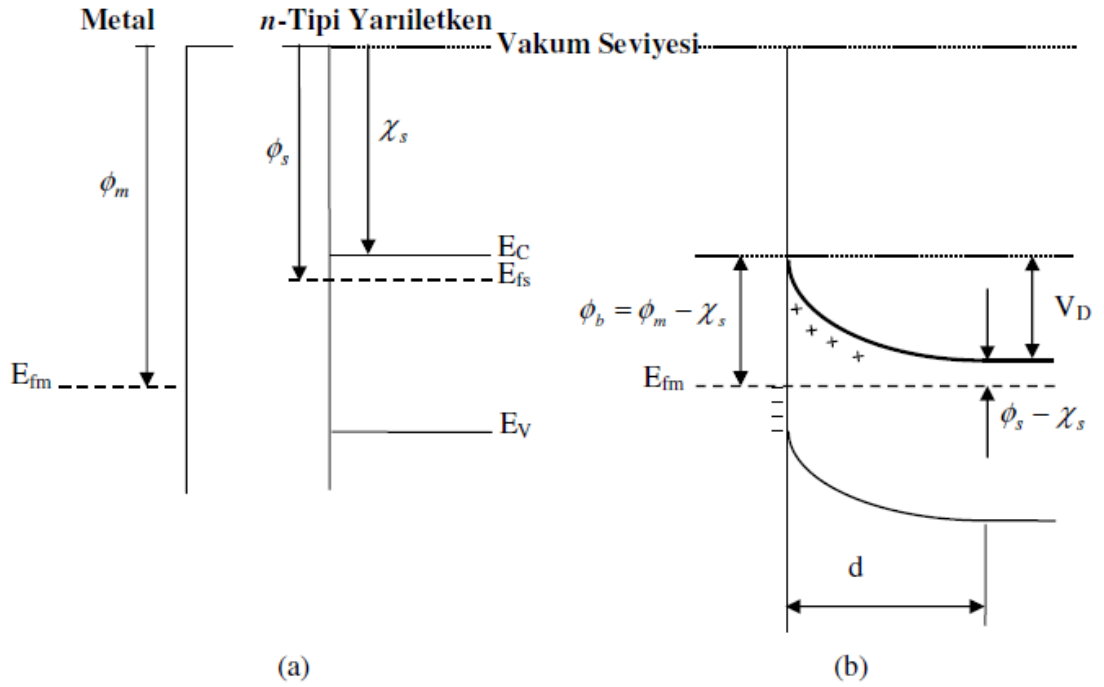
Metal-yarıiletken kontağın türünün doğrultucu veya omik olması genellikle seçilen metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları ile yarıiletkenin türüne (p veya n tipi) bağlıdır. Metalin iş fonksiyonu Φ_m ve yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s olmak üzere, metal/n-tipi yarıiletken kontaklar için $\Phi_s < \Phi_m$ olması halinde ise doğrultucu kontak ve $\Phi_s > \Phi_m$ olması halinde omik kontak oluşur. Metal/p-tipi yarıiletken kontaklarda ise $\Phi_s < \Phi_m$ olması halinde omik kontak ve $\Phi_s > \Phi_m$ olması halinde de doğrultucu kontak oluşur. Bardeen modeli, metal ile yarıiletken arasında bir yalıtkan tabakanın varlığını da kabul eder (Card and Rhoderick 1973).

2.1.1. Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar

Doğrultucu kontak (Schottky kontak), metal-yarıiletken kontaklarda akım taşıyıcıların bir doğrultudan diğer doğrultuya göre daha kolayca akabildiği kontaklara denir. N-tipi yarıiletken-metal kontaklarda, yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) metalin iş fonksiyonundan (Φ_m) daha küçük ($\Phi_m > \Phi_s$) ise oluşacak kontağa doğrultucu kontak ya da Schottky kontak adı verilir. Doğrultucu kontaklarda kontakta önce n-yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden ($\Phi_m - \Phi_s$) kadar yukarıdadır. Kontakta sonra yarıiletkenle metal arasında bir yük alışverişi olur ve denge hali oluşuncaya yani elektrokimyasal potansiyeller (Fermi seviyeleri) eşit oluncaya kadar bu alışveriş devam eder (Ziel 1968). Elektronlar, geride iyonize olmuş donörler bırakarak yarıiletkenden

metale geçerler. Doğrultucu kontak oluşumu sonucunda n-tipi yarıiletken tarafındaki uzay yükleri ile metal tarafındaki yüzey yükleri arasında zıt yüklemelerinden dolayı bir dipol tabakası oluşur. Bu da kontakta, bir potansiyel engelinin oluşmasını sağlar. Yani yarıiletken tarafına bantların aşağı doğru bükülmesine neden olur. Kontakta önceki ve sonraki durumlar için enerji band diyagramları Şekil 2.1’de görülmektedir. Metal n-tipi yarıiletken için engel yükseklikleri yarıiletken tarafında $eV_{dif} = (\Phi_m - \Phi_s)$ ve metal tarafında $e\Phi_b = (\Phi_m - \chi_s)$ eşitlikleriyle verilir. Burada e elektronun yükü, V_{dif} difüzyon potansiyeli, Φ_m metalin iş fonksiyonu, Φ_s yarıiletkenin iş fonksiyonu, Φ_b diyotun engel yüksekliği ve χ_s yarıiletkenin elektron ilgisidir. Yarıiletkenin elektron ilgisi (χ_s), iletkenlik bandı ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkına denir (Ziel 1968). Difüzyon potansiyeli yarıiletkenin iç potansiyeli olup metalin yüzeyine göre ölçülür.

Yarıiletken tarafındaki d kalınlığına sahip ve elektronlardan arınmış olan bölgeye uzay yükü bölgesi, arınma bölgesi veya Schottky bölgesi denir. Arınma bölgesinin elektronlardan arınmasıyla geriye kalan sabit pozitif yüklü donör atomlarına “uzay yükü” denir. Bu bölgenin metal tarafında negatif yüzey yüklerine, yarıiletken tarafında pozitif uzay yüküne sahip olduğundan bir kondansatör gibi davranır ve bir kapasiteye sahiptir. Oluşan bu kapasiteye Schottky kapasitesi veya arınma bölgesi kapasitesi denir. Bu Schottky kapasitesi, arınma tabakasının kalınlığı (d) ile ters orantılı, iyonize olan donörlerin konsantrasyonuna ve difüzyon potansiyeli (V_{dif}) değeri ile doğru orantılı olacağı açıktır (Rhoderick and Williams 1988). Bu kapasite $p-n$ yapılarda eklem kapasitansı olarak bilinir ve Schottky kapasitesiyle karşılaştırılamayacak kadar büyüktür, yüksek frekanslarda bükülmeye sebep olur.



Şekil 2.1. Metal/*n*-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontak

(a) Kontaktan önce

(b) Kontaktan sonra (denge durumu)

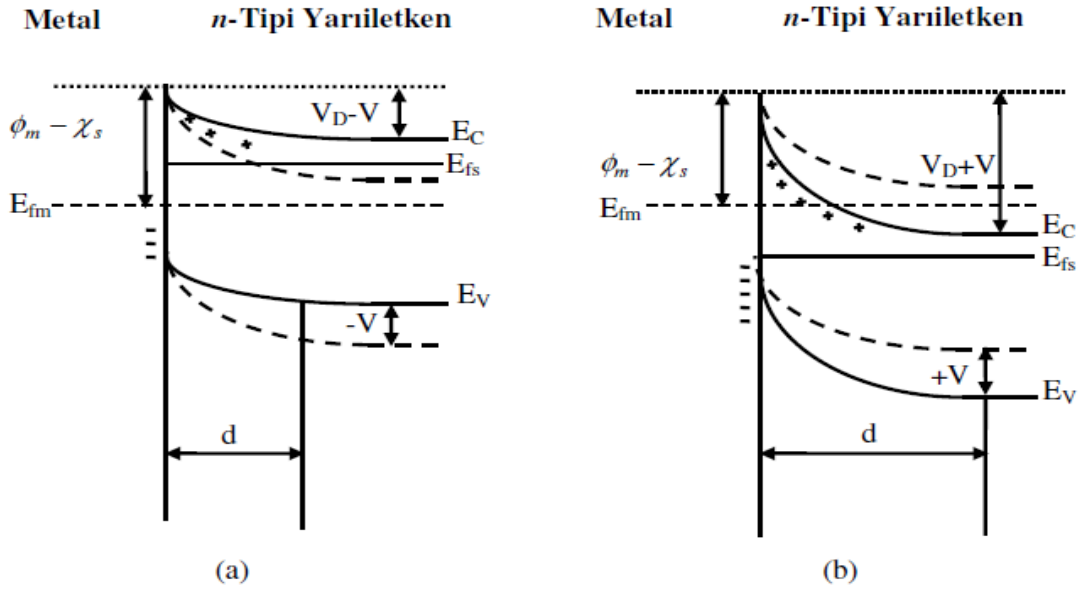
Kontak haline getirilmiş ve dengedeki metal *n*-tipi yarıiletken Schottky kontakta metaldeki bazı elektronlar termal uyarılma nedeniyle yeterli enerjiye sahip olduklarından potansiyel engelini geçip metalden yarıiletkene ve bazıları ise ters yönde yani yarıiletkenden metale geçerler. Bu geçişlerde eşit ve ters yönlü I_o akımları oluşur.

Eğer yarıiletkene $-V$ büyüklüğünde bir negatif potansiyel uygulanırsa metalden yarıiletkene giden elektronlar için engel değişmeyeceğinden bu elektronların oluşturacağı akımda da bir değişiklik olmayacaktır. Bunun yanı sıra yarıiletkenin iletkenlik bandındaki enerji seviyeleri eV kadar yükselecektir. Bundan dolayı yarıiletkenden metale geçecek elektronlar için engel yüksekliği eV kadar azalır. Buna bağlı olarak metalden yarıiletkene akan akım $\exp(eV/kT)$ çarpanı kadar artar. Oluşan net akım ise;

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

eşitliği ile verilir. Burada I_0 doyma akımı, V uygulanan potansiyel, k Boltzmann sabiti ve T mutlak sıcaklıktır.

Ara yüzey tabakası ve Schottky etkisi hariç tutulursa, metal tarafındaki engel yüksekliği uygulanan V voltajından bağımsız olduğundan sabittir. Yarıiletken tarafında ise engel yüksekliği uygulanan V voltajı ile doğru orantılı olarak değiştiğinden engel yüksekliği sabit değildir. Bu durum Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Düz ve ters beslem altındaki Metal/*n*-tipi yarıiletken doğrultucu kontak

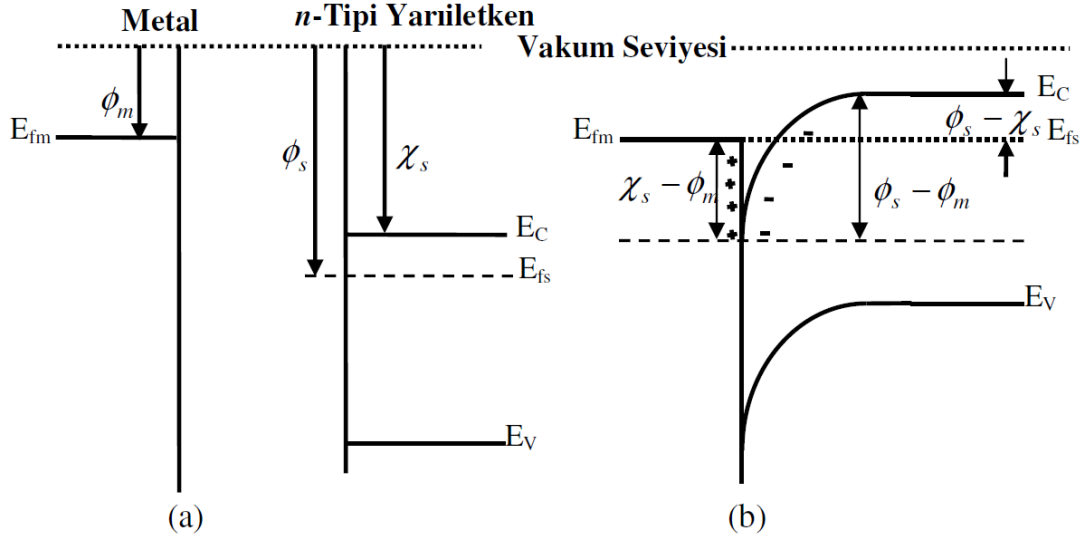
- (a) $V < 0$ olması durumunda enerji band diyagramı,
 (b) $V > 0$ olması durumunda enerji band diyagramı.

Metal/*n*-tipi yarıiletken Schottky kontaktlarda yarıiletken tarafına $-V(V < 0)$ negatif voltaj uygulanırsa kontak düz beslemde (ileri yönde kutuplama), $+V(V > 0)$ pozitif voltaj uygulanırsa "kontak ters beslemde" (ters yönde kutuplama) denir.

2.1.2. Metal/*n*-tipi yarıiletken omik kontaklar

Omik kontak, metal-yarıiletken kontaklarda akım taşıyıcıların iki yönde de kolayca aktığı kontaklara denir. N-yarıiletkenin iş fonksiyonu metalin iş fonksiyonundan büyük ($\Phi_s > \Phi_m$) ise kontağa omik kontak denir (Deneuville *et al.* 1974). Kontakta önce yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden ($\Phi_m - \Phi_s$) kadar aşağıdadır. Metal ve yarıiletkenin kontakta önceki enerji-band diyagramları Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Bu durumda kontak haline gelen metalden elektronlar yarıiletkenin içine doğru akarlar. Bu akış termal dengeye kadar devam etmektedir. Termal denge sağlandığında metal tarafında pozitif yüzey yükleri birikirken, yarıiletken tarafında negatif uzay yükleri birikmiş olur. Bu zıt yükler bir dipol tabakası oluştururlar. Kontak haline getirilmiş ve dengedeki metal *n*-tipi yarıiletken omik kontakta metalden yarıiletkene ve yarıiletkenlerden metale kolayca yük akışı olur. Metal-yarıiletken kontakta sonraki enerji band diyagramı Şekil 2.3’de gösterilmiştir.

Omik kontağa V voltajı uygulanırsa, potansiyel Schottky kontakta olduğu gibi sadece Schottky bölgesinde değil bütün yarıiletken gövde boyunca dağılacaktır. Normalde omik kontak elde edebilmek için *n*-tipi yarıiletkenin yüzeyine metal buharlaştırılır ve yarıiletkenle alaşım haline gelmesi için önceden optimize edilmiş veya literatürde belirtilen sıcaklıkta tavlânır. Böyle bir tavlanma neticesinde yarıiletkenin yüzeyinde bir $n +$ tabakası oluşturulmuş olur. Bu tabaka yarıiletken gövdeye göre elektron bakımından daha zengindir (Sze 1981).

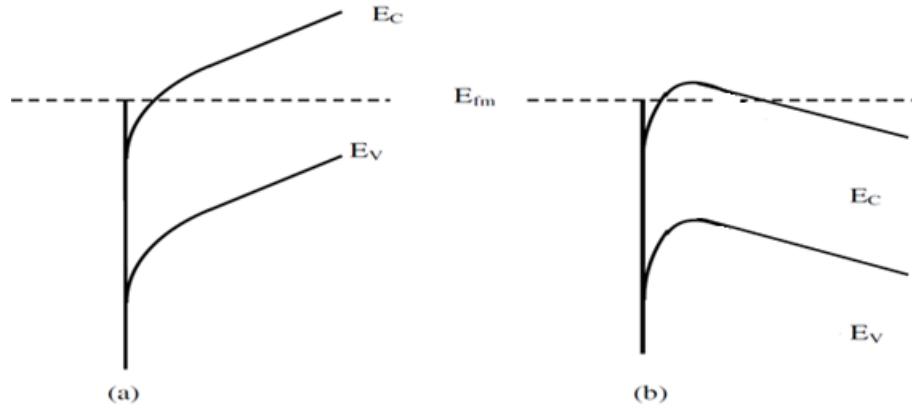


Şekil 2.3. Metal/*n*-tipi yarıiletken omik kontak

(a) Kontakdan önce

(b) Kontakdan sonra ve dengede

Metal/*n*-tipi yarıiletken omik kontakların yarıiletken tarafına negatif ve pozitif gerilim uygulanması durumunda enerji-band diyagramı Şekil 2.4’de gösterilmiştir.



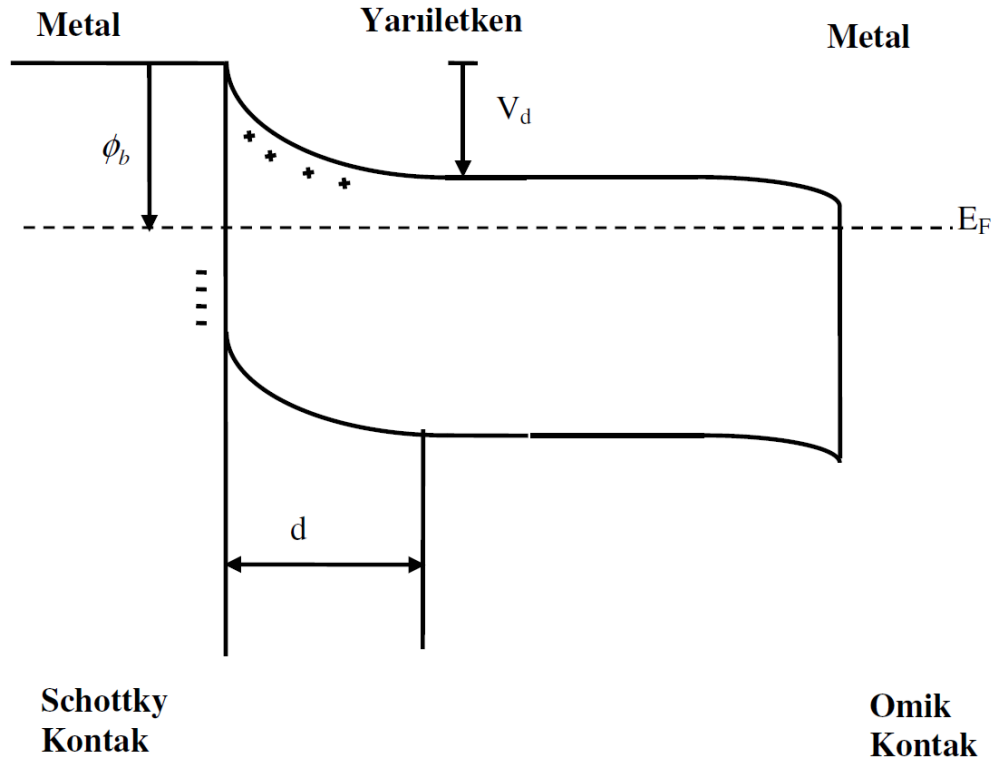
Şekil 2.4. Düz ve ters beslem altındaki Metal/*n*-tipi yarıiletken omik kontak

(a) ($V < 0$) olması durumunda enerji band diyagramı,

(b) ($V > 0$) olması durumunda enerji band diyagramı.

2.2. Metal (Omik) / n-Tipi Yarıiletken / Metal (Schottky) Yapısı

N-tipi yarıiletkenin bir yüzeyinin omik kontak olması için elektron bakımınca zengin (n^+) bir bölge, diğer yüzeyinin ise Schottky kontak olması için bir metal (M) buharlaştırılarak metal n-tipi yarıiletken Schottky diyodu elde edilmiş olur. Bu yapı n^+nM ile gösterilir. Termal denge durumunda ki enerji-band diyagramı Şekil 2.5’de verilmiştir.



Şekil 2.5. Termal dengede n -tipi Schottky diodunun enerji band diyagramı

n^+nM karakteristik bakımından diyet özelliği gösterdiğinden bunlara Schottky diodlar denir. Bu yapıyı düz beslemek için omik kontak tarafı negatif ($V < 0$), voltaj ters beslemek için omik tarafı pozitif bir voltaj ($V > 0$) uygulanmalıdır.

2.3. Schottky Diyotlarında Termoiyonik Emisyonla Akım İletimi

Termoiyonik emisyon; sıcak bir yüzeyden termal enerji nedeniyle taşıyıcıların salınması olayına denir. Termoiyonik emisyon teorisi metal yarıiletken Schottky diyotlarında taşıyıcıların kazanacağı termal enerji nedeniyle potansiyel engeli aşarak yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene geçmesi sırasındaki akım olaylarını izaha çalışmaktadır. Metal n-tipi yarıiletken yapılarda bu olay elektronlar, metal p-tipi yarıiletken yapılarda ise holler tarafından yani Schottky diyotlarında akım çoğunluk taşıyıcıları tarafından sağlanır. Termoiyonik emisyon, doğrultucu kontağın potansiyel engelini kT enerjisinden büyük ve Schottky bölgesindeki taşıyıcı çarpışmalarının da çok küçük olduğunu kabul eder (Ziel 1968; Rhoderick and Williams 1988).

Termoiyonik emisyon teorisine göre net akım yoğunluğu ifadesi;

$$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

eşitliği ile verilir (Rhoderick and Williams 1988). Burada J_0 doyma akım yoğunluğu, V uygulanan voltaj, k Boltzmann sabiti, T Mutlak sıcaklıktır. J_0 doyma akım yoğunluğu ise ;

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \quad (2.3)$$

şeklindedir. Burada A^* Richardson sabiti, $e\phi_b$ yarıiletkenin iletkenlik bandının alt sınırı sıfır alındığında metal tarafındaki potansiyel engel yüksekliğidir. Richardson sabiti ve potansiyel engel yüksekliği ise;

$$A^* = \frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \quad (2.4)$$

$e\phi_b = eV_{dif} + E_F$ denklemi ile verilebilir.

2.4. Tünelleme Eklemi

Metal-yarıiletken doğrultucu diyotlardaki önemli bir akım iletim mekanizmalarından biri de tünellemedir. Elektronlar engel yüksekliğini aşmak yerine daralan engel genişliğiyle Schottky engeli boyunca tünellenirler. Geniş yasak enerji aralığına sahip yarıiletken numuneler üzerinde omik kontak yapmak çok zordur. Çünkü bu malzemeler üzerinde düşük engel yüksekliği oluşturmak suretiyle taşıyıcıların her iki yönde de geçiş yapabilmeleri pratik açıdan büyük güçlükler doğurur. Bu tür malzemeler için, yarıiletken yüzeyini aşırı tiplilik gösterecek biçimde (n^{++} ya da p^{++}) katkılama suretiyle, büyük engel yüksekliğine sahip, ancak taşıyıcıların her iki yönde de tünelleme yapabilmesine izin verecek kadar dar potansiyel engeli oluşturmak mümkündür. Katkılama işlemi termal difüzyon, iyon ekme (ion implantation), ya da epitaksiyel büyütme tekniklerinden biri kullanılarak başarılabılır (Neamen 1992).

$$w = \sqrt{\left(\frac{2\epsilon_s}{qN_d}\right) \left(\phi_b - (E_c - E_f) - V - \frac{kT}{q} \right)} \quad (2.5)$$

Bundan dolayı uzay yükü bölgesinin genişliği, katkı atomlarının konsantrasyonunun artmasıyla azalır. Bu durumda katkı konsantrasyonu arttıkça, potansiyel engel genişliği azalacak ve taşıyıcıların her iki yönde de tünelleme yapma ihtimaliyeti artacaktır. Bu yüzden tünelleme ile omik kontak oluşturmada yarıiletken yüzeyin aşırı tiplilik gösterecek seviyede katkılanması gerekmektedir.

2.5. Metal-Yarıiletken Schottky Diyotlarda Arayüzey Tabakasının Etkileri

Schottky –Mott teorisine göre Schottky diyotlarda engel yüksekliği metalle yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farka eşittir, yani engel yüksekliği metalin iş fonksiyonuna

çok sıkı bir şekilde bağlıdır. Fakat yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar, engel yüksekliğinin metalin iş fonksiyonundan bağımsız olabileceğini de gösterdi. N-tipi bir yarıiletken ile doğrultucu kontak haline getirilen bir metalin p-tipi için omik kontak oluşturması gerekirken doğrultucu kontakta oluşturabileceği bulundu. Yarıiletken üzerindeki yüzey halleri cinsinden bu açıkladı. Bu yüzey halleri yarıiletkenin içini metalden izole eder ve difüzyon potansiyelinin ve dolayısıyla engel yüksekliğinin gerçek değerinden farklı olmasına sebep olurlar. Arayüzey halleri, tahmin edilen ve gözlenen Schottky engel yüksekliklerinin arasındaki farktan dolayı hesaba katılır. Bu arayüzey (yüzey) hallerinin dört parçaya ayırabiliriz.

- a) Metal ile kontakta önce yarıiletken ve vakum seviyeleri arayüzeyinde mevcut olan asal yüzey halleri, bunlar genel olarak yarıiletken kristalin periyodik yapısının yüzeyde bozulmasından ortaya çıkarlar (Crowel *et al.* 1965).
- b) Metal ile kontakta sonra ortaya çıkan asal olmayan (extrinsic) yüzey halleri; bunlar yarıiletkenin yüzeyinde yığılmış olan yabancı atomların varlığından veya metalin yeteri kadar temiz olmayışından dolayı oluşan yüzey halleridir.
- c) Hem yarıiletkenin yüzeyinde hem de yarıiletkenin gövdesinde bulunan kusurlar (defects) ve kirlerden ortaya çıkan asal olmayan yüzey halleri; bu haller metal buharlaştırıldığında yarıiletkenin ince bir tabakasıyla (arayüzey tabakası) metalden ayrılırlar. Bu durumda, bu hallerin dengede olduğu söylenir.
- d) Arayüzey kimyasal reaksiyonlarından ortaya çıkan arayüzey halleri veya metalle uyarılan yüzey halleri, metallere bazıları temiz yarıiletkenin yüzeyine buharlaştırıldıklarında metal ile yarıiletken arasında kuvvetli bir kimyasal reaksiyon meydana gelir. Bu reaksiyondan dolayı arayüzeyde arayüzey tabakası olarak kabul edilen yeni bir bileşik ve dolayısıyla yeni arayüzey halleri ortaya çıkmış olur. Metalle uyarılan veya metalle sebep olunan haller (metal-induced gap states-MIGS), metalden yarıiletkene yük transferiyle ortaya çıkan hallerdir. Bir metal bir yarıiletkenin yüzeyine temas ettirildiğinde (kontak haline getirildiğinde) MIGS'ler yarıiletkenin yüzeyindeki asal yüzey hallerinin yerine geçebilirler.

Deneyssel olarak bu dört tipin varlığı gösterilmiştir. Teorik hesaplamalarda bu

arayüzeylerin yapısı ve özellikleri güvenilir bir şekilde tartışılmıştır. Bu dört tip arayüzey hallerinin Schottky diyot karakteristiklerinin beklenilenden farklı çıkmasına sebep oldukları hem deneysel hem de teorik olarak gösterilmiştir.

Bunlara ilave olarak, metalle yarıiletken arasındaki ince oksit tabakası band yapısı karakterine sahip değildir ve metal-yarıiletkenenden dolayı termal dengedeki sıfır beslem engel yüksekliği ideal bir Schottky diyotundaki kontaklardaki etkisi aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- 1) Bu tabakadaki potansiyel değişmesi olacak.
- 2) Elektronlar, bu tabakadan dolayı oluşan engelin içinden geçerler (tünelleme) ve bu durum Schottky parametrelerinin beklenilenden farklı çıkmasına neden olur.
- 3) Bir gerilim uygulandığında, bu gerilimin bir kısmı arayüzey tabakası boyunca düşeceğinden, engel yüksekliği uygulanan geriliminin bir fonksiyonu olur. Engel yüksekliğinin bu besleme bağımlılığı, I-V karakteristiklerinin biçiminin değişmesine sebep olur. Bu durum ideallikten sapma olarak tanımlanır ve idealite faktörü olan n cinsinden ifade edilir. Ayrıca, arayüzey tabakası ve arayüzey hallerinin Schottky diyot kapasitesine etki ve katkılarına aşağıdaki gibi işaret edilebilir.

20 Å'dan daha küçük kalınlıklı arayüzey tabakası için arayüzey halleri metalle

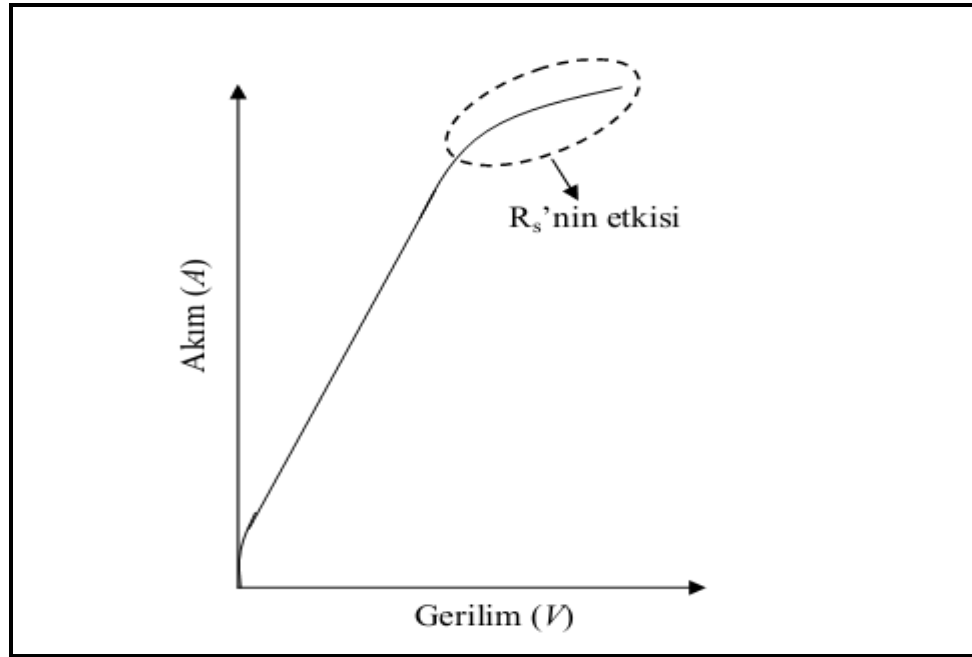
20 Å'dan daha büyük kalınlıklı arayüzey tabakası için arayüzey halleri yarıiletkenle

dengededir. Arayüzey halleri, yüksek frekanslarda ($f > \text{MHz}$) a.c. sinyaline cevap veremediğinden engel kapasitesine katkıda bulunamazlar. Bundan dolayı, arayüzey hal yoğunluğu beslemele değişmez ve sabit kalır.

2.6. Seri Direncin Etkisi

Metal-yarıiletken yapılarda görülen homojensizliklere neden olan etkilere biri seri direnç etkisidir. Seri direnç, metal-yarıiletken doğrultucu kontaklarda, yarıiletken

tarafında oluşan deplasyon bölgesi dışında kalan nötral bölgenin diyot akımına karşı gösterdiği dirençtir ve R_s ile gösterilir. Bu etki, büyük gerilim değerlerinde baskın olmaya başlar ve diyot akımının düşmesine neden olur. Şekil 2.14 bir Schottky diyotta büyük gerilim değerlerinde seri direncin etkisi ile meydana gelen diyot akımındaki azalmayı göstermektedir (Güllü 2008).



Şekil 2.6. Metal/yarıiletken kontakta seri direncin etkisi

Seri direnç diyotlarda güç kaybına neden olmakta ve diyodun yapısına bağlılık göstermektedir. Aktif yarıiletken devre elemanlarında ortaya çıkan seri direnci kapsamlı olarak iki kutuplu transistör yapısında görmek mümkündür. İki kutuplu transistörün sabit iki noktası arasındaki toplam direncini üçe ayırabiliriz:

1. Metalik iletkenin direnci, R_m
2. Kontak direnci, R_c
3. Yarıiletken direnci, R_s

Böylece bu noktalar arasında oluşan toplam direnç,

$$R_T = 2R_m + 2R_c + R_s \text{ 'dir.}$$

Schottky diyotlar genelde yarıiletkenlerin az katkılı olmasını gerektirir. Ancak katkı oranı düşük bir tabakaya zayıf omik kontak oluşumu yüksek seri dirence neden olacağı için diyot fabrikasyonunda pratik olmaz. Pratikte diyotlar aşırı katkılı olan altlık üzerine ince film oluşturulması ile yapılırlar ve oluşan bu yapı seri direncin minimum olmasını sağlar. Böylece yüksek kaliteli bir omik kontak elde etmek için yüksek katkılı bir altlık kullanmak gerekir. Bir yüzeysel eklem diyotta katkılanmamış epitaksiyal tabaka, yeterince kalın olacağı için seri direnç değerinin artmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda alt tabakanın gövde direnci, omik kontak direnci ve katkılanmamış epitaksiyal tabakanın direnci seri direncin artmasında birer etken olmaktadır (Gülnahar 2008).

2.7. Cheung Fonksiyonları ile Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi

1986 yılında Cheung tarafından Schottky diyot parametrelerinin hesaplanmaları için düz beslem $I-V$ karakteristikleri kullanarak farklı bir hesaplama modeli ileri sürüldü (Cheung and Cheung 1986). Termoyonik emisyon teorisinden bulunan akım yoğunluğu ifadesi diyotun A etkin alanıyla çarpılırsa, diyottan geçen toplam akım boyutsuz bir sabit olan idealite faktörünün dikkate alınması durumunda akım;

$$I = A.J = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.6)$$

olarak ifade edilir. Bu ifadede $eV \gg kT$ ise, 1 ihmal edilebilir. Pratikte uygulanan gerilimin tamamı deplasyon bölgesine düşmediği dikkate alındığında, ideal durumdan sapmaların söz konusu olacağı söylenebilir. İdeal durumdan sapmaları ifade edebilmek için birimsiz sabit olan (n) idealite faktörü dikkate alınmalıdır. Bu durumda yukarıda ifade edilen akım denklemini aşağıdaki şekilde yazabiliriz:

$$I = A.J = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.7)$$

uygulanan gerilim V 'nin IR_s kadarlık miktarı seri direnç bölgesine düşeceği için V yerine $(V) - IR_s$ yazarak (2.7) denklemini aşağıdaki şekilde yeniden yazabiliriz.

$$I = A.J = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{e(V - IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.8)$$

Son eşitlikten;

$$V = \left(\frac{nkT}{e} \right) \ln\left(\frac{I}{AA^* T^2} \right) + n\Phi_b + IR_s \quad (2.9)$$

ifadesi elde edilir. (2.9) eşitliğinin $\ln I$ 'ya göre türevi alınırsa;

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (2.10)$$

ifadesi elde edilir. (2.10) eşitliğinde, $\frac{dV}{d(\ln I)}$ 'nın I 'ya göre grafiği bir doğru olacaktır.

Bu grafikten elde edilecek olan doğrunun eğimi nötral bölge direncini ya da R_s seri direncini verecektir. Bu doğrunun düşey eksenini kestiği noktadan (n) idealite faktörü bulunabilir (Aydoğan 2003). Potansiyel engeli Φ_b 'yi bulmak için;

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{e} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^* T^2} \right) \quad (2.11)$$

şeklinde bir $H(I)$ fonksiyonu tanımlanabilir. (2.9) ve (2.10) eşitliklerinden;

$$H(I) = n\Phi_b + IR_s \quad (2.12)$$

yazılabilir. (2.12) eşitliğinde $H(I) - I$ grafiği çizildiğinde bu grafik de bir doğru şeklinde olacak ve bu doğrunun eğimi de R_s seri direncini verecektir. Bu doğrunun $H(I)$ eksenini kestiği noktadan da engel yüksekliği $e\phi_b$ bulunur.

2.8. Norde Fonksiyonları ile Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi

Yüksek seri dirence sahip metal-yarıiletken kontaklarda, seri direnç, idealite faktörü ve engel yüksekliği gibi fiziksel (elektronik) parametrelerin tayin edilmesi amacıyla yeni yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan biride Norde tarafından $n = 1$ durumu için seri direnç ve engel yüksekliğini tanımlayan, $F(V)$ fonksiyonudur. Bu yöntem R_s ve ϕ_b 'nin sıcaklıkla değişmediği durumlarda uygulandığı için sadece bir sıcaklıkta $I-V$ eğrisine ihtiyaç vardır (Norde 1979).

Sato ve Yasamura, Norde tarafından sunulan yöntemi geliştirerek idealite faktörünün 1'den büyük olduğu durumlarda da ($1 < n < 2$) n , R_s ve ϕ_b değerinin hesaplanabileceğini göstermişlerdir. Bu yöntem R_s ve ϕ_b 'nin sıcaklığı değiştiği durumlarda da uygulanabileceğinden en az iki farklı sıcaklıktaki $I - V$ eğrisine ihtiyaç vardır. Benzer yöntem Mc Lean tarafından da belirtilmiştir (Sato and Yasamura 1985).

Termiyonik emisyon teorisine göre Schottky diyotların da düz beslem altındaki akım-gerilim ilişkisi;

$$I = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV_o}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.13)$$

şeklindedir. Burada ilk çarpan I_o doyma akımı, V_o ise engel tabakası boyunca gerilim düşmesidir. Pratik olarak Schottky diyodları düz beslem akım-gerilim karakteristiklerinde ideal durumlardan bazı sapmalar gösterebilir ($n > 1$) gibi. Bundan dolayı eşitlik 2.13'deki akım ifadesi;

$$I = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV_o}{nkT}\right) \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{eV_o}{kT}\right) \right] \quad (2.14)$$

şeklini alır. Burada $\left[\exp\left(-\frac{eV_o}{kT}\right) \right] \ll 1$ bu durum göz önüne alınırsa ve Schottky diyoduna uygulanan V geriliminin bir kısmının seri direnç üzerine $V_o = V - IR_s$ şeklinde düşeceği düşünülürse 2.14 ifadesi;

$$I = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{e(V - IR_s)}{nkT}\right) \right] \quad (2.15)$$

şeklinde yeniden düzenlenebilir. Burada V dışardan uygulanan gerilimi, R_s de seri direnci göstermektedir.

Termoionik emisyon teorisi sadece diyodun düz beslem I - V karakteristiğinin lineer bölgesinde kullanılır. Yüksek seri direnç nedeniyle lineer bölge $kT/e \ll V \ll I R_s$ aralığıyla sınırlanır ve daralma gösterir. Bu durum $\ln(I)$ - V grafiğinin değerlendirilmesi daha karışık bir hal alır ve bu bölgede doyma akımı I_o ve engel yüksekliği (ϕ_b) değeri güvenilir olarak hesaplanamaz. R_s , ϕ_b ve n değerleri hesaplamak için daha güvenilir metotlar mevcuttur. İlk olarak Norde tarafından sunulan fonksiyon aşağıdadır.

$$F(V) = \frac{V}{2} - \left(\frac{kT}{e} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^* T^2} \right) \quad (2.16)$$

Bu $F(V)$ fonksiyonu yardımıyla $n=1$ için, R_s , ϕ_b 'nin hesaplanmasına çalışılmıştır.

Bu yöntemle R_s , ϕ_b 'nin sıcaklıkla değişmediği durumlarda geçerli olduğundan tek bir $I-V$ eğrisine ihtiyaç vardır. Daha sonra Sato ve Yasamura, Norde tarafından sunulan teoriyi geliştirerek idealite faktörünün 1'den büyük olduğu ($1 < n < 2$) durumlarda R_s , ϕ_b ve n parametreleri hesapladılar. Eşitlik 2.13 'in her iki tarafının $\ln$ 'i alınıp eşitlik 2.14'da yerine yazıldığında,

$$F(V) = \left(\frac{n-2}{2n} \right) V + \frac{IR_s}{n} + \phi_b \quad (2.17)$$

elde edilir. Burada $R_s = 0$ ideal durumu için $F(V) - V$ grafiğinin eğimi $(n-2/2n)$ olan bir doğrudur ve $F(V)$ eksenini $V=0$ 'da kestiği nokta ϕ_b 'yi verir. Bu arada seri direnç sıfırdan farklı ise $F(V)$ fonksiyonu bir minimumda geçer ve

$$F(V) = \frac{V}{2} - \left(\frac{kT}{e} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^* T^2 R_s} \right) \quad (2.18)$$

şeklinde verilebilir. Eşitlik 2.18'in V 'ye göre türevi alınıp eşitlik düzenlenirse,

$$\frac{\partial F(V)}{\partial V} = \frac{1}{2} \left[\frac{n-2}{2} + \frac{\beta IR_s}{n + \beta IR_s} \right] = \frac{n-2 + \beta IR_s}{2(n + \beta IR_s)} \quad (2.19)$$

olur. $(1/\beta = kT/e)$ ve $\partial F(V)/\partial V = 0$ şartında $F(V)$ bir minimum geçer. Minimumdan geçen akım I_{oi} , gerilim değeri ise V_{oi} dir. Burada,

$$\frac{n-2+\beta I_{oi}R_{si}}{2(n+\beta_i I_{oi}R_{si})}=0 \quad (2.20a)$$

$$n-2+\beta I_{oi}R_{si}=0 \quad (2.20b)$$

yazılır. Burada R_{si} ve ϕ_b için sırasıyla

$$R_{si} = \frac{(2-n)}{I_{oi}} - \frac{kT_i}{e} \quad (2.21)$$

$$\phi_b = F(V_{oi}) + \left(\frac{2-n}{n}\right)V_{oi} - \left(\frac{2-n}{n}\right)\frac{1}{\beta_i} = F(V_{oi}) + \left(\frac{2-n}{n}\right)\left(\frac{V_{oi}}{2} - \frac{kT_i}{e}\right) \quad (2.22)$$

eşitlikleri çıkarılır. Burada R_{si} , β_i , V_{oi} ve I_{oi} ($i=1, 2, \dots, n$) farklı sıcaklıklara karşılık gelen değerlerdir. (K.E Bohlin ise Schottky engel diyodunun I - V ölçümünden elde edilen R_s , ϕ_b ve n değerlerinin belirlenmesini mümkün kılan iki farklı fonksiyon tanımlamıştır (Bohlin 1986). Norde fonksiyonun ilk terimi olan $\frac{V}{2}$ yerine $\frac{V}{\gamma}$ terimi kullanılmıştır. Buradaki γ idealite faktöründen büyük olmak kaydıyla ($\gamma > n$) keyfi bir sabittir. Bu durumda Norde fonksiyonu,

$$F(V, \gamma) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \left[\ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \right] \quad (2.23)$$

şeklinde yazılır. Yine eşitlik 2.13'de her iki tarafın $\ln$ 'i alınırsa

$$F(V, \gamma) = \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n} \right) V + \phi_b + \frac{IR_s}{n} \quad (2.24)$$

eşitliği elde edilir. İdeal diyotta seri direncin sıfır olduğu düşünülürse $F(V, \gamma)$ 'nin V 'ye bağlı grafiği, eğimi $(n - \gamma)/\gamma$ olan bir doğru olur ama seri direnç varsa bu

fonksiyon,

$$F(V, \gamma) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \left[\ln \left(\frac{V}{R_s A A^* T^2} \right) \right] \quad (2.25)$$

biçiminde olur. Yüksek voltaj değerleri için bu fonksiyon; eğimi $1/\gamma$ olan bir doğruya yaklaşır. γ değeri n 'den büyük olduğu sürece fonksiyon kesikli olarak bir minimumdan geçer. $F(V, \gamma)$ fonksiyonun V 'ye göre türevini alıp minimum noktada sıfıra eşitlediğimizde,

$$I_o = \frac{\gamma - n}{\beta R_s} \quad (2.26)$$

eşitliği elde edilir. Burada ki I_o ve V_o değeri minimum noktadaki akım ve gerilim değerleridir. Sonuç olarak engel yüksekliği ve seri direnç ifadeleri

$$\phi_b = F(V_o, \gamma) + \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{\gamma} \right) V_o - \frac{(\gamma - n)}{\beta n} \quad (2.27)$$

$$R_s = \frac{(\gamma - n)}{\beta I_o} \quad (2.28)$$

şeklinde olur.

2.9. Metal–Yarıiletken Schottky Diyodların Engel Kapasitesi

Engel tabakası veya Schottky tabakasının arınma (depletion) bölgesi paralel levhalı kondansatör gibi davranır. İdeal bir metal -n tipi yarıiletken Schottky diyod göz önüne alalım. Ters beslem durumunda, uygulama gerilimi artırıldığında yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar metalden uzaklaşırlar ve buna bağlı olarak gerilim artmasından

dolayı arınma bölgesinin genişliği artar. Aynı zamanda yarıiletken metalde yakın önemli bir hol konsantrasyonu varsa hollerin yeni Fermi seviyesi metaldeki fermi seviyesiyle çakışacağından hol konsantrasyonu azalacaktır. Deplasyon bölgesindeki bu yük değişimi kapasite değişimine sebep olacaktır. Dolayısıyla bu tür diyotlar varaktör (değişken kapasitör) olarak da kullanılırlar. Ayrıca, ters beslem altındaki kontak(engel) sığasından diyod parametreleri ile ilgili bilgilerde elde edilebilir. Metal-yarıiletken kontağın potansiyel dağılımı ve yük yoğunluğu arasındaki ilişki Poisson denklemi ile verilir.

$$\nabla^2 \psi(x) = \frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s \epsilon_o} \quad (2.29)$$

Burada ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, ϵ_o boş uzayın dielektrik sabiti ve $\rho(x)$ uzay yük yoğunluğudur.

n-tipi yarıiletkenin elektron verici atom yoğunluğu (donor) N_d ve yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektron yoğunluğu n olmak üzere ; $\rho(x)$ uzay-yük yoğunluğu;

$$p(x) = e(N_d - n) \quad (2.30)$$

ifadesi ile verilir. Metal-n tipi yarıiletken doğrultucu kontağın $\Psi(x)$ potansiyel fonksiyonu ile $p(x)$ uzay-yükü yoğunluğunun x 'e göre değişimidir. $e(V_d - V) \gg kT$ olduğundan $0 \leq x \leq d$ aralığında $N_d \gg n$ 'dir. Bundan dolayı;

$$p(x) = eN_d \quad (2.31)$$

bağıntısı yazılır. $\rho(x)$ 'in bu değeri, (2.29) denkleminde yerine konulursa, tek boyutta Poisson denklemi

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\frac{eN_d}{\epsilon_s\epsilon_o} \quad (2.32)$$

şeklinde verilir.

Denklem (2.32) aşağıdaki sınır şartları altında çözülürse $\Psi(x)$ 'i bulabiliriz. Sınır şartları:

$$1) \ x=0'da \ \Psi(x)=0$$

$$2) \ x \geq d' \ de \ \Psi(x) = Vd \pm V$$

$$3) \ x \geq d' \ de \ \frac{d\psi(x)}{d(x)} = 0$$

şeklindedirler. (2.32) denkleminin üçüncü sınır şartları altında, ilk integraliyle kontak bölgesindeki elektrik alan elde edilir.

$$E(x) = -\frac{d\psi(x)}{d(x)} = \frac{eN_d}{\epsilon_s\epsilon_o}(x-d) \quad (2.33)$$

Bu ifadenin integralini birinci sınır şartı altında alırsak $\Psi(x)$ potansiyel fonksiyonunu buluruz.

$$\psi(x) = -\frac{eN_d}{\epsilon_s\epsilon_o} \left(\frac{1}{2}x^2 - xd \right) \quad (2.34)$$

Denklem (2.34) ikinci sınır şartı altında çözülürse, Schottky tabakasının d genişliği bulunur.

$$(V_d \pm V) = -\frac{eN_d}{2\varepsilon_s\varepsilon_o}d^2 \quad d = \left[\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_o}{eN_d}(V_d \pm V) \right]^{1/2} \quad (2.35)$$

$V=+V$ için kontak ters beslemedir. Schottky tabakasının kapasitör gibi davranacağına daha önce işaret edilmişti. Yarıiletkenin yüzey başına yük miktarı,

$$Q = eN_d \cdot d = \left[2\varepsilon_o\varepsilon_s eN_d (V_d \pm V) \right]^{1/2} \quad (2.36)$$

ifadesiyle verilir. Birim alan başına küçük-sinyal kapasitesi, uygulanan voltaja göre yük değişimi olarak tanımlanır.

$$C = \frac{dQ}{dV} = \left[\frac{e\varepsilon_s\varepsilon_o N_d}{2(V_d + V)} \right]^{1/2} = \frac{\varepsilon_s\varepsilon_o}{d} \quad (2.37)$$

Bu ifade den görüldüğü gibi uygulama voltajı arttığında kapasite azalır, " d " ise artar.

Eğer C , N_d 'nin bir fonksiyonu olarak düşünülecek olursa, N_d 'nin artması ile C artar, buna bağlı olarak da artar. (2.37) denkleminde N_d 'yi ve V_d 'yi veren ifadeleri elde edebiliriz.

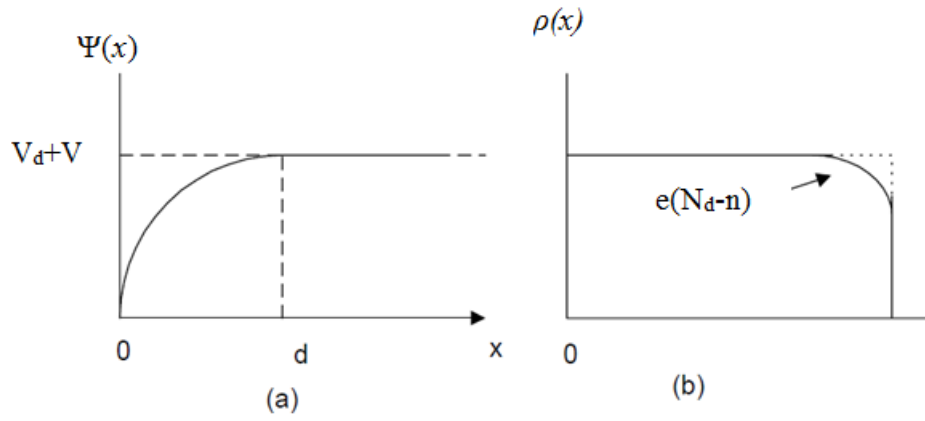
Son denklem;

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_d + V)}{e\varepsilon_s\varepsilon_o N_d} \quad (2.38)$$

şeklinde yazılabilir. $C^2 - V$ grafiği bir doğru verir. Bu doğrunun eğiminden

$$N_d = \frac{2}{e\epsilon_o\epsilon_s} \cdot \frac{dV}{d(1/C^2)} \quad (2.39)$$

elde edilir. Doğrunun V eksenini kestiği nokta V_d difüzyon potansiyelini verir.



Şekil 2.7. Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın, (a) potansiyel dağılımı, (b) yük dağılımı

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Giriş

Bu bölüm, referans Au/*n*-Si/Al diyonu ve Au/Antrasen/*n*-Si/Al diyonun yapımı için gerekli olan malzeme, numune hazırlanması, temizlenmesi ve diyonların üretimiyle ilgili bilgiler içermektedir. Hazırlanan numunenin *I-V*, *C-V* ölçümlerinden elde edilen karakteristik parametrelerinin ölçümünde kullanılan cihazlar ve teknikler bu bölümde yer almaktadır.

3.2. *n*-Si Kristalinin Temizlenmesi ve Numunenin Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan *n*-Si kristalleri 400 µm kalınlıkta ve 1-10 Ωcm öz direncine sahiptir. Numune üzerinde kalan organik kirler ile daha önceden var olan organik ve metalik kirleri gidermek için numune kimyasal temizlemeye tabi tutuldu. Kimyasal temizleme prosedürü sırasıyla aşağıdaki işlemlerden oluşmaktadır.

- 1-Aseton'da ultrasonik olarak 10 dakika yıkandı.
- 2-Metanol'de ultrasonik olarak 10 dakika yıkandı.
- 3-Deiyonize su ile iyice yıkandı.
- 4- RCA1 (H₂O:H₂O₂:NH₃; 6:1:1)'de 60°C'de 10 dakika kaynatıldı.
- 5-Seyreltik HF (H₂O:HF; 10:1) ile 30 saniye yıkandı.
- 6-RCA2 (H₂O:H₂O₂:HCl; 6:1:1)'de 60°C'de 10 dakika kaynatıldı.
- 7-Deiyonize su ile iyice yıkandı.
- 8-Seyreltik HF (H₂O:HF;10:1) ile 30 saniye yıkandı.
- 9- 20 dakika akan deiyonize su içerisine konuldu sonra azot gazıyla iyice kurutuldu.

Temizleme prosedürü bittikten sonra ilk işlem olarak numunelerin mat tarafına omik kontak yapılması gerekir. Bunun için öncelikle buharlaştırmada kullanılacak olan Au ve

Al metalleri %10 seyreltilmiş HF ile yıkandı ve azot gazıyla kurutuldu. Omik kontak işleminde temizlenmiş Al metali kullanıldı.

Omik kontak işleminde kullanılacak olan ısıtıcı %10 seyreltilmiş HCl çözeltisi ile 2 dakika yıkandı ve ardından deiyonize su ile temizlenerek kurutuldu. Daha sonra bu ısıtıcı vakum ünitesinde yerleştirilerek akkor hale getirilerek temizlendi.

Kimyasal olarak temizlenmiş olan ısıtıcı vakum sistemine yerleştirildi ve üzerine temişlenmiş Al metali yerleştirilerek vakum sisteminde $\sim 10^{-5}$ torr basınç altında numunelerin (*n*-Si) mat yüzeyine buharlaştırıldı. Bu aşamadan sonra tavlama fırını 450°C 'ye ayarlandı ve numuneler N_2 ortamında 3 dakika tavlandı. Buharlaştırma ünitesi ve tavlama fırını sırasıyla Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.1. Buharlaştırma ünitesi

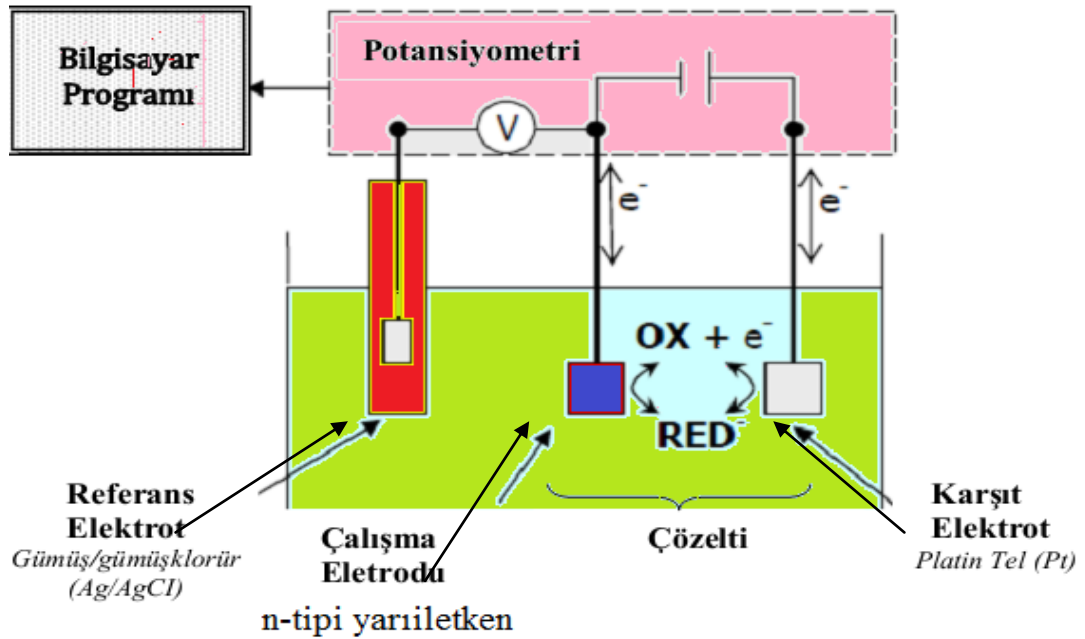


Şekil 3.2. Tavlama fırını

3.3. Elektrokimyasal Kaplama İşlemi

3.3.1. Elektrokimyasal cihaz

Bioanalytical Systems BAS-100B elektrokimyasal analizör kullanılarak tüm elektrokimyasal ölçümler yapıldı. Üç elektrotlu elektrokimyasal hücrede çalışma elektrodu olarak omik kontak yapılmış n-Si tabakalar; karşıt ve referans elektrot olarak sırasıyla Pt tel ve Ag/AgCl/KCl (doygun) kullanıldı (Şekil 3.3). Bu elektrokimyasal analizler sırasında çözeltiden azot gazı geçirilerek çözünmüş oksijen uzaklaştırıldı.



Şekil 3.3. Si elektrot yüzeylerinin kaplandığı elektrokimyasal hücrenin şematik gösterimi.

3.3.2. Elektrot yüzeylerinin modifikasyonu

Modifikasyondan önce silisyum elektrotları aşağıdaki prosedürler uygulanarak temizlendi.

- Sırasıyla asetonitril ve saf su içerisinde ultrasonik banyoda 10 dk yıkandı.
- %2'lik HF içerisinde ultrasonik banyoda 5 dk yıkandı.
- Yeniden su ve asetonitril çözeltisinde ultrasonik banyoda 10 dk yıkandı.
- Azot gazıyla kurutuldu.

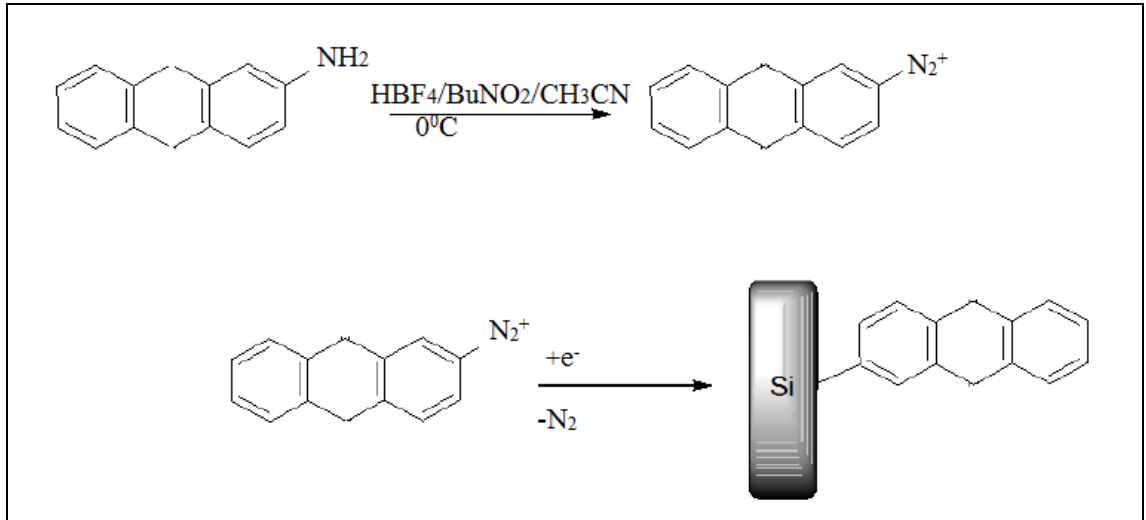
3.3.3. Antrasendiazonyum tuzunun sentezi

Literatürde verilen prosedür kullanılarak antrasendiazonyum tuz sentezi elde edildi (Dunker *et al.* 1936). 6 ml HBF₄ içerisine 2-aminoantrasen molekülü (0,01 mol) çözününceye kadar karıştırıldı ve sıcaklık tuz-buz banyosuyla -4°C'ye ayarlandı. 0,01

mol tert-butilnitritin (tBuNO_2) 3 ml asetonitril içerisindeki çözeltisinden karıştırılan çözeltiye damla damla ilave edildi. Çözelti tBuNO_2 ilavesinden sonra 45 dakika karıştırıldı ve $+4^\circ\text{C}$ 'de antrasendiazonyum tuzlarının çökmesi için bekletildi.

Reaksiyon sonucunda antrasen molekülüne karşılık gelen antrasendiazonyum katılarının çökelek oluşumu bir gece sonunda elde edildi. Oluşan bu çökelek eter ile yıkandı ve

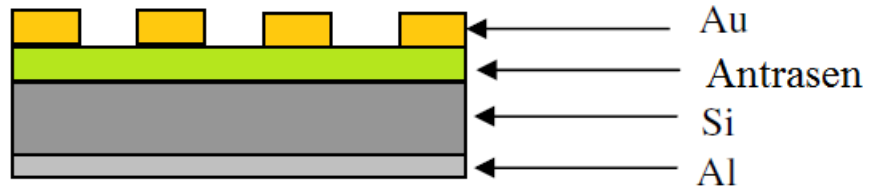
H-NMR ve FTIR spektroskopisi ile karakterize edildi. Ardından modifikasyon işlemi için diazonyum tuzu 0,1M Bu_4NBF_4 içeren asetonitril içerisinde çözüldü. Voltametri tekniğiyle bu çözelti kullanılarak diazonyum tuzunun indirgenme potansiyel aralığı belirlendi. Belirlenen potansiyel aralığının başlangıç potansiyeli $+0,8\text{ V}$ ve dönüşüm potansiyeli $-0,8\text{ V}$ aralığında tarama yapılarak Si yüzeyinin modifikasyonu elektrokimyasal indirgenme ile Şekil 3.4'deki gibi gerçekleştirildi.



Şekil 3.4. Antrasendiazonyum tuzunun kimyasal sentezi ve Si elektrot yüzeylerinin elektrokimyasal modifikasyonu

Sonuç olarak kimyasal sentez ve elektrokimyasal kaplama teknikleri kullanılarak *n*-Si kristallerin parlak yüzeylerine antrasen büyütülerek elde edilen Antrasen/*n*-Si/Al diyotları laboratuvar sıcaklığında 10 dakika asetonitril ile yıkandı ve azot gazı ile

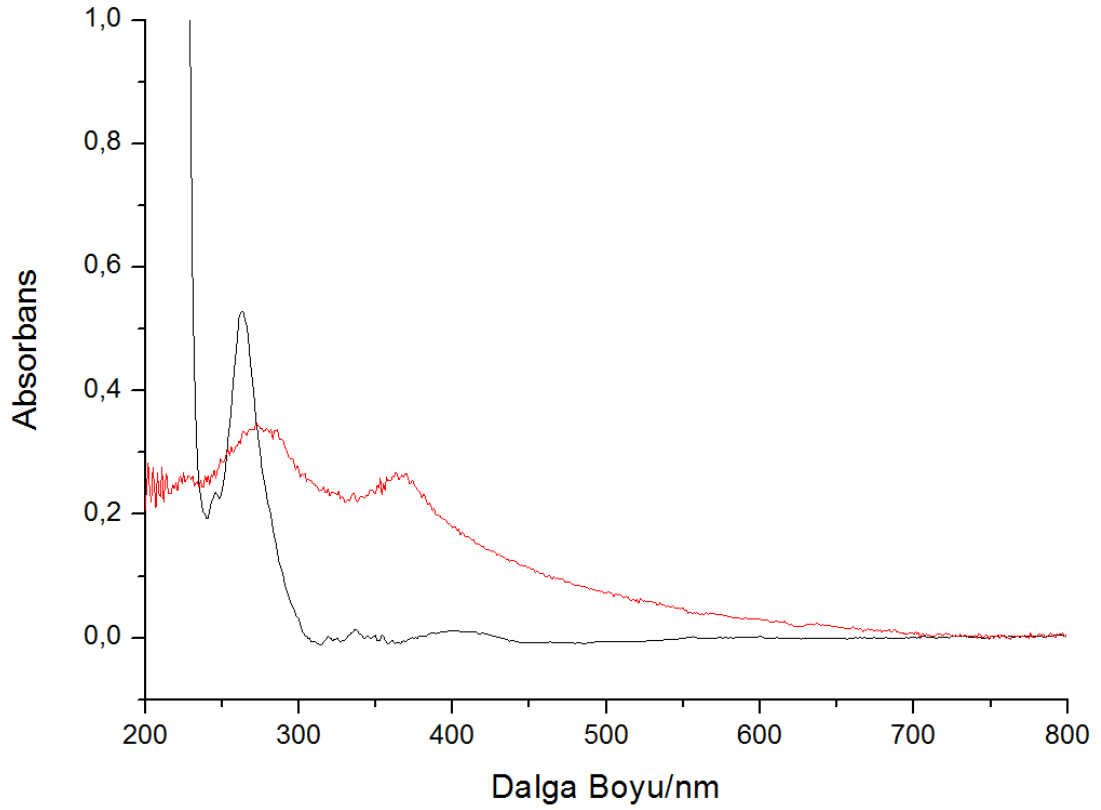
kurutuldu. Antrasen/*n*-Si/Al numuneleri, 1 mm çapındaki deliklere sahip maske üzerine omik kontak yüzleri yukarı bakacak şekilde yerleştirilerek üzerleri cam lamel ile kapatıldı. Vakum sisteminde $\sim 10^{-5}$ torr basınç altında numunelerin antrasen kaplanmış yüzey üzerine Au metali buharlaştırılarak doğrultucu (Schottky) kontaklar elde edildi. Laboratuvar sıcaklığında referans Au/*n*-Si/Al ve Au/Antrasen/*n*-Si/Al diyotların *I*-*V* ölçümleri alındı ve temel diyot parametreleri hesaplandı. Bu hesaplamalar sonucunda, Au/Antrasen/*n*-Si/Al diyodunun sıcaklığa bağlı *I*-*V*, *C*-*V* ölçümleri 300 K den başlanılarak 20 K adımlarla 140 K sıcaklığına kadar alındı. Kesit görüntüsü Şekil 3.5'te verilen Au/Antrasen/*n*-Si/Al yapısı ideale yakın elde edilen diyotlardan seçildi.



Şekil 3.5. Au/Antrasen/*n*-Si/Al diyodunun kesit görüntüsü

3.4. Antrasenin UV-vis soğurma spektrumu

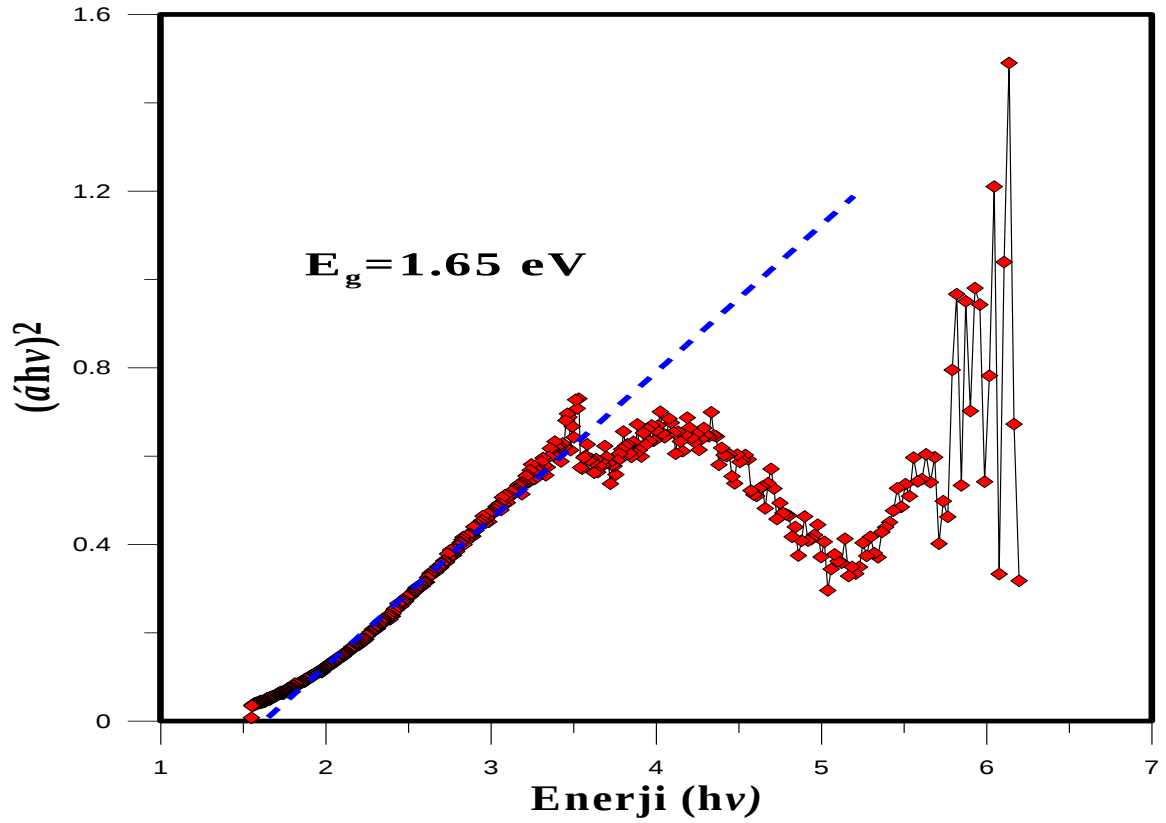
Şekil 3.6'da görüldüğü gibi siyah olarak gösterilen soğurma spektrumu *n*-Si yarıiletkenin yüzeyi ile temas halde olmayan aminoantrasendir. Bu spektrumda görüldüğü gibi aminoantrasenin maximum soğurma ölçüsü 5 ve bu soğurma ölçüsüne karşılık gelen dalga boyu ise 200-222 nm aralıklarında değişmektedir. Şekilde görülen kırmızı soğurma spektrumu ise antrasenin yarıiletke ile temas halideki soğurma spektrumudur. Bu spektrumda *n*-Si yüzeyine bağlı antrasenin maximum soğurması 0,348 ve bu soğurmaya karşılık gelen dalga boyu 272 nm dir. Sonuç olarak antrasenin yarıiletkenin yüzeyine bağlandıkları sonra soğurma katsayısının azalıp bu değere karşılık gelen dalga boyunun ise arttığı gözlenmiştir.



Şekil 3.6. Aminoantrasen ve yarıiletkenin yüzeyine bağlı antrasenin UV-vis soğurma spekturumu

3.5. Antrasen ince filminin enerji band aralığının belirlenmesi

Dahili soğurma band teorisine göre soğurma katsayısı ve fotonun enerjisi optiksel soğurmayı belirler. $\alpha(h\nu) = B(h\nu - E_g)^{1/2}$ bu formülde B sabit bir değerdir ve E_g ise optiksel enerji band aralığıdır. Burada α soğurma katsayısı, $h\nu$ fotonun enerjisidir. Bu çalışmada antrasen ince filmin soğurma ölçüleri oda sıcaklığında alındı. Enerji band aralığını belirlemek için $(\alpha h\nu)^2$ 'nin $h\nu$ 'ye karşı grafiği çizildi. Çizilen bu grafik fit edilerek fitin enerji eksenini kestiği nokta filmin enerji band aralığını olarak belirlendi. Sonuç olarak ince filmin enerji band aralığı optik soğurma spekturumu yardımıyla 1,65 eV olarak hesaplandı.



Şekil 3.7. Antrasen ince filminin oda sıcaklığında $(\alpha h\nu)^2$ 'nin $h\nu$ 'ye karşı grafiği

3.6. Deney ve Ölçüm Sistemi

Yaptığımız referans Au/n-Si/Al diyodunun sadece laboratuvar sıcaklığında I - V ölçümleri alındı. Au/Antrasen/n-Si/Al diyotlarının değişen sıcaklıklardaki karakterizasyonu belirlemek için KEITHLEY 487 Picoammeter/Voltage Source” cihazı ile I - V (akım-voltaj) ve HEWLET PACKART 4192 A, (50 Hz-13 MHz) LF IMPEDENCE ANALYZER” cihazı ile de C - V (kapasite-voltaj) ölçümleri sıcaklığa bağlı olarak alındı. Numune sıcaklığı LakeShore 340 sıcaklık kontrol ünitesi yardımıyla $\pm 0,1$ K hassasiyetle kontrol edildi.



Şekil 3.8. Akım-voltaj ve kapasite-voltaj ölçüm sistemi



Şekil 3.9. LakeShore 340 sıcaklık kontrol ünitesi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Giriş

Bu bölümde, laboratuvar şartlarında elde edilen referans Au/n-Si/Al diyodunun I - V (Akım-Voltaj) ölçümleri ve Au/Antrasen/n-Si/Al diyodunun I - V (Akım-Voltaj) ve C - V (Kapasite-Voltaj) ölçümlerinin sıcaklığa bağlı değişimleri, bu değişimlerin değerlendirilmesinde kullanılan metotlar ve elde edilen temel diyot parametreleri yer almaktadır.

4.2. I - V (Akım-Voltaj) Ölçümleri ve Cheung Fonksiyonlarının Kullanılması

Bu bölümde I - V ve C - V ölçümleri için deney düzeneği kurularak Au/Antrasen/n-Si/Al diyodunun sıcaklığa bağlı I - V , C - V ölçümleri 300 K den başlanılarak 20 K adımlarla 140 K sıcaklığına kadar alındı.

Elde edilen I - V ölçümleri yardımıyla diyodun, lineer davranış sergilediği düz beslem tarafındaki değişiminden idealite faktörü, engel yüksekliği hesaplandı. Lineerliğin bozulduğu yüksek akım değerlerine karşılık gelen bölgede seri direnç değerleri hesaplandı. Referans Au/n-Si/Al diyodunun laboratuvar sıcaklığındaki I - V ölçümlerinden idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri hesaplandı.

Termoiyonik Emisyon (TE) teorisine göre, bir Schottky diyodun doğru beslem akımı uygulanan potansiyele bağlı olarak;

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

ifadesi ile verilmektedir. Bu ifadede $eV \gg nkT$ olması durumunda üstel terim yanında ‘1’ ihmal edilebilir. Bu durumda ifadenin yeni hali;

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

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

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

“ n ” sembolü idealite faktörünü olup diyodun karakteristiğini belirleyen birimsiz bir parametredir. İdeal bir diyot için $n=1$ 'dir ve n değeri 1'den uzaklaştıkça, yani değeri büyüdükçe diyot ideal olmayan bir davranış sergiler.

$\ln I$ - V grafiği çizildiğinde, düz beslem kısmındaki lineer bölgeye doğru bir fit çizilerek bu doğrunun eğiminden $dV/d(\ln I)$ elde edilir.

(4.3) ifadesinde “ e ” elektronun yükü olup değeri $1,6 \times 10^{-19}$ C, “ k ” Boltzmann sabitidir değeri $8,625 \times 10^{-5}$ eV/K ve T mutlak sıcaklık (K) tır. Bu değerler yerine yazılarak her bir sıcaklık için idealite faktörü değerleri hesaplandı. Fit edilen doğrunun $V=0$ 'da düşey eksenini kestiği nokta I_0 doyma akım yoğunluğunu verir.

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

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.

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

Burada, A , diyodun etkin alanı ($A=0,00785 \text{ cm}^2$) A^* , Richardson sabiti olup n -Si için $112 \text{ A/K}^2\text{cm}^2$ 'dir.

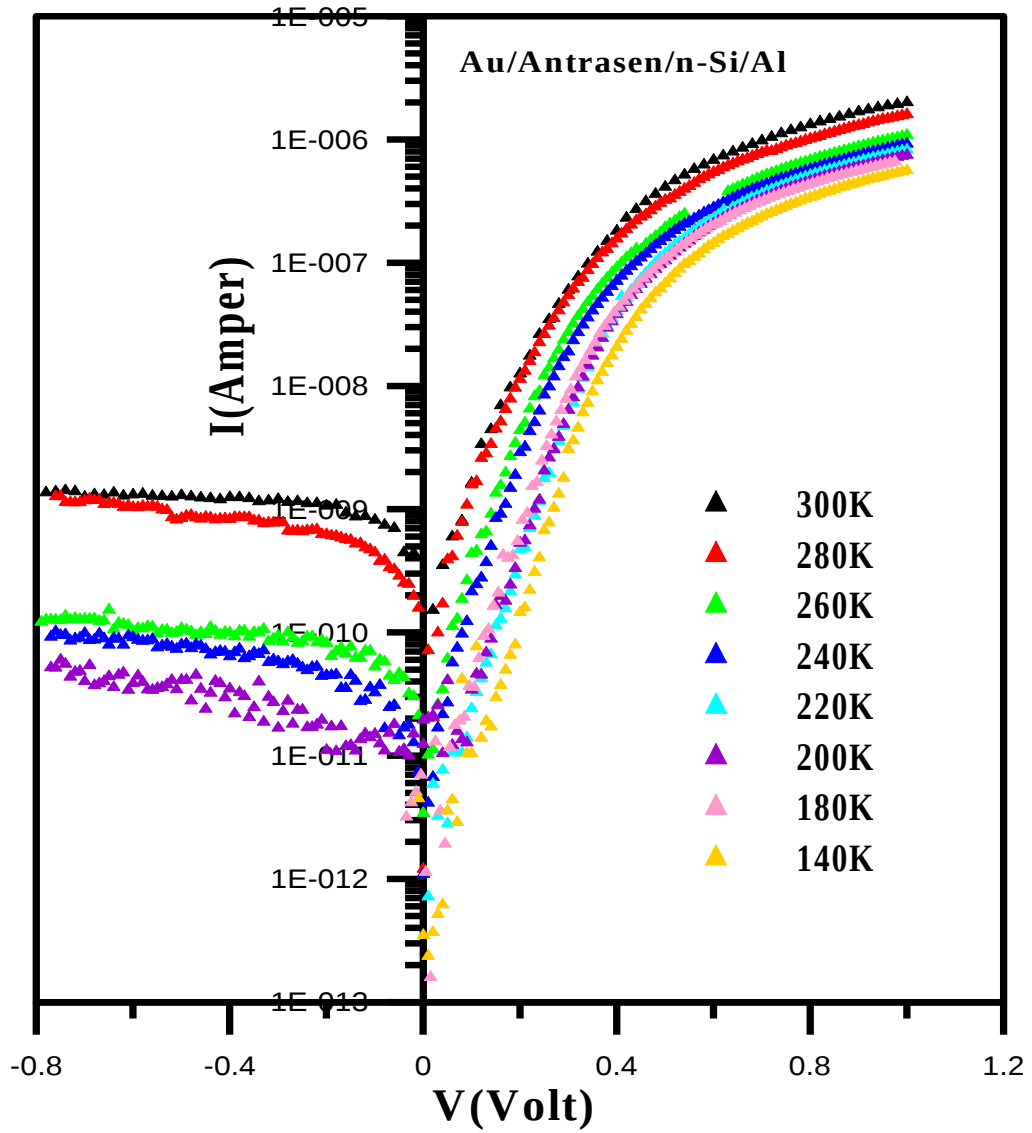
Au/Antrasen/ n -Si/Al diyodunun sıcaklığa bağlı akım-voltaj grafikleri Şekil 4.1'de verilmiştir. Au/Antrasen/ n -Si/Al diyoduna ait geleneksel metot kullanılarak hesaplanan idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri ile Cheung fonksiyonlarından elde edilen idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri Çizelge 4.2'de görülmektedir.

Laboratuvar sıcaklığında elde edilen referans Au/ n -Si/Al ve Au/Antrasen/ n -Si/Al diyotlarının akım-voltaj grafikleri Şekil 4.2'de verilmiştir. Çizelge 4.1'de referans Au/ n -Si/Al diyoduna ait geleneksel metot kullanılarak hesaplanan idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri ile Cheung fonksiyonlarından elde edilen idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri verilmektedir.

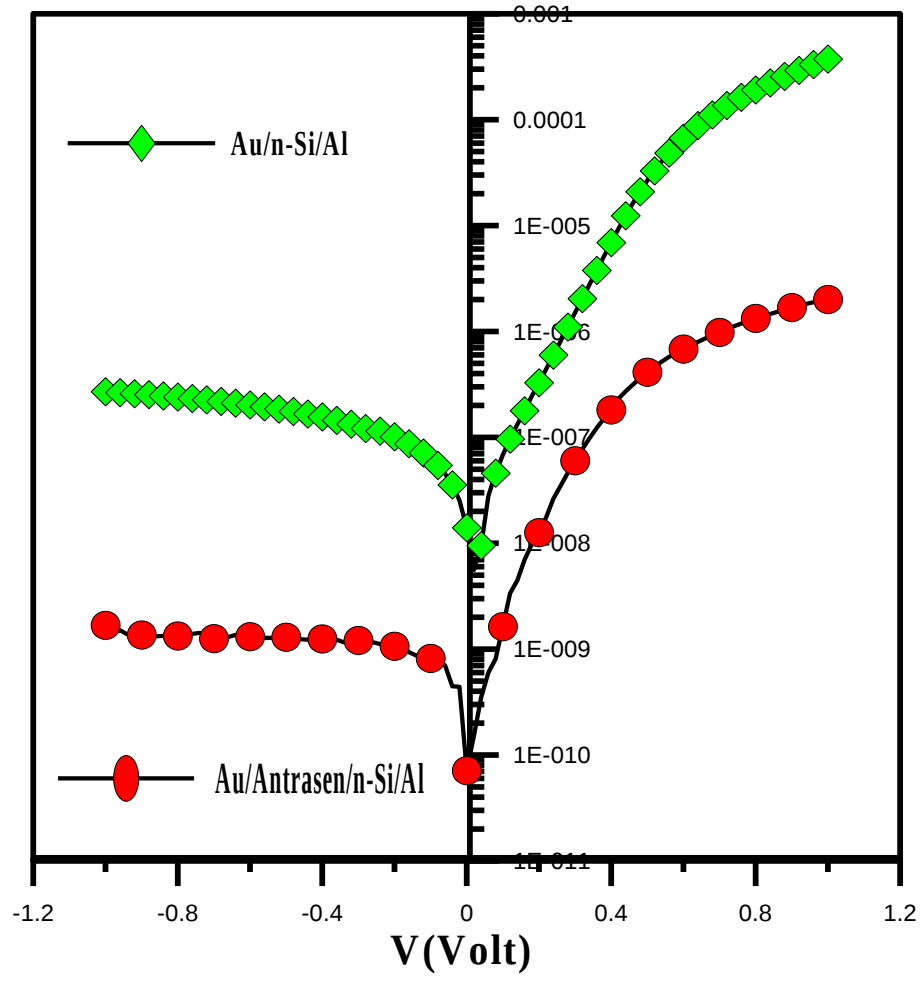
4.2'deki çizelge incelendiğinde düşük sıcaklıktan yüksek sıcaklıklara doğru gidildikçe idealite faktörü değerleri azalırken engel yüksekliği değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu değişimler Şekil 4.3'de gösterilmiştir.

(2.10) ve (2.12) (Cheung fonksiyonları) eşitlikleri kullanılarak, Au/Antrasen/ n -Si/Al diyodun 300 K-140 K sıcaklık aralıklarında engel yükseklikleri ve idealite faktörleri bu ifadeler yardımıyla hesaplandı. (2.10) denkleminde verilen $dV/d(\ln I)$ 'nın I 'ya karşı çizilen grafiği bir doğru vermektedir. Doğrunun eğiminden seri direnç değerleri; $I=0$ 'da düşey eksen kestiği noktadan idealite faktörü elde edildi. Au/Antrasen/ n -Si/Al diyodunun sıcaklığa bağlı, Cheung fonksiyonlarına ait $dV/d(\ln I)$ - I grafiği Şekil 4.4'de verilmiştir. Bu grafikten elde edilen idealite faktörü ve seri direnç değerleri Çizelge 4.2'de görülmektedir. Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi idealite faktörü ve seri direnç değerleri artan sıcaklık ile azalmıştır. (2.12) denklemi yardımıyla elde edilen $H(I)$ - I grafiğinin eğimi seri dirençi (R_s), $I=0$ iken doğrunun düşey eksen kestiği noktadan

engel yüksekliği elde edildi. $H(I)$ - I grafiği sıcaklığa bağlı olarak Şekil 4.5’de verilmiştir. Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi engel yüksekliği artan sıcaklıkla artarken, seri direnç değerleri azalmıştır.



Şekil 4.1. Au/Antrasen/n-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı I - V grafiği



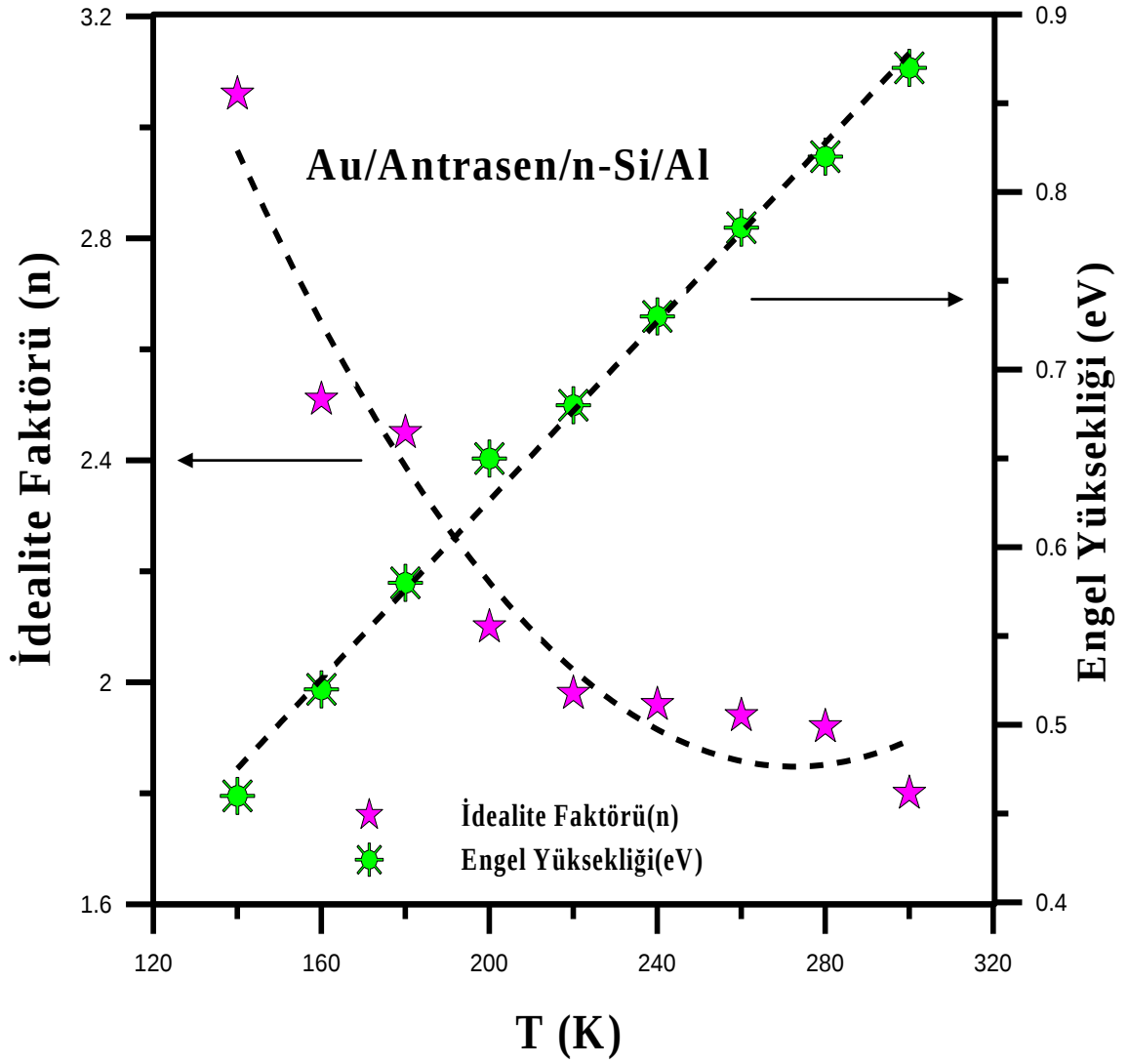
Şekil 4.2. Referans Au/n-Si/Al ve Au/Antrasen/n-Si/Al diyotlarına ait I - V grafiği

Çizelge 4.1. Referans Au/n-Si/Al diyoduna ait I - V grafiğinden elde edilen temel diyot parametreleri

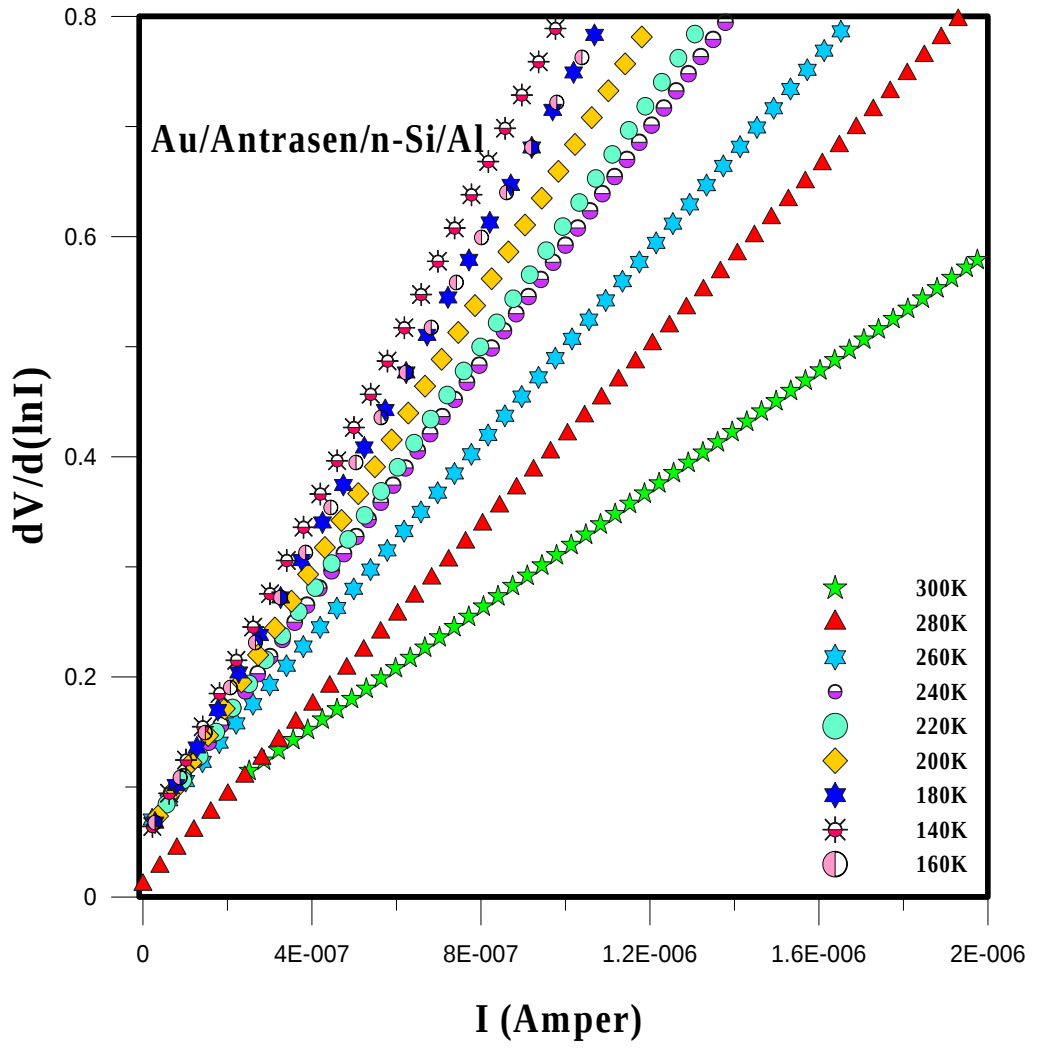
Sıcaklık	I - V		$dV/d(\ln I)$		$H(I)$ - I	
	n	Φ_b (eV)	n	R_s (k Ω)	Φ_b (eV)	R_s (Ω)
Laboratuvar Sıcaklığı	3,15	0,22	3,19	975	0,65	1173

Çizelge 4.2. Au/Antrasen/n-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı I-V grafiğinden elde edilen temel diyot parametreleri

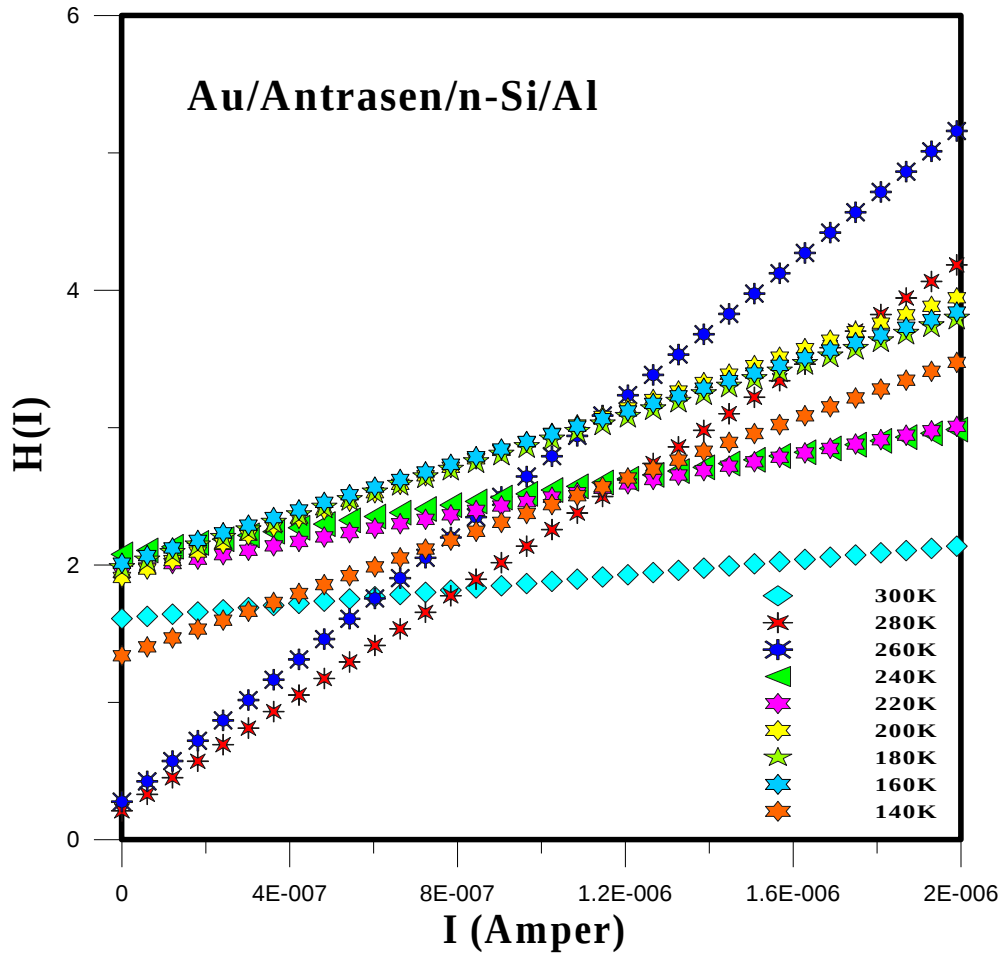
<i>Sıcaklık (K)</i>	<i>I-V</i>		<i>dV/d(lnI)</i>		<i>H(I)-I</i>	
	<i>n</i>	$\Phi_b(\text{eV})$	<i>n</i>	$R_s(\text{k}\Omega)$	$\Phi_b(\text{eV})$	$R_s(\text{k}\Omega)$
140	3,06	0,46	3,90	760	0,34	1073
160	2,51	0,52	3,48	688	0,57	919
180	2,45	0,58	3,31	618	0,59	913
200	2,1	0,65	3,08	560	0,62	1023
220	1,98	0,68	3,04	535	0,64	534
240	1,96	0,73	2,94	440	0,70	456
260	1,94	0,78	2,49	342	0,96	344
280	1,92	0,82	2,31	322	1,01	304
300	1,80	0,87	1,90	268	1,30	228



Şekil 4.3. Au/Antrasen/n-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı I - V grafiğinden elde edilen idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerinin sıcaklıkla değişimi

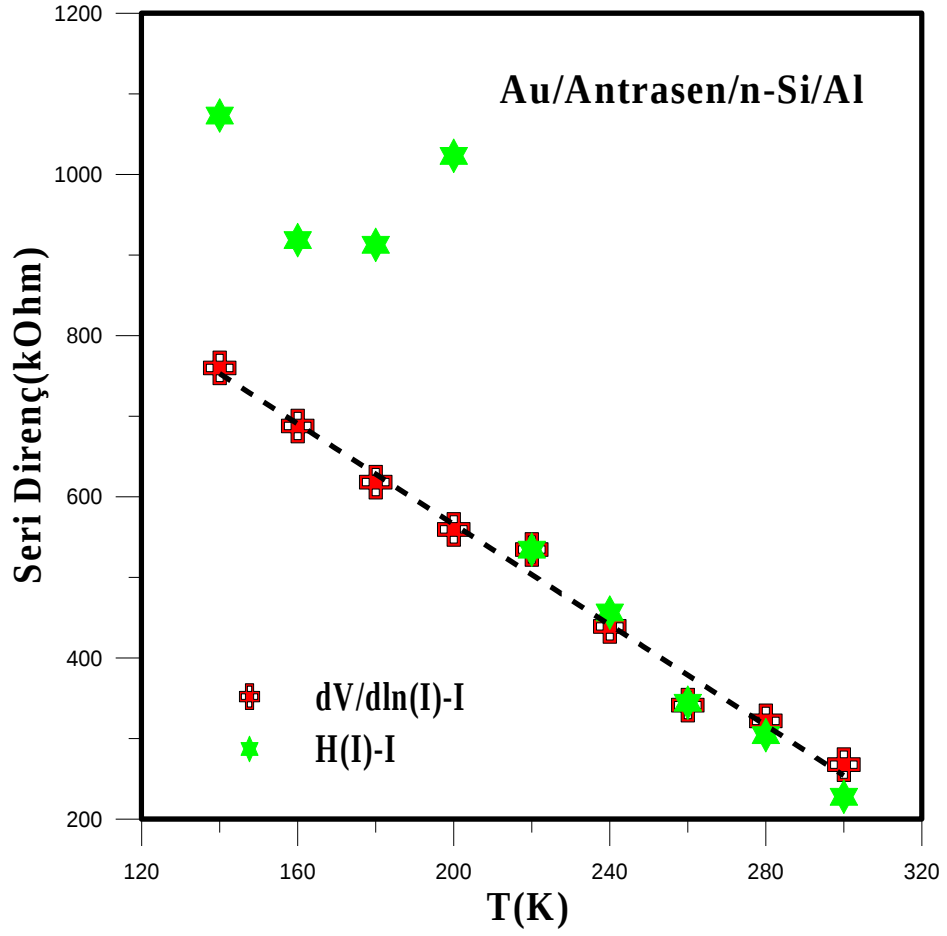


Şekil 4.4. Au/Antrasen/n-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı $dV/d(\ln I) - I$ grafiği



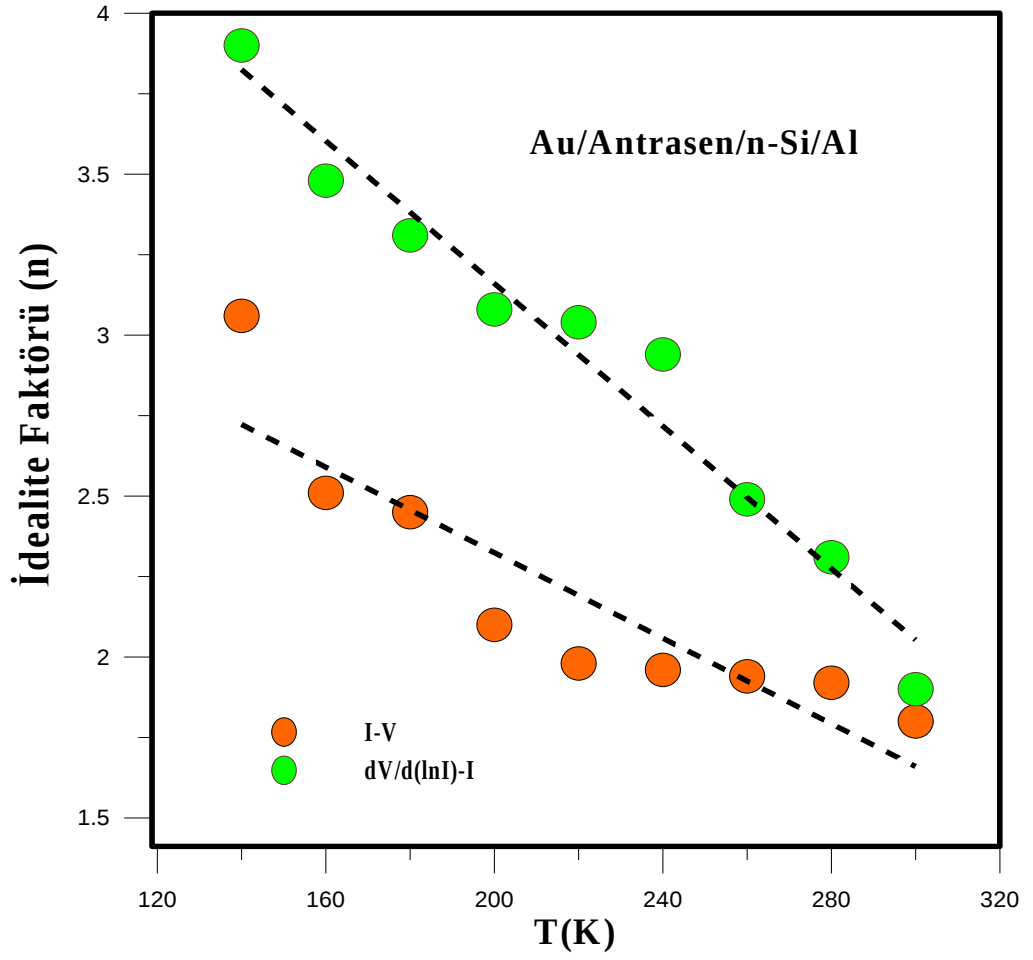
Şekil 4.5. Au/Antrasen/n-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı $H(I)$ - I grafiği

Au/Antrasen/n-Si/Al diyodunun Cheung fonksiyonları kullanılarak elde edilen seri direnç değerlerinin sıcaklıkla değişimini Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Şekil 4.6'da görüldüğü gibi yüksek sıcaklıklara doğru gidildikçe seri direnç değerlerinde azalma görülmektedir. Bu durum, sıcaklık arttıkça diyottan daha fazla akım geçmesi ile açıklanabilir. (220K-300K) sıcaklık aralığında (2.10) ve (2.12) eşitlikleri kullanılarak elde edilen seri direnç değerlerinin sıcaklıkla değişiminin yaklaşık olarak aynı olduğunu söyleyebiliriz. Sıcaklığın düşmesiyle seri direnç değerlerinin artması; yüksek sıcaklıklarda iyonizasyon ile serbest taşıyıcı yoğunluğunun artmasının bir sonucu olarak yorumlanabilir (Chand and Kumar 1996; Soylu 2007).

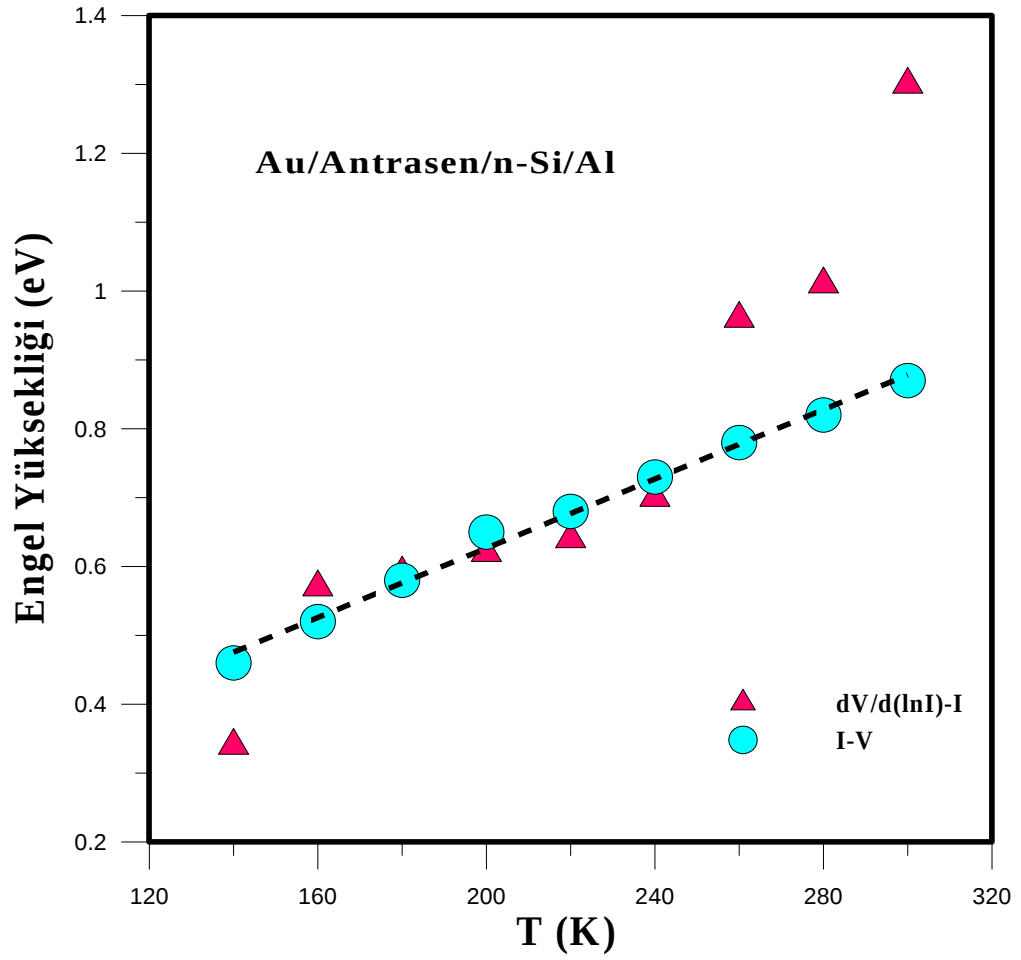


Şekil 4.6. Au/Antrasen/n-Si/Al diyoduna ait Cheung fonksiyonlarından elde edilen seri direnç değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de Au/Antrasen/n-Si/Al diyodunun Cheung fonksiyonları ve geleneksel I - V ölçümlerinden elde edilen idealite faktörü ve engel yükseklikleri değerlerinin sıcaklık ile değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.7’de görüldüğü gibi hem Cheung fonksiyonları ile elde edilen idealite faktörü hem de geleneksel I - V ölçümlerinden elde edilen idealite faktörü artan sıcaklık değerleriyle azalmaktadır. Şekil 4.8’de görüldüğü gibi Cheung fonksiyonları ve geleneksel I - V ölçümlerinden elde edilen engel yükseklikleri artan sıcaklık değişimleriyle artmaktadır. Her iki metotla elde edilen idealite faktörü ve engel yüksekliği uyumlu bir davranışa sahiptir. Bu durum, değişik değerlendirme metotları arasındaki uyumu gösterir.



Şekil 4.7. Au/Antrasen/n-Si/Al diyodunun geleneksel metot ve Cheung fonksiyonları ile hesaplanan idealite faktörlerinin sıcaklığa karşı değişimi



Şekil 4.8. Au/Antrasen/n-Si/Al diyodunun geleneksel metot ve Cheung fonksiyonları ile hesaplanan engel yüksekliklerinin sıcaklığa karşı değişimi

Literatürde çok iyi bilinen tekli dağılımları açıklayabilen modifiye edilmiş Richardson denklemini;

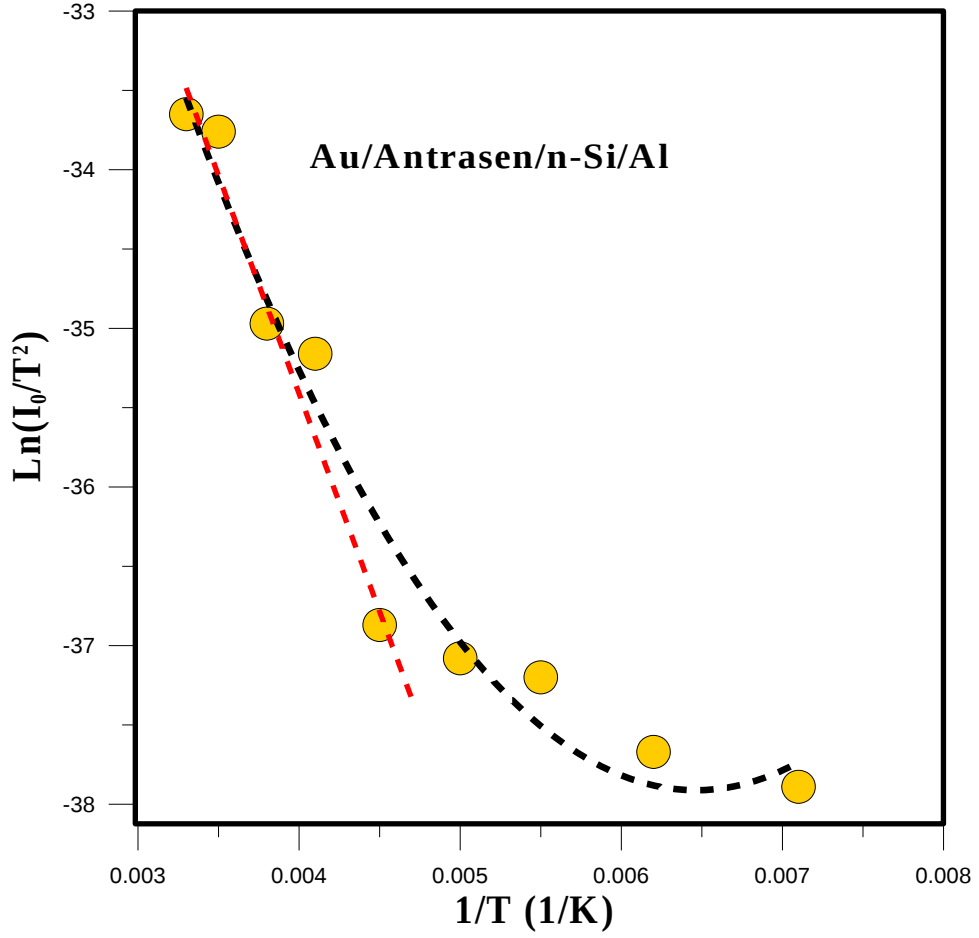
$$I_0 = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_{ap}}{kT}\right) \quad (4.6)$$

(4.7)

$$\Phi_{ap} = \overline{\Phi}_b - \frac{e\sigma_0^2}{2kT}$$

$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) - \left(\frac{e^2 \sigma_0^2}{2kT^2}\right) = \ln(AA^*) - \frac{e\bar{\Phi}_b}{kT} \quad (4.8)$$

(4.6) ve (4.7) denklemlerinin birleştirilmesiyle modifiye edilmiş Richardson denklemi elde edildi. Şekil 4.6. Au/Antrasen/n-Si/Al Schottky diyodunun $\ln(I_0/T^2)$ 'nin $1/T$ 'ye karşın çizilen modifiye edilmiş Richardson grafiğidir. Modifiye edilmiş Richardson grafiğinde yapılan lineer fitin y-eksenini kesen noktası modifiye edilmiş Richardson sabitini vermektedir. Doğrunun eğiminden (4.8) eşitliği kullanılarak elde edilen Richardson sabitinin değeri $A^*=3.2 \cdot 10^{-9} A/K^2 cm^2$ olarak bulundu. Hesaplanan bu değer n -Si için verilen $112 A/K^2 cm^2$ değerinden çok küçüktür. Bu durum düşük ve yüksek engelli alanlardan ibaret olan arayüzeydeki potansiyel dalgalanmalarına ve homojen olmayan engel yüksekliğine yorumlanabilir (Aydoğan 2003).



Şekil 4.9. Au/Antrasen/n-Si/Al Schottky diyodunun $\ln(I_0/T^2)$ 'nin $1/T$ ' ye karşı çizilen modifiye edilmiş Richardson grafiği

4.3. I - V (Akım-Voltaj) Ölçümleri ve Norde Fonksiyonlarının Kullanılması

Metal -yarıiletken kontaklarda seri direnç, engel yüksekliği gibi parametrelerini tayin etmek amacıyla geliştirilen yöntemlerden biri de Norde tarafından $n=1$ durumu için seri direnç ve engel yüksekliğini tanımlayan, $F(V)$ fonksiyonudur. Bu fonksiyon kullanılarak Au/Antrasen/n-Si/Al Schottky diyodunun 300K-140K arasında değişen sıcaklıklar için seri direnç ve engel yüksekliği hesaplandı.

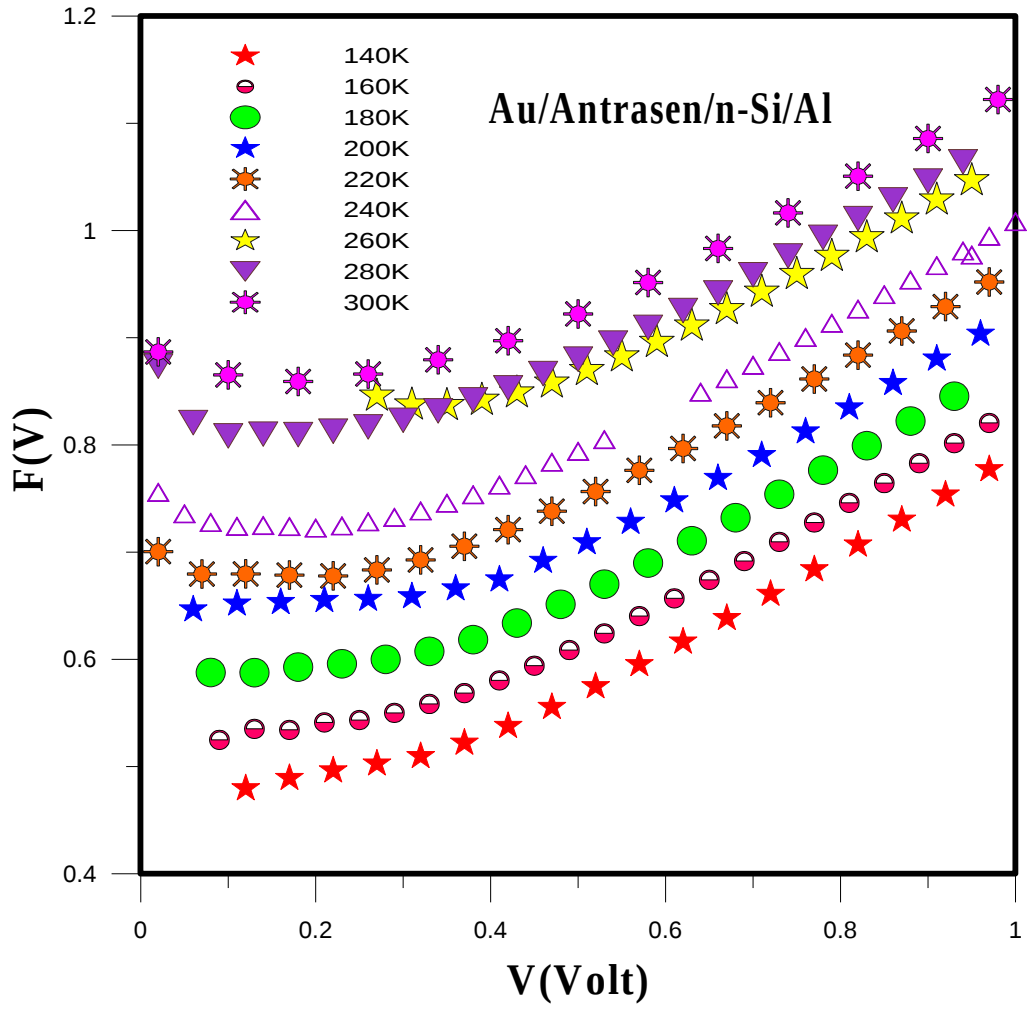
$$F(V) = \frac{V}{2} - \left(\frac{kT}{2} \right) \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (4.9)$$

(4.9) denklemindeki $I(V)$ ifadesi I - V grafiğinden elde edilen akımdır. Bu hesaplamalarda öncelikle $F(V)$ 'nin V 'ye karşı olan minimum değerlerini belirlemek gereklidir. Buradan engel yüksekliği (4.10) denklemiyle hesaplanır.

$$\phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{2} - \frac{kT}{e} \quad (4.10)$$

$F(V_0)$ değeri $F(V)$ 'nin minimum değeridir ve V_0 ise bu değere karşılık gelen minimum voltajdır. Seri direnç değerleri ise (4.11) denklemi kullanılarak hesaplanır.

$$R_s = \frac{(\gamma - n)}{\beta I_o} \quad (4.11)$$



Şekil 4.10. Au/Antrasen/n-Si/Al Schottky diyodunun Norde fonksiyonu grafiği

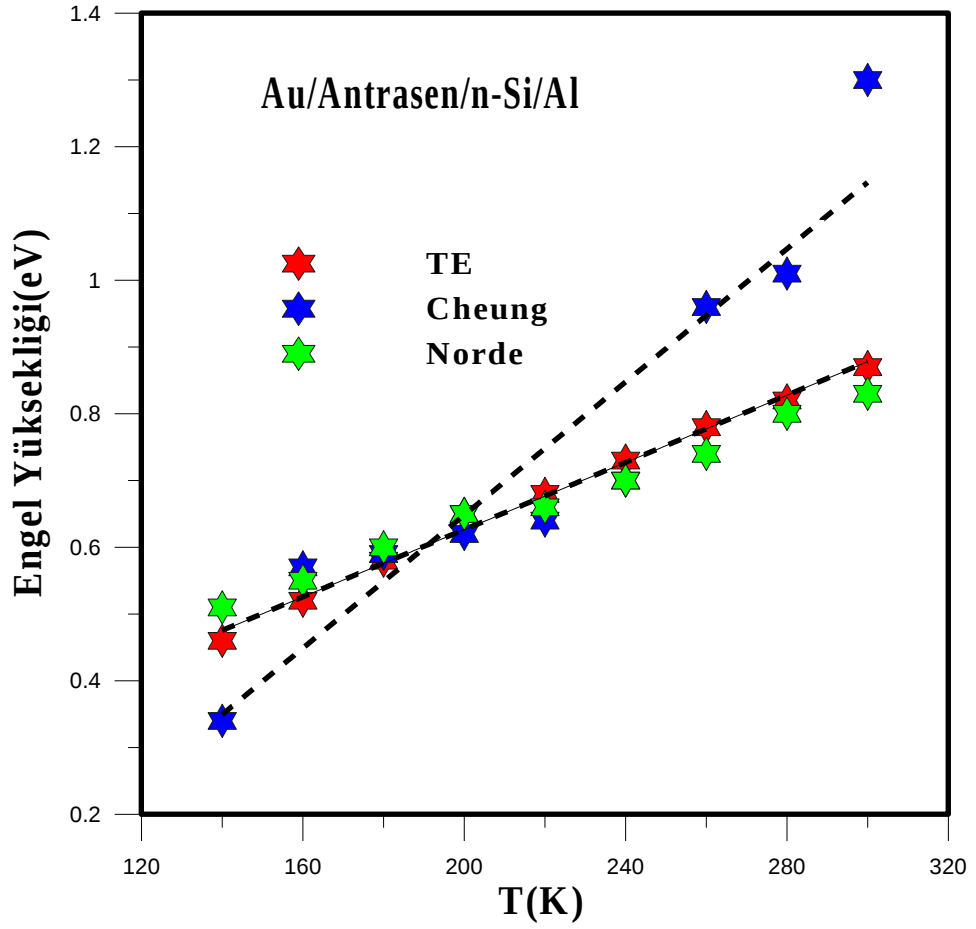
Norde fonksiyonları kullanılarak elde edilen engel yüksekliği ve seri direnç değerleri Çizelge 4.3’de görülmektedir. Çizelge 4.3’de görüldüğü gibi engel yüksekliği artan sıcaklık değerleriyle artarken ve seri direnç değerleri artan sıcaklık ile azalmıştır. Bu durum engel yüksekliğin homojen olmadığına atfedilmiştir (Güllü *et al.*2010; Çaldıran 2013).

Çizelge 4.3. Au/Antrasen/n-Si/Al diyodunun Norde fonksiyonları kullanılarak elde edilen temel diyot parametreleri

<i>Sıcaklık (K)</i>	$\Phi_b(eV)$	$R_s(k\Omega)$
140	0,51	510
160	0,55	201
180	0,60	392
200	0,65	915
220	0,66	820
240	0,70	198
260	0,74	307
280	0,80	590
300	0,83	256

Şekil 4.11'de görüldüğü gibi geleneksel, Cheung and Norde metotları kullanılarak elde edilen engel yüksekliklerinin değeri artan sıcaklıkla artmaktadır. (140K-300K) sıcaklık aralığında bu üç metotla elde edilen değerler yaklaşık olarak aynıdır. Bu durum temel diyot parametrelerinin çeşitli yöntemler kullanılarak elde edilmesinin bir göstergesidir.

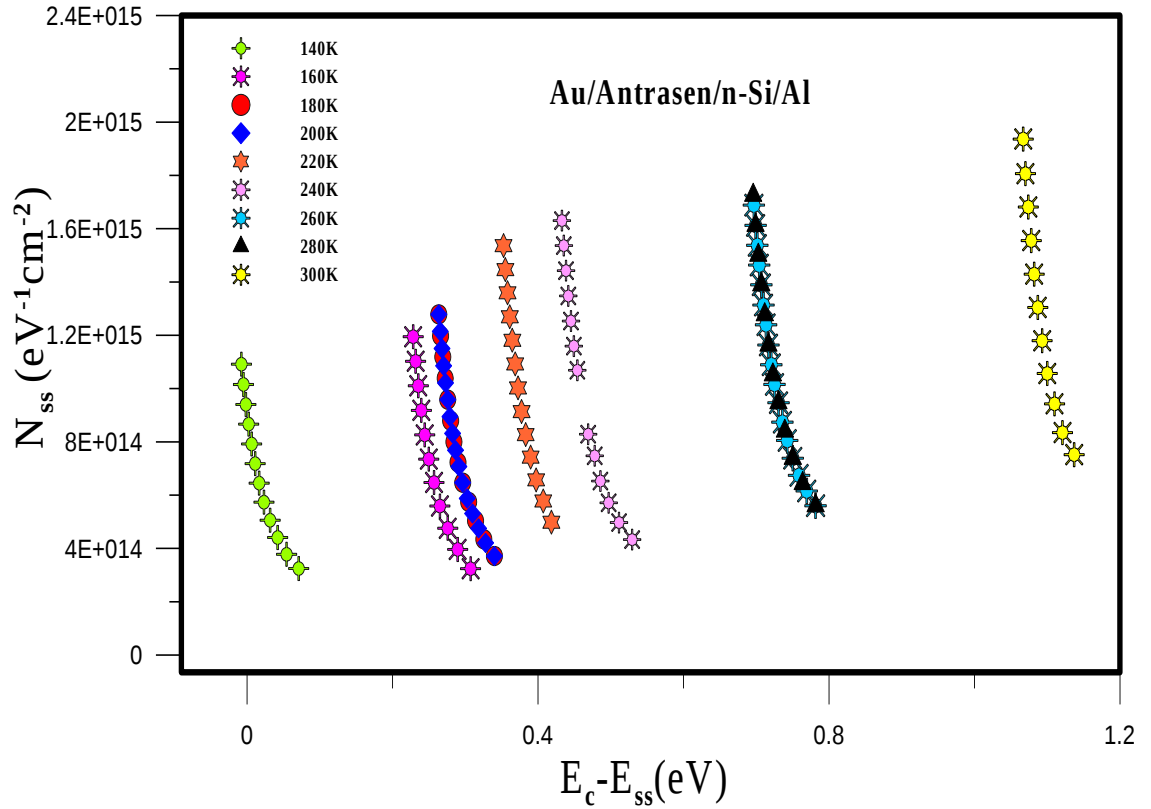
Sıcaklık artışıyla engel yüksekliğinin artması arayüzeyde yanal olarak genişleyen homojen olmayan engelin etkisi olarak açıklanmıştır(Aydoğan 2003).



Şekil 4.11. Au/Antrasen/n-Si/Al Schottky diyodunun TE, Cheung ve Norde metotları kullanılarak elde edilen engel yüksekliklerinin sıcaklığa karşı değişimi

4.4. Arayüzey Hâl Yoğunluğu

Düz beslem akım-gerilim karakteristiklerinden hesaplanan engel yüksekliği ve idealite faktörü değeri yarıiletkenle dengede olan arayüzey hâllerinin enerji dağılımıyla kontrol edilir. Şekil 4.12' de sıcaklığa bağlı arayüzey hal yoğunluğunun, arayüzey hal enerjisine karşı değişimi gösterilmiştir. Şekil 4.12'de görüldüğü gibi her sıcaklık değerinde artan arayüzey hal enerjisi ile arayüzey hal yoğunluğunun azaldığı görülmektedir. Bu değişimler merkezdeki rekombinasyonların azalmasına ve Au ile n-silisyum arasındaki antrasen organik tabakanın içindeki yüzey elektronik durumların varlığına atfedildi (Çaldıran *et al.* 2013). Ayrıca, arayüzey hâllerinin artan sıcaklıkla büyüklüğü azalarak iletkenlik bandı tabanından band ortasına doğru kaydığı gözlenmiştir.



Şekil 4.12. Au/Antrasen/n-Si/Al Schottky diyodunun arayüzey hal yoğunluğunun arayüzey hal enerjisine karşı değişimi

4.5. C-V (Kapasite-Voltaj) Ölçümleri ve Yapılan Hesaplamalar

Metal-yarıiletken doğrultucu kontaklarda uzay yükü bölgesi bir kondansatör gibi davranmaktadır ve bu bölgesinin kapasitesi, metal/yarıiletken arayüzeyin oluşumu hakkında önemli bilgiler vermektedir. Kapasitenin ters beslem durumunda gerilime bağlı değişiminden, doğrultucu kontakın engel yüksekliği, yarıiletkendeki taşıyıcı konsantrasyonu, difüzyon potansiyeli ve Fermi enerji seviyesi gibi parametreler tayin edilebilir.

Au/Antrasen/n-Si/Al diyodu için C-V ölçümleri, 300 K ile 160 K sıcaklık aralığında sabit 500 kHz frekans değerinde ve -1V ile +2V gerilim aralığında, HP 4192A LF Impedance Analyzer cihazı ile yapıldı.

$$C = A \left(\frac{\varepsilon_s \varepsilon_0 e N_d}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(V_d - \frac{kT}{e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.12)$$

Burada, ε_s , yarıiletkenin dielektrik sabiti (Si için $\varepsilon_s=11,8$), $\varepsilon_0=8,85 \times 10^{-14}$ F/cm olup, boşluğun dielektrik sabiti, 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. (4.12) denklemini düzenleyecek olursak;

$$C^{-2} = \frac{2(V_d + V)}{\varepsilon_s \varepsilon_0 e A^2 N_d} \quad (4.13)$$

şeklinde olur. $(C^{-2} - V)$ grafiğine uygun lineer fit çizildiğinde $C^{-2}=0$ için difüzyon potansiyeli V 'ye eşit olur. Yani $V_d=V$ olur. Bu grafikler yardımıyla elde edilen farklı sıcaklıklardaki difüzyon potansiyelleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

(4.13) ifadesinin V 'ye göre türevi alınırsa,

$$\frac{d(C^{-2})}{dV} = \frac{2}{\varepsilon_s \varepsilon_0 e A^2 N_d} \quad (4.14)$$

(4.14) ifadesinden N_d iyonize olmuş donör konsantrasyonu çekilirse,

$$N_d = \frac{2}{\varepsilon_s \varepsilon_0 e A^2 \frac{d(C^{-2})}{dV}} \quad (4.15)$$

olarak elde edilir. Yine $(C^{-2}-V)$ grafiğinden elde edilen taşıyıcı konsantrasyonları, (300K-160K) sıcaklık aralığında Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Termal dengede n -tipi bir yarıiletkendeki elektron konsantrasyonu,

$$n_0 = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \quad (4.16)$$

ile ifade edilmektedir. Burada, N_c , termal dengede iletkenlik bandındaki hal yoğunluğu olup, Si için $N_c=2,8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 'tür. n -tipi bir yarıiletken için $N_d \gg n_i$ olacağı için $n_0 \approx N_d$ olur (Neamen 1992). Burada n_i , intrinsic elektron konsantrasyonudur. Bu durum dikkate alındığında, (4.16) ifadesi,

$$N_d = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \quad (4.17)$$

olarak elde edilir. (4.17) ifadesinin tabii logaritması alınacak olursa ve iletkenlik bandı referans seviye olarak ($E_c=0$) kabul edilirse,

$$E_f = kT \ln\left(\frac{N_d}{N_c}\right) \quad (4.18)$$

Fermi enerji seviyesi elde edilmiş olur. Au/Antrasen/n-Si/Al diyoduna ait Fermi enerji seviyesi değerleri (300K-160K) sıcaklık aralığında Çizelge 4.4'te verilmiştir. C-V grafiğinden ideal diyot için engel yüksekliği;

$$\Phi_b = E_f + V_d \quad (4.19)$$

ile verilmektedir (Neamen 1992). İdeal olmayan durum için bu ifade,

$$\Phi_b = \frac{V_d}{n} + E_f \quad (4.20)$$

ile verilir.

C - V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği ifadesindeki n değeri, I - V grafiklerinden elde edilen idealite faktörüdür. Au/Antrasen/ n -Si/Al diyoduna ait C - V ölçümlerinden elde edilen engel yükseklikleri değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

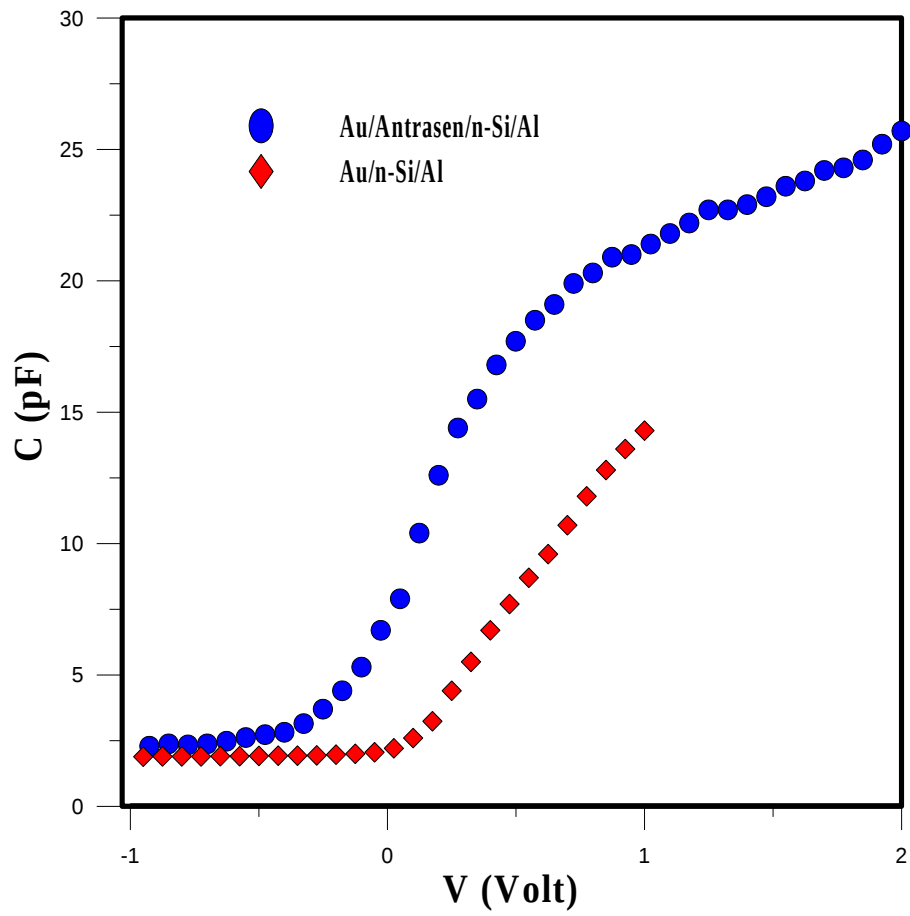
Şekil 4.13'de referans Au / n -Si/Al ve Au/Antrasen/ n -Si/Al diyotlarına ait laboratuvar sıcaklığında $f=500$ kHz sabit frekansta kapasite-voltaj grafikleri gösterilmektedir. Bu grafik incelendiğinde; aynı gerilimde değerinde Au/Antrasen/ n -Si/Al diyodunun kapasitesinin Au / n -Si/Al diyodunun kapasitesinden daha büyük bir değere sahip olduğunu söyleyebiliriz. Şekil 4.14'de Au/Antrasen/ n -Si/Al diyodunun 500 kHz sabit frekans altında sıcaklığa bağlı kapasite-voltaj değişimini göstermektedir. Şekil 4.14 grafiğinde görüldüğü gibi hem düz beslem hemde ters beslemde yüksek sıcaklıklara doğru gidildikçe kapasite artarken, düşük sıcaklıklara doğru gidildikçe kapasite azalmaktadır. Ayrıca düz beslemdeki uygulama gerilimi sıfıra doğru yaklaştıkça kapasite değerleri her bir sıcaklık değeri için azalmaktadır. Şekil 4.15 grafiğinde Au/Antrasen/ n -Si/Al diyodunun farklı sıcaklıklardaki ters beslem C - V grafiğini göstermektedir. Ters beslem kapasite-voltaj grafiğinde düşük sıcaklıklara doğru gidildikçe kapasitenin azaldığı, yüksek sıcaklıklara doğru gidildikçe kapasitenin arttığı görülmektedir. Ayrıca uygulama gerilimi sıfıra doğru gittikçe ters beslemdeki kapasite değerleri artmaktadır.

Ters beslem altında deplasyon bölgesinin genişleyeceği ve azalan gerilim ile N_d azalacağı için kapasitenin artması beklenir. (4.13) denkleminde görüldüğü gibi donör konsantrasyonu ile kapasite ters orantılıdır.

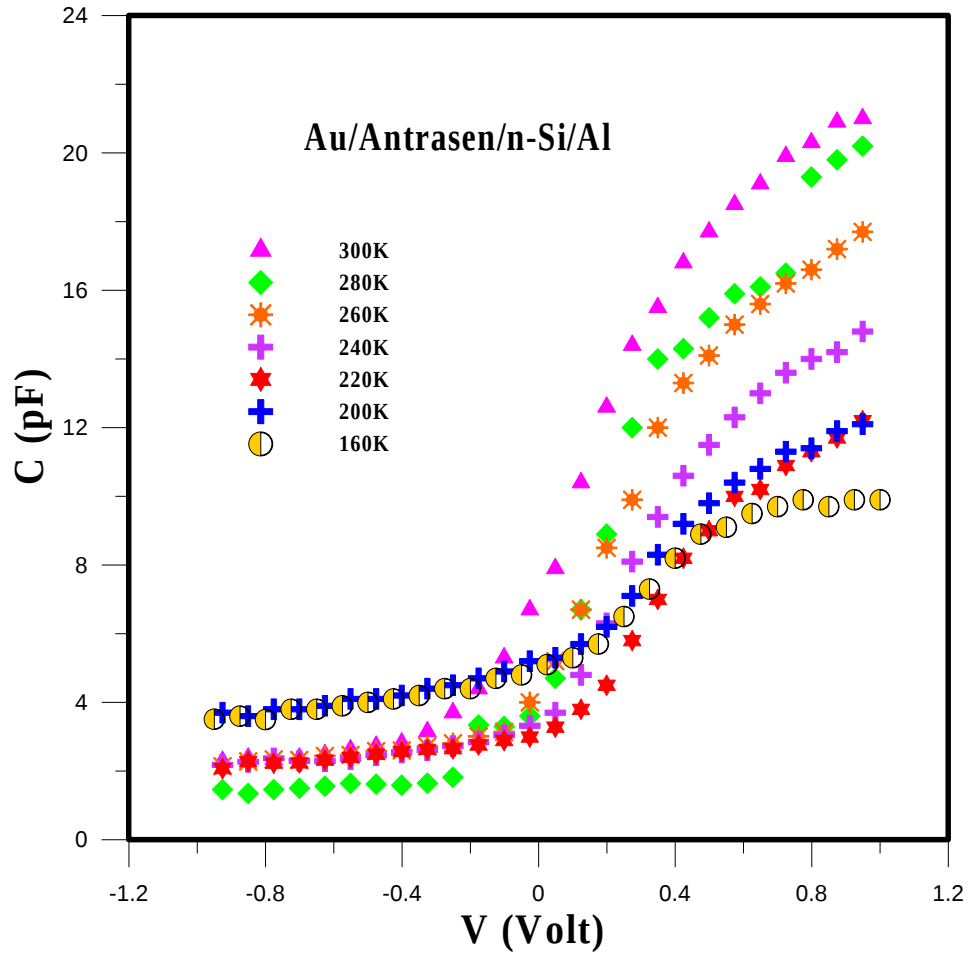
Şekil 4.16'da, 500 kHz sabit frekans değerinde sıcaklığa bağlı olarak verilen ters beslem C - V grafiğinden elde edilen $1/C^2$ - V değişimini göstermektedir. C - V grafiğinden görüldüğü gibi düşük sıcaklıklarda kapasite küçük, yüksek sıcaklıklarda ise kapasite büyüktür. Bu yüzden $1/C^2$ değerleri, aynı uygulama gerilimlerinde düşük sıcaklıklarda

büyük iken, yüksek sıcaklıklarda ise küçüktür.

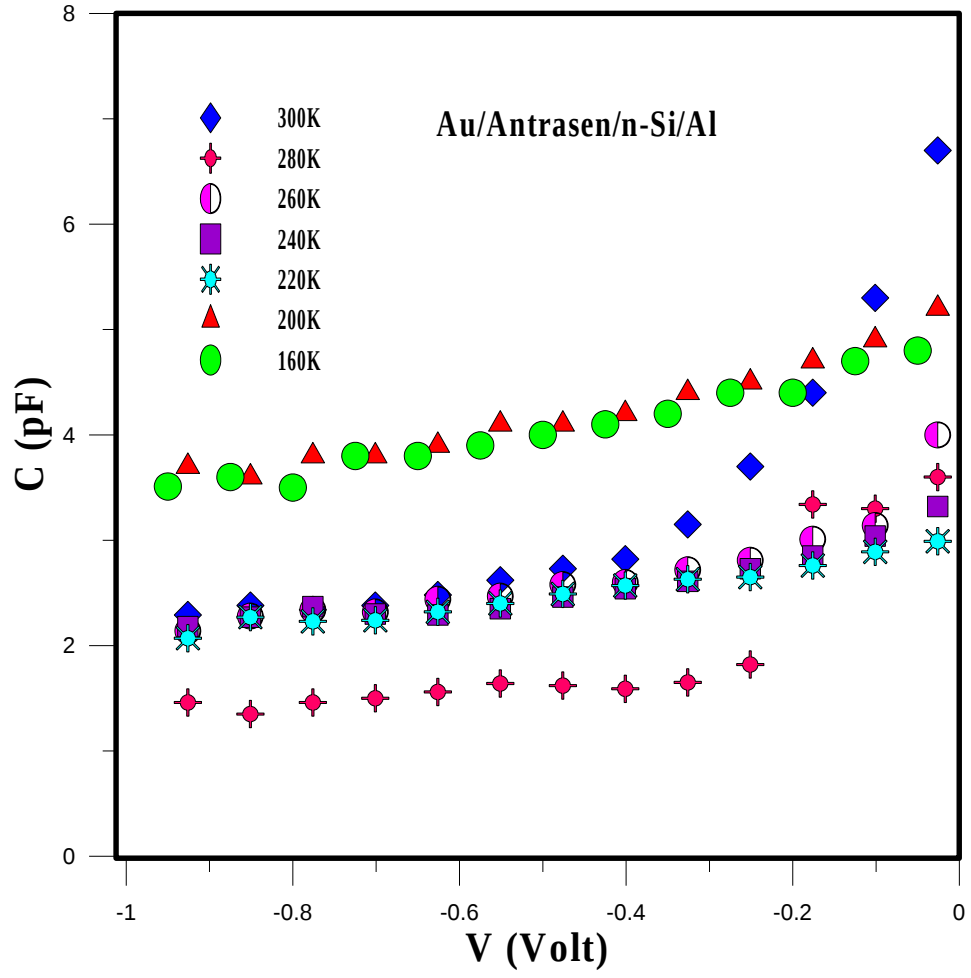
Şekil 4.17’de ise $f=500$ kHz sabit frekansta ters beslem $1/C^2-V$ grafiğinden (4.16) eşitliği yardımıyla bulunan Fermi enerji seviyesinin (E_f) sıcaklıkla değişimleri görülmektedir. Bu çalışmada sabit frekans değerinde Fermi enerji seviyesinin sıcaklıkla değişimlerinin lineer bir davranış sergiledikleri görülmektedir.



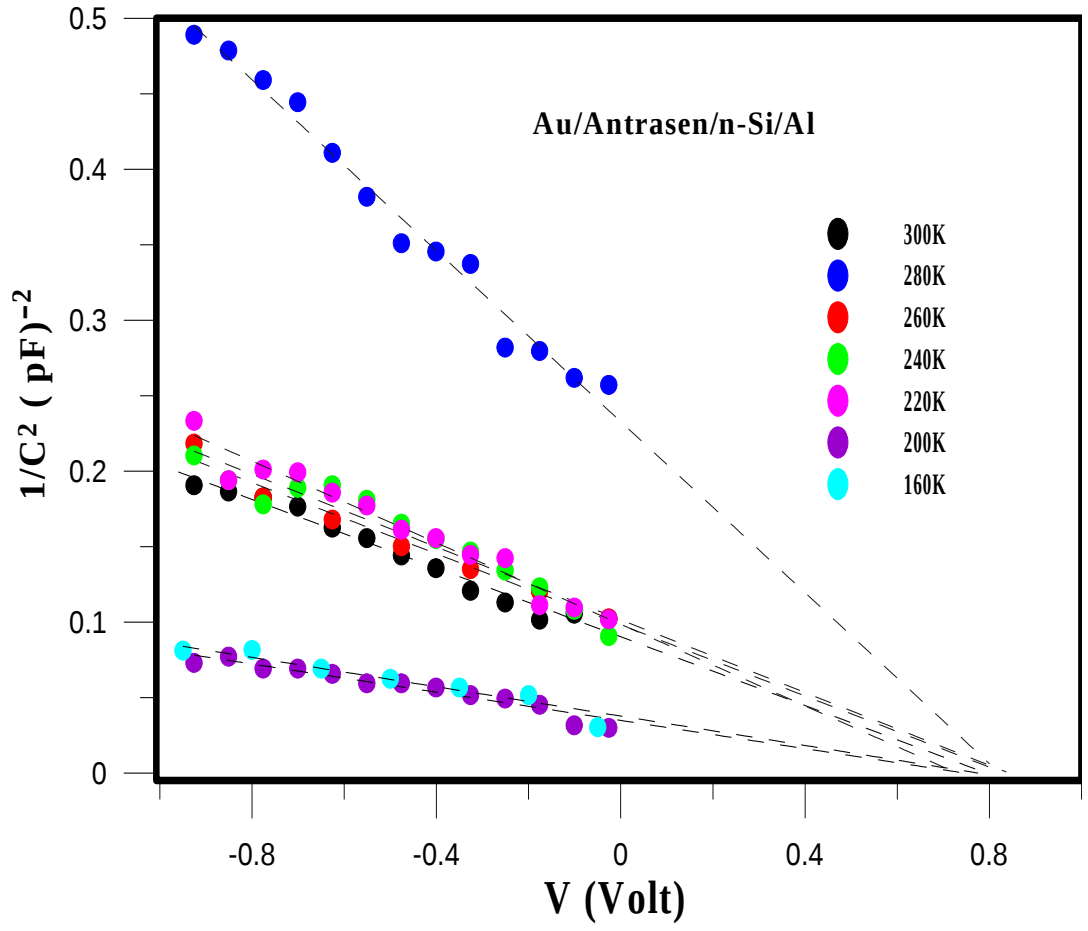
Şekil 4.13. Au/n-Si/Al ve Au/Antrasen/n-Si/Al diyotlarının laboratuvar sıcaklığında $f=500$ kHz sabit frekansta düz ve ters beslem durumunda C-V grafiği



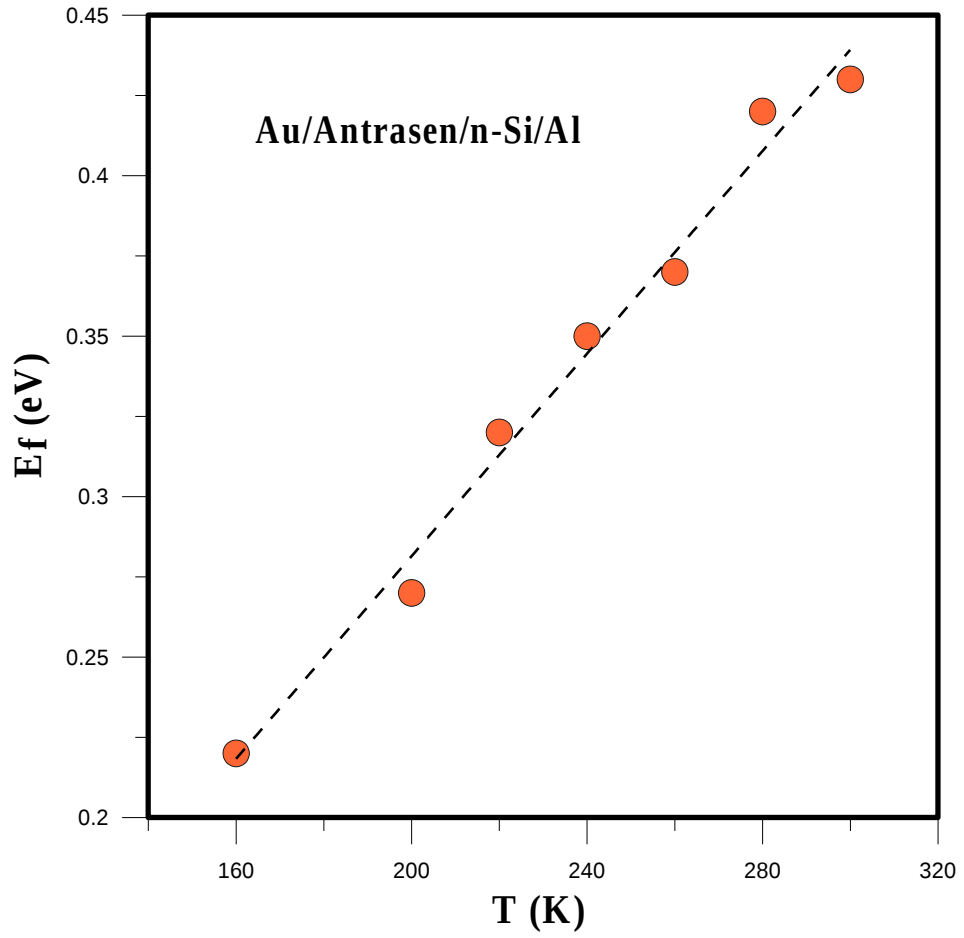
Şekil 4.14. Au/Antrasen/n-Si/Al diyoduna ait $f=500$ kHz sabit frekansta sıcaklığa bağlı düz ve ters beslem durumunda C - V grafiği



Şekil 4.15. Au/Antrasen/n-Si/Al diyoduna ait $f=500$ kHz sabit frekansta sıcaklığa bağlı ters beslem durumunda C-V grafiği



Şekil 4.16. Au/Antrasen/n-Si/Al diyoduna ait $f=500$ kHz sabit frekansta farklı sıcaklıklarda $1/C^2$ -V grafiği



Şekil 4.17. Au/Antrasen/n-Si/Al diyoduna ait $(1/C^2 - V)$ karakteristiğinden $f=500$ kHz sabit frekansta Fermi enerji seviyesinin sıcaklıkla değişimi

Çizelge 4.4. Au/Antrasen/n-Si/Al diyoduna ait $f=500$ kHz sabit frekansta sıcaklığa bağlı $(1/C^2 - V)$ değişimlerinden elde edilen temel diyot parametreleri

Sıcaklık(K)	$V_d(V)$	$E_f(eV)$	$N_d(cm^{-3}) \times 10^{12}$	$\Phi_b(eV)$	$V_d + E_f$
160	0,78	0,22	4,0	0,53	1,00
200	0,75	0,27	4,2	0,63	1,02
220	0,73	0,32	1,4	0,69	1,05
240	0,84	0,35	1,6	0,77	1,19
260	0,83	0,37	1,6	0,80	1,20
280	0,82	0,42	6,9	0,85	1,24
300	0,79	0,43	1,7	0,87	1,22

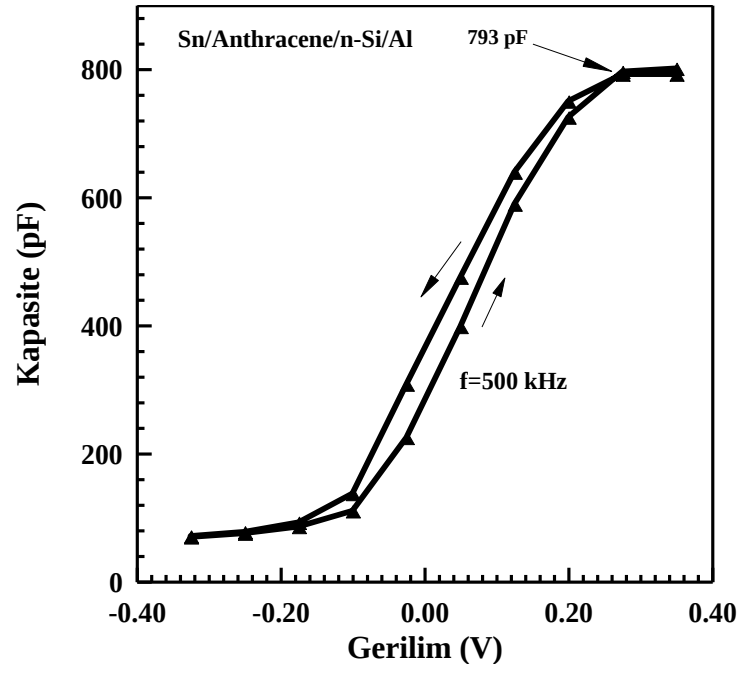
Çizelge 4.4'de görüldüğü gibi $\Phi_b(eV)$ ifadesi ideal olmayan diyot için bulunan engel yüksekliğidir. 4.20'deki denklemde " n " değeri için $I-V$ grafiğinden bulunan idealite

faktörü kullanılarak artan sıcaklık değerlerine karşılık gelen engel yükseklik değerleri bulunmuştur. $V_d + E_f$ ifadesi ise bulunurken de 4.20'deki denklemi kullanır fakat " n " değeri bütün sıcaklık değerlerinde 1 alınır. Yani $V_d + E_f$ ifadesi ideal diyot için bulunan engel yüksekliğidir. Hem ideal diyot için hemde ideal olmayan diyot için engel yüksekliği artan sıcaklık değerleri için artmıştır.

Çizelge 4.5. Au/n-Si/Al referans diyoduna ait $f=500$ kHz sabit frekansta sıcaklığa bağlı $(1/C^2 - V)$ değişimlerinden elde edilen temel diyot parametreleri

Sıcaklık(K)	$V_d(V)$	$E_f(eV)$	$N_d (cm^{-3}) \times 10^{12}$	$\Phi_b(eV)$	$V_d + E_f$
300	6,41	0,40	5	3,96	6,81

Çizelge 4.5'de görüldüğü gibi referans Au/n-Si/Al diyodunun 300K sıcaklığındaki ideal ve ideal olmayan durumlardaki engel yükseklikleri, difüzyon potansiyeli, fermi enerji seviyesi, donör konsantrasyonu değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca Sn'nin kontak metali olarak kullanıldığı Sn/Antrasen/n-Si aygıtın da MIS yapısı sergilediği görüldü. Aygıtın yük depolamasına ait, 500 kHz'deki, ± 0.4 V gerilim aralığındaki kapasite-gerilim karakteristiği Şekil 4.18'de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. Sn/Antrasen/n-Si diyoduna ait 500 kHz'deki, ± 0.4 V gerilim aralığındaki kapasite-gerilim karakteristiği

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada, 400µm kalınlığında, 1-10 Ωcm öz direncine sahip n-tipi Si yarıiletken kristali ve arayüzey malzemesi antrasen kullanılarak Au/Antrasen/n-Si/Al diyodu imal edildi. Bu diyodun akım-voltaj ve kapasite-voltaj karakteristik özellikleri ve arayüzey malzemesinin ve sıcaklığın bu karakteristik özelliklere etkisi farklı metotlar kullanılarak araştırıldı.

5.1. Sıcaklığa Bağlı I-V Ölçümleri

n-Si kristalleri bölüm 3.2’de bahsedilen kimyasal temizlemeye tabi tutuldu. n-Si yarıiletkeninin mat tarafına Al buharlaştırıldı ve 450°C’de tavlanarak omik kontak işlemi gerçekleştirildi. Daha sonra numunenin parlak kısmına kimyasal sentez ve elektrokimyasal kaplama teknikleri kullanılarak antrasen molekülü büyütüldü. Daha sonra UV-vis spektrometre yardımıyla antrasenin soğurma ölçüleri 200-800nm aralığında alındı. Elde edilen antrasen ince filminin enerji band aralığı 1,65eV olarak bulundu. Kaplanan antrasen üzerine Au metali buharlaştırılarak Au/Antrasen/n-Si/Al diyodu elde edildi.

Elde edilen bu diyodun, 300 K’den başlayarak, 20 K’lik adımlarla 140 K’ye kadar her sıcaklıkta akım-voltaj ölçümleri alındı. Diyodun I-V ölçümleri, “KEITHLEY 487 Picoammeter/Voltage Source” cihazı ile (+1)V - (-1) V aralığında 0,02 Volt adımlarla alındı. Ölçümlerden elde edilen sıcaklığa bağlı akım-voltaj karakteristikleri Şekil 4.1’de verilmiştir. 300K’de I-V karakteristiklerinden elde edilen idealite faktörü (n) 1,80 iken 140K’de idealite faktörü değeri 3,06 olarak bulundu. 4.2’deki çizelge incelendiğinde düşük sıcaklıktan yüksek sıcaklıklara doğru gidildikçe idealite faktörü değerlerinin azaldığı görülmektedir. 300K-140K sıcaklık aralığında engel yüksekliği değerleri 0,87-0,46 eV aralığında değişmektedir. Bu durumda yüksek sıcaklığa doğru gidildikçe diyodun ideale yaklaştığı sonucu çıkarılabilir. Bu değişimlerden görüleceği gibi, artan sıcaklıkla engel yüksekliği artarken, idealite faktörü azalmaktadır. Bu değişimler

homojen olmayan engelle açıklanabilir. Bu homojensizliğin nedeni, farklı atomik fazlar, yüzey kusurları veya arayüzeyin etkisine atfedilebilir (Aydoğan 2003).

Cheung fonksiyonları yardımıyla bulunan idealite faktörleri, engel yükseklikleri ve seri direnç değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Cheung fonksiyonlarından elde edilen parametreler akım-voltaj grafiğinden elde edilen parametrelerden farklıdır. Bu durum yüksek akım ve yüksek gerilim değerlerine karşılık gelen bölgelerde seri direncin etkisine atfedilebilir (Aydoğan 2003; Sağlam *et al.* 2013; Yüksel *et al.* 2013).

Au/Antrasen/n-Si/Al diyodu için Cheung fonksiyonları yardımıyla bulunan seri direnç değerlerinin artan sıcaklıkla değiştiği Şekil 4.6’da görülmektedir. $dV/d\ln(I)-I$ grafiğinden hesaplanan seri direnç değerleri 300 K’de 268k Ω , 140 K’de 760k Ω dur. $H(I)-I$ grafiğinden hesaplanan seri direnç değerleri ise 300 K’de 228k Ω , 140 K’de 1073k Ω dur. Şekil 4.6’da görüldüğü gibi yüksek sıcaklıklara doğru gidildikçe seri direnç değerlerinde azalma görülmektedir. Bu durum iyonizasyondan dolayı sıcaklık arttıkça diyottan daha fazla akım geçmesi ile açıklanabilir.

Şekil 4.9. Au/Antrasen/n-Si/Al Schottky diyodunun $\ln(I_0/T^2)$ ’nin $1/T$ ’ye karşın çizilen modifiye edilmiş Richardson grafiğidir. Modifiye edilmiş Richardson grafiğinde yapılan lineer fitin y-eksenini kesen noktası modifiye edilmiş Richardson sabitini vermektedir. Doğrunun eğiminden (4.8) eşitliği kullanılarak elde edilen Richardson sabitinin değeri $A^*=3.2 \cdot 10^{-9} A/K^2 cm^2$ olarak bulundu. Hesaplanan bu değer n-Si için verilen 112 A/K²cm² değerinden çok küçüktür. Bu durum homojen olmayan engel yüksekliğine atfedildi.

Norde fonksiyonları kullanılarak elde edilen engel yüksekliği ve seri direnç değerleri Çizelge 4.3’de görülmektedir. Bu çizelgede görüldüğü gibi engel yüksekliği artan sıcaklık değerleriyle artarken ve seri direnç değerleri artan sıcaklık ile azalmıştır. Hesaplanan seri direnç değerleri 300 K’de 256k Ω , 140 K’de 510 k Ω dur. Norde

fonksiyonları kullanılarak elde edilen engel yükseklik değerleri 0,83-0,51 eV aralığında değişmektedir.

Şekil 4.12'de sıcaklığa bağlı arayüzey hal yoğunluğunun, arayüzey hal enerjisine karşı değişimi gösterilmiştir. Çizelge 4.5'de görüldüğü gibi her sıcaklık değerinde artan arayüzey hal enerjisi ile arayüzey hal yoğunluğunun azaldığı görülmektedir.

Çizelge 5.1. Sıcaklığa bağlı arayüzey hal yoğunluğunun arayüzey hal enerjisine karşı değişimi

<i>Sıcaklık (K)</i>	$E_c-E_{ss}(\text{ilk})\text{eV}$	$E_c-E_{ss}(\text{son})\text{ eV}$	$N_{ss}(\text{ilk})\text{eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$	$N_{ss}(\text{son})\text{eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$
140	$(E_c-0,0098)$	$(E_c-0,071)$	$1,152 \times 10^{15}$	$3,251 \times 10^{14}$
160	$(E_c-0,228)$	$(E_c-0,307)$	$1,195 \times 10^{15}$	$3,245 \times 10^{14}$
180	$(E_c-0,263)$	$(E_c-0,340)$	$1,28 \times 10^{15}$	$3,722 \times 10^{14}$
200	$(E_c-0,263)$	$(E_c-0,340)$	$1,28 \times 10^{15}$	$3,722 \times 10^{14}$
220	$(E_c-0,352)$	$(E_c-0,418)$	$1,537 \times 10^{15}$	$4,99 \times 10^{14}$
240	$(E_c-0,432)$	$(E_c-0,529)$	$1,65 \times 10^{15}$	$4,336 \times 10^{14}$
260	$(E_c-0,695)$	$(E_c-0,781)$	$1,726 \times 10^{15}$	$5,60 \times 10^{14}$
280	$(E_c-0,695)$	$(E_c-0,781)$	$1,726 \times 10^{15}$	$5,60 \times 10^{14}$
300	$(E_c-1,066)$	$(E_c-1,137)$	$2,025 \times 10^{15}$	$7,526 \times 10^{14}$

5.2. Sıcaklığa Bağlı C-V Ölçümleri

Au/Antrasen/n-Si/Al diyodunun kapasite-voltaj ölçümleri “HEWLET PACKART 4192 A, (50 Hz-13 MHz) LF IMPEDENCE ANALYZER” cihazı ile +2 V-(-1)V aralığında, 500 kHz sabit frekans değerinde, 300 K ile 160 K sıcaklık aralığında kadar 20 K'lik adımlarla alındı. Şekil 4.14'de Au/Antrasen/n-Si/Al diyodunun 500 kHz sabit frekans

altında sıcaklığa bağılı kapasite-voltaj değişimini göstermektedir. Elde edilen C - V karakteristiklerinden de görüleceği gibi sabit frekansta artan sıcaklıkla kapasitenin arttığı görülmektedir. Ters beslem kapasite-voltaj grafiğinde düşük sıcaklıklara doğru gidildikçe kapasitenin azaldığı, yüksek sıcaklıklara doğru gidildikçe kapasitenin arttığı görülmektedir. Ayrıca uygulama gerilimi sıfıra doğru gittikçe ters beslemdeki kapasite değerleri artmaktadır. Şekil 4.17’de ise $f=500$ kHz sabit frekansta ters beslem $1/C^2$ - V grafiğinden (4.16) eşitliği yardımıyla bulunan Fermi enerji seviyesinin (E_f) sıcaklıkla değişimleri görülmektedir. Bu çalışmada sabit frekans değerinde Fermi enerji seviyesinin artan sıcaklık değerleriyle arttığı görülmektedir. Çizelge 4.4’ de ters beslem $1/C^2$ - V karakteristiklerinden elde edilen difüzyon potansiyeli, fermi enerji seviyesi, engel yüksekliği, donör konsantrasyonu değerleri gösterilmektedir.

Sonuç olarak kendi laboratuvarımızda imal ettiğimiz Au/n-Si/Al diyonu ve Au/Antrasen/n-Si/Al diyonu çeşitli metotlarla karşılaştırıldığında arayüzey malzemesinin Schottky diyotlarda engel yüksekliğini arttırıp, idealite faktörünü azalttığını söyleyebiliriz. Organik malzeme olarak kullandığımız antrasenin diyotlarda doğrultma sağladığını ve diyodun ideal bir diyoda yaklaşma eğiliminde olmasına katkı sağladığı görülmektedir. Ayrıca farklı sıcaklık değerlerinde alınan ölçümler; Schottky diyotların temel parametrelerinin nasıl değiştiği hakkında pek çok bilgiye sahip olmamızı da sağlar. Özellikle düşük sıcaklıklarda elde edilen değerlerin Termoyonik Emisyon modelinden saptığı görülmektedir. Au /Antrasen /n-Si /Al diyodunun bulunan bütün karakteristik özelliklerine göre MIS (metal-yalıtkan-yarıiletken) davranışı sergilediği söylenebilir(Kaçuş *et al.* 2013). Ayrıca Sn’nin kontak metali olarak kullanıldığı Sn/Antrasen/n-Si aygıtın da MIS yapısı sergilediği görüldü.

KAYNAKLAR

- Aldemir, A., 2007. Al/P₂ClAn(C₂H₅(COOH))/P-Si/Al Yapılarda Akım-Voltaj ve Kapasite-Voltaj Karakteristiklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Aydın, S.G., 2010. Al/PNpClPhPPy/ptipi-Si Kontaklarının Elektronik Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- 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 (2010), 2525–2530.
- Aydoğan, Ş., 2003. . Polimer/İnorganik Yarıiletken Kontakların Karakteristik Parametrelerinin Sıcaklığa Bağlı *I-V* (Akım-Voltaj), *C-V* (Kapasitesi-Voltaj) VE *C-f* (Kapasite-Frekans) Ölçümlerinden Tayin Edilmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Aydoğan, Ş., Sağlam, M., Turut, A., 2005. On the barrier inhomogeneties of polyaniline/p-Si/Al structure at low temperature. Appl. Surface Science, 250(1), 43-49.
- Aydoğan, Ş., İncekara, Ü., Türüt, A., 2010. Determination of contact parameters of Au/Carmine/n-Si Schottky device. Thin Solid Films, 518 (2010), 7156–7160.
- Bach, H., Krause, D., 1997. Thin Films on Glass, Springer, Heidelberg.
- Bohlin, K.E., 1986. Generalized Norde Plot Including Determination of the Ideality Factor. J. Appl. Phys., 60, 1223.
- Card, H.C., Rhoderick, E.H., 1973. The Effect of Interfacial Layer on Minority Carrier Injection in Forward Biased Silicon Schottky Diodes. Solid-State Electron, 16(3), 365- 374.
- Chand, S. and Kumar, J. 1996. Evidence for the double distribution of barrier heights in Pd₂Si/n-Si Schottky diodes from *I-V-T* measurements. Semicond. Sci. Tech. 11(1), 1203-1208.
- Chatelon, J.P., Terrier, C., Bernstein, E., Berjoan, R. and Roger, J.A. 1994. Morphology of SnO₂ thin films obtained by the sol-gel technique. Thin Solid Films, 247, 162.
- Cheung, S.K., Cheung, N.W., 1986. Extraction of Schottky diode parameters from forward current–voltage characteristics. J. Appl. Phys., Let., 49, 85-87.
- Crowel, C.R., Sze, S.M., 1965. Tungsten Semiconductor Schottky Barrier Diodes Transaction of The Metallurgical Soc. J. Appl. Phys., 36(8), 321-326.
- Czapla, A., Kusior, E., Bucko, M., 1989. Optical properties of non-stoichiometric tin oxide films obtained by reactive sputtering. Thin Solid Films, 182, 15.
- Çaldıran, Z., 2013. Au/Antrakininon/p-Si/Al Schottky Diyodunun Temel Karakteristik Parametrelerinin Sıcaklığa Bağlı *I-V* (Akım-Voltaj) ve *C-V* (Kapasite-Voltaj) Ölçümlerinden Tayin Edilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Çaldıran, Z., Deniz, A.R., Aydoğan, Ş., Yesildag A., Ekinci, D., 2013. The barrier height enhancement of the Au/n-Si/Al Schottky barrier diode by electrochemically

- formed an organic Anthracene layer on n-Si. Superlattices and Microstructures, 56 (2013), 45–54
- Deneuville, A., Gerard, P., Kerade, J. P., 1974. D.C. Electrical, Optical and Photoelectrical Properties of Gex T1-x Amorphous Thin Films. Solid State Communications, 14(4), 341–346.
- Dunker, M. F., W. Starkey, E. B., Jenkins, G. L., 1936. The Preparation of Some Organic Mercurials from Diazonium Borofluorides, J. Am. Chem. Soc., 58, 2308–2309.
- Gülnahar, M., 2008. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Erzurum.
- Güllü, Ö., 2008. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Erzurum.
- Güllü, Ö., Türüt, A., 2010. Electrical analysis of organic dye-based MIS Schottky contacts. Microelectronic Engineering, 87(2010), 2482–2487.
- Güllü, Ö., Türüt, A., 2010. Electronic properties of Al/DNA/p-Si MIS diode: Application as temperature sensor. Journal of Alloys and Compounds, 509 (2011), 571–577.
- Kaçuş, H., Deniz, A. R., Çaldıran, Z., Aydoğan, Ş., Yesildag A., Ekin, D., 2014. The analysis of the current-voltage characteristics of the high barrier Au/Anthracene/n-Si MIS devices at low temperatures. Materials Chemistry and Physics, 143 (2014), 545–551.
- Kanbur, H., Altındal, S., Tataroğlu, A., 2005. The effect of interface states, excess capacitance and series resistance in the Al/SiO₂/p-Si Schottky diodes. Applied Surface Science, 252, 1732 – 1738.
- Karadeniz, S., Tugluoglu, N., Serin, T., 2004. Substrate temperature dependence of series resistance in Al/SnO₂/p-Si (111) Schottky diodes prepared by spray deposition method. Applied Surface Science, 233, 5–13.
- Keleş, İ., 2008. Al/p-Si Schottky Diyotlarında MS ve MOS Yapılarda Diyot Parametrelerinin Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- Neamen, D. A., 1992. Semiconductors Physics and Devices, R. R. Donnelley & Sons Company, Sydney.
- Neamen, D. A., 1992. Semiconductor Physics and Devices; Basic Principles, Irwin, Inc., 144.
- Norde, H., 1979. A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. J. Appl. Phys., 50, 5052–5053.
- Onganer, Y., Sağlam, M., Turut, A., Efeoglu, H., Tuzemen, S., 1996. High barrier metallic polymer/p-type silicon Schottky diodes. Solid-State Electron, 39(5), 677–680.
- Önal, S., 2007. Mn/n-GaAs Schottky Diyodunun Hidrostatik Basıç Altında Elektriksel Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Osman Paşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.
- Rao Peta, K., Park, B., Lee, S., Kim, M., Oh, J., (2012). Temperature-dependent electrical properties of (Pt/Au)/Ga-polarity GaN/Si(111) Schottky diode. Microelectronic Engineering, 93 (2012) 100–104.
- Rhoderick, E. H. and Williams, R. H., 1988. Metal-semiconductor contacts. Clarendon Press., 4:14, Oxford.

- Sağlam, M., Güzeldir, B., Ateş, A., Buğur, E., 2013. Temperature dependence of current voltage characteristics of the Cd/CdS/n-GaAs/In sandwich structure. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 74 (2013) 370–376.
- Sato, K., Yasamura, Y., 1985. Study of Forward I-V Plot for Schottky Diodes with Series Resistance. *J. Appl. Phys.*, 58(3), 3655.
- Soylu, M., 2007. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Erzurum.
- Sze, S.M., 1981. *Physics Semiconductor Devices*, 2nd Edition. Wiley. New York. p274, 276.
- Şahin, Y., 2014. X-Işını Radyasyonunun Metal/Organik/ Yarıiletken Doğrultucu Kontakların *I-V* (Akım-Gerilim) Karakteristikleri Üzerine Etkileri Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Yüksel, Ö. F., Tuğluoğlu, N., Gülveren, B., Şafak, H., Kuş, M., 2013. Electrical properties of Au/perylene-monoimide/p-Si Schottky diode. *Journal of Alloys and Compounds*, 577 (2013), 30–36.
- Ziel, A., 1968. *Solid-state physical electronics*. Prentice-Hall, Inc., 7: 136-144, New Jersey

ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında Erzurum'un Çat ilçesinde doğdu. 2006 yılında Atatürk Üniversitesi Kazım Kara Bekir Eğitim Fakültesi Fizik bölümünü kazandı. 2011 yılında Atatürk Üniversitesi Kazım KaraBekir Eğitim Fakültesi Fizik bölümünden mezun oldu. 2011 yılında Atatürk Üniversitesi Kimya Mühendisliğini kazandı ve 2. sınıfta kayıt dondurdu. 2011 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Fizik Anabilim Dalı Astro Fizik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisansı kazandı ve bıraktı.2012 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Fizik Anabilim Dalı Katıhal Fiziği Bilim Dalı'nda Yüksek Lisansı kazandı.

Makaleler:

Kaçuş, H., Deniz, A.R., Çaldıran,Z., Aydoğan,Ş., Yesildag A., Ekinci,D.,2013. The analysis of the currente voltage characteristics of the high barrierAu/Anthracene/n-Si MIS devices at low temperatures.Materials Chemistry and Physics, 143 (2014),545-551.