

**Au/p-TlInS₂/n-InP PSEUDO SCHOTTKY
YAPILARIN TAVLAMA VE NUMUNE
SICAKLIĞINA BAĞLI ELEKTRİKSEL
KARAKTERİZASYONU**

Seda YAZICI

Doktora Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Katıhal Fiziği Bilim Dalı

Prof. Dr. Bahattin ABAY

2015

Her hakkı saklıdır

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

**Au/p-TlInS₂/n-InP PSEUDO SCHOTTKY YAPILARIN TAVLAMA
VE NUMUNE SICAKLIĞINA BAĞLI ELEKTRİKSEL
KARAKTERİZASYONU**

Seda YAZICI

FİZİK ANABİLİM DALI
Katıhal Fiziği Bilim Dalı

ERZURUM
2015

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**Au/p-TlInS₂/n-InP PSEUDO SCHOTTKY YAPILARIN TAVLAMA VE NUMUNE
SICAKLIĞINA BAĞLI ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU**

Prof. Dr. Bahattin **ABAY** danışmanlığında, Seda **YAZICI** tarafından hazırlanan bu çalışma 09/03/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı-Katıhal Fiziği Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **oy birliği/oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Y. Kemal YOĞURTÇU

İmza:

Üye: Prof. Dr. İ. Hakkı KARAHAN

İmza:

Üye: Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

İmza:

Üye: Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU

İmza:

Üye: Prof. Dr. Bahattin ABAY

İmza:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu...26..03..2014 tarih ve...12..500... nolu kararı ile onaylanmıştır.


Prof. Dr. Ertan YILDIRIM
Enstitü Müdürü

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

ÖZET

Doktora Tezi

Au/p-TlInS₂/n-InP PSEUDO SCHOTTKY YAPILARIN TAVLAMA VE NUMUNE SICAKLIĞINA BAĞLI ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU

Seda YAZICI

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

Danışman: Prof. Dr. Bahattin ABAY

Yüksek elektron hareketliliğinden ötürü İndiyum fosfit (InP) yüksek güç ve yüksek frekans elektroniğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte; metal/*n*-InP yapıların kontak metalinin iş fonksiyonundan bağımsız olarak ~0.45 eV gibi düşük engel yüksekliğine (EY) sahip oluşu, *n*-InP tabanlı elektronik cihaz uygulamalarında handikap oluşturmaktadır. Bu çalışmada, Au/*n*-InP yapısının engel yüksekliğinin modifikasyonu için *n*-InP ile zıt tipli *p*-TlInS₂ üçlü yarıiletken bileşiği kullanılarak Au/*p*-TlInS₂/*n*-InP Pseudo Schottky (PS) yapıları oluşturuldu.

Tavlama işlemi $T_{A1,5}=100, 150, 200, 250$ ve 300°C 'de kümülatif tavlama işlemine tabi tutulmuş PS yapılarının elektriksel karakterizasyonu oda sıcaklığında ve sıcaklığa bağlı olarak (80-360K) incelendi. Termiyonik emisyon teorisi kullanılarak analiz edilen akım-gerilim (*I*-*V*) karakteristiklerinden EY değerlerinin tavlama sıcaklığına bağlı olarak arttığı belirlendi. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/*p*-TlInS₂/*n*-InP PS yapısının ideal diyot sınırları içerisinde kaldığı ($n=1.063$) ve EY değerinin 0.740 eV'ta ulaştığı belirlendi. Daha yüksek tavlama sıcaklıklarında *n* idealite faktörünün hızlı artışı münasebetiyle yapının ideallikten uzaklaştığı gözlemlendi. Her bir tavlama işlemi ardından sıcaklığa bağlı *I*-*V* ve kapasite-gerilim (*C*-*V*) ölçümleri icra edildi. Düz beslem *I*-*V* karakteristikleri geleneksel TE teorisi kullanılarak analiz edildi. Elde edilen EY değerlerinin artan sıcaklıkla arttığı *n* idealite faktörü değerlerinin ise azaldığı belirlendi. Benzer şekilde, *C*-*V* karakteristiklerinden elde edilen EY değerlerinin de artan sıcaklıkla arttığı belirlendi.

Her bir tavlama adımı sonrasında Au/*p*-TlInS₂/*n*-InP PS yapısı için oluşturulan geleneksel Richardson çizimlerinin lineer olmayan davranışı MY ara yüzeyde Gaussian dağılıma sahip homojen olmayan EY'ne atfedildi. Düşük sıcaklıklarda diyot parametrelerindeki anormal davranışların izahı tekli ve/veya ikili Gaussian dağılıma sahip EY yaklaşım modelleri (SGDM/DGDM) ile gerçekleştirildi. SGDM kullanıldığı $[(1n(I_o/T^2) - q^2\sigma^2/2(kT)^2) - 1000/T]$ modifiye Richardson çizimlerinden T_{A2-5} tavlama işlemi uygulanmış yapılara ait Richardson sabiti ve aktivasyon enerji değerleri sırasıyla $A^*=9.640, 9.220, 12.33, 10.05 \text{ AK}^{-2}\text{cm}^{-2}$ ve $\phi_b=0.836, 0.882, 0.927, 0.889 \text{ eV}$ olarak elde edildi. T_{A3-5} tavlama işlemi uygulanmış yapılara ait *n* ve EY parametrelerinin sıcaklıkla değişimleri SGDM ile tam fit edilememesinden ötürü Richardson çizimleri DGDM kullanılarak yeniden değerlendirildi. EY'nin DGDM'ne göre, T_{A3-5} tavlama işlemi uygulanmış Au/*p*-TlInS₂/*n*-InP PS yapılarının ortalama EY değerleri sırasıyla $\bar{\phi}_{b01}=0.986, 1.100, 0.977 \text{ eV}$ ve $\bar{\phi}_{b01}=0.831, 0.911, 0.739 \text{ eV}$ olarak elde edildi. Bununla birlikte, modifiye Richardson çizimlerinden aktivasyon enerjisi ve Richardson sabiti değerleri, sırasıyla 0.987, 0.834 eV; 10.34, 9.54 $\text{AK}^{-2}\text{cm}^{-2}$, 1.087, 0.863 eV; 8.48, 10.50 $\text{AK}^{-2}\text{cm}^{-2}$ ve 0.987, 0.737 eV; 10.20, 9.50 $\text{AK}^{-2}\text{cm}^{-2}$ olarak elde edildi. Sonuç olarak, Au ve *n*-InP arayüzeyinde kararlı *p*-TlInS₂ inversiyon tabakası oluşturmak amacıyla ardışık tavlama işlemleri uygulandı. Böylece, Au/*p*-TlInS₂/*n*-InP PS yapısının EY'nin T_{A4} tavlama işlemi ile ideal diyot sınırları içerisinde ~0.300 eV kadar artırılabilceği gösterildi.

2015, 124 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Pseudo-Schottky diyot, *n*-InP, *p*-TlInS₂, Isıl işlem, Engel inhomojenitesi.

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

ANNEALING- AND SAMPLE TEMPERATUREDEPENDENT ELECTRICAL CHARACTERISATION OF Au/*p*-TlInS₂/*n*-InP PSEUDO SCHOTTKY STRUCTURES

Seda YAZICI

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

Supervisor: Prof. Dr. Bahattin ABAY

Indium Phosphide (InP) is used in high-power and high-frequency electronics because of its superior electron mobility. However, the low barrier height (about 0.45 eV and almost independent of the metal's work function) of metal/*n*-InP SBD constitute a handicap to use of *n*-InP in the electronic device applications. In this study, Au/*p*-TlInS₂/*n*-InP Pseudo-Schottky Junctions (PSJs) have been fabricated with the *p*-TlInS₂ counter semiconductor layer for the modification of the barrier height of Au/*n*-InP SBD.

Annealing and sample temperature dependent electrical characterization of the unannealed and cumulative annealed Au/*p*-TlInS₂/*n*-InP PSJs at $T_{A1,5}$ =100, 150, 200, 250 and 300°C temperatures have been investigated in the wide temperature range of 80-360 K. From the analyzed experimental *I*-*V* data by using conventional TE theory it has been determined that the value of BH increases with increasing annealing temperature. It has been determined that ideality factor of Au/*p*-TlInS₂/*n*-InP PSJs remained in ideal diode limit ($n=1.063$) until the annealing temperature reached $T_{A4}=250^{\circ}\text{C}$ for $t_{A4}=5$ min, while BH value increased to 0.740 eV with respect to the reference Au/*n*-InP SBD, at room temperature. It has also been observed that the diode characteristic moved away from the ideality due to the rapid increment in the n at the annealing temperatures higher than 250°C.

After each annealing treatment, *I*-*V* and capacity-voltage (*C*-*V*) measurements were carried out as a function of temperature. The forward *I*-*V* characteristics were analyzed on the basis of conventional TE theory. It has been observed that the value of ideality factor n decreases while the BH increases with increasing temperatures. Moreover, it has been evaluated that the value of BH obtained from the *C*-*V* characteristics increases with increasing temperature.

Non-linear behavior of the conventional Richardson plots created after each annealing step for the Au/*p*-TlInS₂/*n*-InP PSJs has been attributed to the assumption of Gaussian distribution of BHs due to barrier inhomogeneities that prevail at the metal-semiconductor interface. For the explanation of the abnormal behavior of the characteristic diode parameters at low temperatures, single and/or double Gaussian distribution of the BHs approximation models (SGDM/DGDM) have been carried out. Obtained values of Richardson constant and BHs from the modified Richardson plots $[(1n(I_o/T^2) - q^2\sigma^2/2(kT)^2) - 1000/T]$ by using SGDM for the T_{A2-5} annealed structures are $A^* = 9.64, 9.22, 12.33, 10.05 \text{ AK}^{-2}\text{cm}^{-2}$ and $\phi_b = 0.836, 0.882, 0.927, 0.889 \text{ eV}$, respectively. Because of the SGDM doesn't fulfil with the temperature dependence of n and BH parameters for T_{A3-5} annealed structures, modified Richardson plots have been reevaluated by DGDM. According to DGDM, average BH values of the T_{A3-5} annealed PSJs have been obtained as $\bar{\phi}_{b01} = 0.986, 1.100, 0.977 \text{ eV}$ and $\bar{\phi}_{b02} = 0.831, 0.911, 0.739 \text{ eV}$, respectively. The activation energy and Richardson constant values have also been obtained as 0.987, 0.834 eV; 10.34, 9.54 $\text{AK}^{-2}\text{cm}^{-2}$, 1.087, 0.863 eV; 8.48, 10.5 $\text{AK}^{-2}\text{cm}^{-2}$ and 0.987, 0.737 eV; 10.2, 9.50 $\text{AK}^{-2}\text{cm}^{-2}$ from the modified Richardson plots for these structures. In conclusion, successively annealing treatments have been applied for creating a stable *p*-TlInS₂ inversion layer at the MS interface. Hence, Au/*p*-TlInS₂/*n*-InP PSJs have been obtained with a significant BH enhancement compared to the Au/*n*-InP SBD, within the ideal diode limit, typically by the value of 0.300 eV for gold Schottky gate after T_{A4} annealing treatment.

2015, 124 Pages

Keywords: Pseudo-Schottky diode, *n*-InP, *p*-TlInS₂, heat treatment, barrier inhomogeneity.

TEŞEKKÜR

Doktora tezi olarak sunduğum bu çalışma, Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Öğretim Üyesi, Sayın Prof. Dr. Bahattin ABAY yönetiminde yapılmıştır. Çalışmamın her aşamasıyla yakından ilgilenen, çalışmam boyunca araştırma zevki ve bilimsel düşünce disiplini aşılayıp ufkumu açan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Bahattin ABAY'a minnet ve şükranlarımı sunmayı her zaman için bir borç bilirim.

Tez izleme komitesinde yer alan Medeniyet Üniversitesi Fizik Mühendisliği öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Abdülmecit TÜRÜT ve Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL'a bu süreç boyunca yol gösterici yardım ve desteklerinden ötürü minnettarım. Ayrıca, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU'na göstermiş olduğu ilgi ve yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışmamın gerçekleşmesi için imkân sağlayan, Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü ve Fen Bilimleri Enstitüsü yönetici ve elemanlarına, emeği geçen herkese gönülden teşekkür ederim.

Öğrenim hayatımın her aşamasında, her türlü maddi ve manevi desteğini eksik etmeyen değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Seda YAZICI

Mart, 2015

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	9
2.1. Metal-Yarıiletken Kontaklar	9
2.1.1. Giriş	9
2.1.2. Metal- <i>n</i> -tipi Yarıiletken Doğrultucu (Schottky) Kontaklar.....	11
2.1.3. Metal- <i>n</i> -tipi Yarıiletken Omik Kontaklar.....	14
2.2. Schottky Diyotlarda Termoionik Emisyon İle Akım İletimi.....	16
2.3. Metal-Yarıiletken Kontaklara Sıcaklığın Etkisi	21
2.3.1. Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak doğru beslem <i>I-V</i> karakteristikleri	21
2.3.2. İmaj kuvvet düşme etkisi.....	24
2.3.3. Homojen olmayan engel yüksekliği etkisi ve modifiye richardson çizimi	26
2.4. Cheung Fonksiyonları ile Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi	29
2.5. Metal-Yarıiletken Schottky Diyotlarda Schottky Kapasitesi	32
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	37
3.1. Numune Hazırlanması	37
3.2. Omik Kontak İmalatı.....	38
3.3. Pseduo Schottky Yapısı İçin Kullanılan Malzemenin Özellikleri.....	39
3.4. Schottky Kontak İmalatı.....	41
3.5. Deney ve Ölçüm Sistemi	43
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	44
4.1. Giriş	44
4.2. Tavlanmadan Önce ve Sonra Oda sıcaklığında Ölçülen Akım-Gerilim (<i>I-V</i>) Karakteristikleri ile Schottky Diyot Parametrelerinin Hesaplanması	44

4.3. Cheung Fonksiyonları ile Diyot Parametrelerinin Hesaplanması	49
4.4. Tavlanmadan Önce ve Sonra Oda sıcaklığında Ölçülen Ters Beslem Kapasite-Gerilim (C-V) Karakteristikleri ile Schottky Diyot Parametrelerinin Hesaplanması	56
4.5. Tavlanmadan Önce ve Sonra Sıcaklığa Bağlı Ölçülen Akım-Gerilim (I-V) Karakteristikleri ile Schottky Diyot Parametrelerinin Hesaplanması	60
4.6. İmaj Kuvvet Düşme Etkisi	71
4.7. Cheung Fonksiyonları Kullanılarak Sıcaklığa Bağlı Analiz	72
4.8. Homojen Olmayan Engel Yüksekliği Etkisi ve Modifiye Richardson Çizimi ...	84
4.9. Ters Beslem Kapasite-Gerilim (C – V) Karakteristiklerinden Sıcaklığa Bağlı Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi.....	102
5. SONUÇ	107
KAYNAKLAR	120
ÖZGEÇMİŞ	125

SİMGELER DİZİNİ

A^*	Etkin Richardson sabiti
A^{**}	Modifiye Richardson sabiti
A_d	Etkin diyot alanı
$C-V$	Kapasite-gerilim
d	Deplasyon bölgesinin genişliği
E_c	İletkenlik bandının tabanının enerjisi
E_f	Fermi enerji seviyesi
E_{fm}	Metalin Fermi enerji seviyesi
E_{fs}	Yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi
E_s	Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
E_v	Valans bandının tabanının enerjisi
$f_F(E)$	Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu
$g_c(E)$	İletkenlik bandındaki hal yoğunluğu
h	Planck sabiti
I	Diyottan geçen net akım
I_0	Doyma (saturasyon)akımı
$I-V$	Akım-gerilim
J	Akım yoğunluğu
$J_{m \rightarrow s}$	Metalden yarıiletkene doğru akan akım yoğunluğu
J_{st}	Ters-saturasyon akım yoğunluğu
$J_{s \rightarrow m}$	Yarıiletkenden metale doğru akan akım yoğunluğu
J_t	Tünelleme akım yoğunluğu
k	Boltzmann sabiti
m	Elektronun kütlesi
m_n^*	Elektronun etkin kütlesi minimum hız
n_{imf}	İmaj kuvveti dikkate alınarak elde edilen idealite faktörü
n	İdealite faktörü
N_a	Akseptör konsantrasyonu
n_{ap}	Görünür idealite faktörü

N_c	İletkenlik bandındaki elektron konsantrasyonu
N_d	Donor konsantrasyonu
N_v	Valans bandındaki hole (boşluk) konsantrasyonu
q	Elektronun yükü
R_p	Paralel Direnç
R_s	Seri Direnç
T	Mutlak sıcaklık
v	Elektronların hızı
V	Uygulama gerilimi
V_{bi}	Built-in potansiyel engeli
V	Uygulama gerilimi
v_{0x}	Elektronun x yönünde potansiyel engelini aşması için gerekli olan hız
V_a	Metal-yarıiletken kontağa uygulanan doğru beslem gerilimi
V_d	Difüzyon potansiyeli
V_l	Metalden uzakta bulunan bir elektronun sahip olduğu potansiyel enerji
v_x	x yönünde hareket eden elektronların hızı
v_y	y yönünde hareket eden elektronların hızı
v_z	z yönünde hareket eden elektronların hızı
W	Deplasyon bölgesinin genişliği
ϕ_{ap}	Görünür engel yüksekliği
ϕ_b	I - V karakteristiklerinden elde edilen Schottky engel yüksekliği
$\phi_{b(C-V)}$	C - V karakteristiklerinden elde edilen Schottky engel yüksekliği
$\phi_{b(C-V)}^d$	C - V karakteristiklerinden elde edilen düzeltilmiş Schottky engel yüksekliği
ϕ_{b0}	Sıfır-beslem görünür engel yüksekliği
ϕ_{bn}	Standart Schottky engel yüksekliği
ϕ_m	Metalin iş fonksiyonu
ϕ_n	n -tipi yarıiletken için E_c ile E_f arasındaki enerji farkı
ϕ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
$\Delta\phi$	Engel yüksekliğindeki değişim
$\Delta\phi_{bi}$	İmaj kuvvetinden dolayı engeldeki potansiyel düşmesi

$\Delta\varphi_{\text{imf}}$	İmaj kuvveti nedeniyle engel yüksekliğindeki değişim
χ_s	Yarıiletkenin elektron ilgisi
δ_i	Gauss dağılımının ağırlığını belirleyen parametre
ε_0	Boşluğun dielektrik sabiti
ε_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ρ_{2i}	Gauss dağılımı için tanımlanan engel yüksekliği voltaj katsayısı
ρ_{3i}	Gauss dağılımı için tanımlanan engel yüksekliği voltaj katsayısı
σ_{s0}	Sıfır beslem ortalama engel yüksekliğinin standart sapması

Kısaltmalar

DGDM	Double Gaussian Distribution Model (İkili Gauss Dağılım Modeli)
EY	Engel yüksekliği
GD	Gauss Dağılımı
GDF	Gauss Dağılım Fonksiyonu
MKÜ	Metal Kaplama Ünitesi
MY	Metal-yarıiletken
SGDM	Single Gaussian Distribution Model (Tekli Gauss Dağılım Modeli)
TE	Termoionik emisyon

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. n -tipi ve p -tipi yarıiletkenin enerji-bant diyagramı	9
Şekil 2.2. Bir metal ve n -tipi yarıiletkenin kontakta önceki enerji-bant diyagramı.....	11
Şekil 2.3. Kontakta sonra termal denge durumunda ki enerji-bant diyagramı	12
Şekil 2.4. Bir metal ve n -tipi yarıiletkenin kontakta önceki enerji-bant diyagramı.....	14
Şekil 2.5. Bir metal ve n -tipi yarıiletkenin kontakta sonraki enerji-bant diyagramı	15
Şekil 2.6. (a) Kontakta negatif voltaj uygulandığında enerji-bant diyagramı (b) Kontakta pozitif voltaj uygulandığında enerji-bant diyagramı.....	15
Şekil 2.7. İmaj kuvvet düşme etkisini gösteren doğru beslemdeki bir MYeklemin enerji-bant diyagramı	17
Şekil 3.1. Tavlama fırınının şeması	39
Şekil 3.2. Üçlü TiInS_2 yarıiletken bileşiğinin kristal yapısı.....	40
Şekil 3.3. Metal/ n -yarıiletken diyotun enerji bant diyagramı	42
Şekil 3.4. Pseudo-Schottky diyot yapısının enerji bant diyagramı	42
Şekil 3.5. Numunelerin I - V ve C - V karakterizasyonunda kullanılan bilgisayar kontrolünde çalışan KEITLEY 487 Picoammeter/Voltage Source, HP 4192A LF Impedance Analyzer ve Lake Shore 331 sıcaklık kontrol ünitesi ile kontrol edilen ARS HC-2 kapalı devre Helyum (He) kryostatı	43
Şekil 4.1. Tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au}/p\text{-TiInS}_2/n\text{-InP}$ PS Schottky diyotların bir kaçı için oda sıcaklığındaki tipik $I - V$ karakteristikleri	45
Şekil 4.2. T_{A1} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au}/p\text{-TiInS}_2/n\text{-InP}$ PS Schottky yapıların bir kaçı için oda sıcaklığındaki tipik $I - V$ karakteristikleri	45
Şekil 4.3. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au}/p\text{-TiInS}_2/n\text{-InP}$ PS Schottky yapıların bir kaçı için oda sıcaklığındaki tipik $I - V$ karakteristikleri	46
Şekil 4.4. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au}/p\text{-TiInS}_2/n\text{-InP}$ PS Schottky yapıların bir kaçı için oda sıcaklığındaki tipik $I - V$ karakteristikleri	47
Şekil 4.5. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au}/p\text{-TiInS}_2/n\text{-InP}$ PS Schottky yapıların bir kaçı için oda sıcaklığındaki tipik $I - V$ karakteristikleri	47
Şekil 4.6. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au}/p\text{-TiInS}_2/n\text{-InP}$ PS Schottky yapıların bir kaçı için oda sıcaklığındaki tipik $I - V$ karakteristikleri	48

Şekil 4.7. Tavlamanmamış, $T_{A1}, T_{A2}, T_{A3}, T_{A4}$ ve T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapılarından birinin (D6) oda sıcaklığındaki $I - V$ karakteristikleri	48
Şekil 4.8. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapıların oda sıcaklığındaki $dV / d(\ln I) - I$ çizimleri.....	49
Şekil 4.9. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapıların oda sıcaklığındaki $dV / d(\ln I) - I$ çizimleri.....	50
Şekil 4.10. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapıların oda sıcaklığındaki $dV / d(\ln I) - I$ çizimleri.....	50
Şekil 4.11. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapıların oda sıcaklığındaki $dV / d(\ln I) - I$ çizimleri.....	51
Şekil 4.12. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapıların oda sıcaklığındaki $H(I) - I$ çizimleri	51
Şekil 4.13. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapıların oda sıcaklığındaki $H(I) - I$ çizimleri	52
Şekil 4.14. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapıların oda sıcaklığındaki $H(I) - I$ çizimleri	52
Şekil 4.15. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapılarının oda sıcaklığındaki $H(I) - I$ çizimleri	53
Şekil 4.16. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapılarında engel yüksekliğine karşı idealite faktörü değerlerinin değişimi	55
Şekil 4.17. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapılarında engel yüksekliğine karşı idealite faktörü değerlerinin değişimi	56
Şekil 4.18. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapılarında engel yüksekliğine karşı idealite faktörü değerlerinin değişimi	56
Şekil 4.19. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapıların oda sıcaklığındaki $C^{-2} - V$ değişimleri.....	58
Şekil 4.20. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapıların oda sıcaklığındaki $C^{-2} - V$ değişimleri.....	58
Şekil 4.21. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapıların oda sıcaklığındaki $C^{-2} - V$ değişimleri.....	59

Şekil 4.22. T_{A3} , T_{A4} ve T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapılarından birinin (D6) oda sıcaklığındaki $C^{-2} - V$ değişimleri.....	59
Şekil 4.23. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısına ait 110-360 K sıcaklık aralığında 10 K adımlarla ölçülen $I - V$ değişimleri	63
Şekil 4.24. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısına ait sıcaklığa bağlı idealite faktörü ve EY'nin sıcaklıkla değişimi.....	63
Şekil 4.25. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısına ait 80-360 K sıcaklık aralığında 10 K adımlarla ölçülen $I - V$ değişimleri	64
Şekil 4.26. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısına ait sıcaklığa bağlı idealite faktörü ve EY'nin sıcaklıkla değişimi.....	64
Şekil 4.27. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısına ait 110-360 K sıcaklık aralığında 10 K adımlarla ölçülen $I - V$ değişimleri...	65
Şekil 4.28. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısına ait sıcaklığa bağlı idealite faktörü ve EY'nin sıcaklıkla değişimi.....	65
Şekil 4.29. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısına ait 80-360 K sıcaklık aralığında 10 K adımlarla ölçülen $I - V$ değişimleri.....	66
Şekil 4.30. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısına ait sıcaklığa bağlı idealite faktörü ve EY'nin sıcaklıkla değişimi.....	66
Şekil 4.31. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısına ait $\ln(I_0/T^2)-1/kT$ ve $\ln(I_0/T^2)-1/nkT$ çizimleri.....	68
Şekil 4.32. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısına ait $\ln(I_0/T^2)-1/kT$ ve $\ln(I_0/T^2)-1/nkT$ çizimleri.....	68
Şekil 4.33. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısına ait $\ln(I_0/T^2)-1/kT$ ve $\ln(I_0/T^2)-1/nkT$ çizimleri.....	69
Şekil 4.34. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısına ait $\ln(I_0/T^2)-1/kT$ ve $\ln(I_0/T^2)-1/nkT$ çizimleri.....	69
Şekil 4.35. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) diyotuna ait 110-360 K sıcaklık aralığında I. Cheung çizimleri	73
Şekil 4.36. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) diyotuna ait 80-360 K sıcaklık aralığında I. Cheung çizimleri	73

Şekil 4.37. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) diyotuna ait 110-360 K sıcaklık aralığında I. Cheung çizimleri	74
Şekil 4.38. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) diyotuna ait 80-360 K sıcaklık aralığında I. Cheung çizimleri	74
Şekil 4.39. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) diyotuna ait 110-360 K sıcaklık aralığında II. Cheung çizimleri	75
Şekil 4.40. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) diyotuna ait 80-360 K sıcaklık aralığında II. Cheung çizimleri	75
Şekil 4.41. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) diyotuna ait 110-360 K sıcaklık aralığında II. Cheung çizimleri	76
Şekil 4.42. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) diyotuna ait 80-360 K sıcaklık aralığında II. Cheung çizimleri	76
Şekil 4.43. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için idealite faktörlerinin sıcaklıkla değişimi	81
Şekil 4.44. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için idealite faktörlerinin sıcaklıkla değişimi	81
Şekil 4.45. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için idealite faktörlerinin sıcaklıkla değişimi	82
Şekil 4.46. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için idealite faktörlerinin sıcaklıkla değişimi	82
Şekil 4.47. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için EY'nin sıcaklıkla değişimi	83
Şekil 4.48. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için EY'nin sıcaklıkla değişimi	83
Şekil 4.49. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için EY'nin sıcaklıkla değişimi	84
Şekil 4.50. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için EY'nin sıcaklıkla değişimi	84
Şekil 4.51. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için SGDM göre φ_{ap} - ve n_{ap} - q/kT çizimi	87

Şekil 4.52. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için SGDM göre φ_{ap} - ve $n_{ap} - q/kT$ çizimi	87
Şekil 4.53. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için SGDM göre φ_{ap} - ve $n_{ap} - q/kT$ çizimi	88
Şekil 4.54. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için SGDM göre φ_{ap} - ve $n_{ap} - q/kT$ çizimi	88
Şekil 4.55. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için SGDM göre $[\ln(I_0/T^2) - q^2\sigma^2/2(kT)^2] - 1000/T$ çizimi	89
Şekil 4.56. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için SGDM göre $[\ln(I_0/T^2) - q^2\sigma^2/2(kT)^2] - 1000/T$ çizimi	89
Şekil 4.57. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için SGDM göre $[\ln(I_0/T^2) - q^2\sigma^2/2(kT)^2] - 1000/T$ çizimi	90
Şekil 4.58. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için SGDM göre $[\ln(I_0/T^2) - q^2\sigma^2/2(kT)^2] - 1000/T$ çizimi	90
Şekil 4.59. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için deneysel ve SGDM göre teorik olarak hesaplanmış idealite faktörü ve EY'nin sıcaklıkla değişimi	92
Şekil 4.60. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP (D6) yapısı için deneysel ve SGDM göre teorik olarak hesaplanmış idealite faktörü ve EY'nin sıcaklıkla değişimi	92
Şekil 4.61. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP (D6) yapısı için deneysel ve SGDM göre teorik olarak hesaplanmış idealite faktörü ve EY'nin sıcaklıkla değişimi	93
Şekil 4.62. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için deneysel ve SGDM göre teorik olarak hesaplanmış idealite faktörü ve EY'nin sıcaklıkla değişimi	93
Şekil 4.63. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için DGDM göre φ_{ap} - ve $n_{ap} - q/kT$ çizimi	95

Şekil 4.64. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için DGDM göre φ_{ap} - ve $n_{ap} - q/kT$ çizimi.....	95
Şekil 4.65. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için DGDM göre φ_{ap} - ve $n_{ap} - q/kT$ çizimi.....	96
Şekil 4.66. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için deneysel ve DGDM göre teorik olarak hesaplanmış idealite faktörü ve EY'nin sıcaklıkla değişimi.....	98
Şekil 4.67. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için deneysel ve DGDM göre teorik olarak hesaplanmış idealite faktörü ve EY'nin sıcaklıkla değişimi.....	98
Şekil 4.68. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP (D6) yapısı için deneysel ve DGDM göre teorik olarak hesaplanmış idealite faktörü ve EY'nin sıcaklıkla değişimi.....	99
Şekil 4.69. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için $[\ln(I_0/T^2) - q^2\sigma^2/2(kT)^2] - 1000/T$ çizimi.....	101
Şekil 4.70. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için $[\ln(I_0/T^2) - q^2\sigma^2/2(kT)^2] - 1000/T$ çizimi.....	101
Şekil 4.71. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için $[\ln(I_0/T^2) - q^2\sigma^2/2(kT)^2] - 1000/T$ çizimi.....	102
Şekil 4.72. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapısının sıcaklığa bağlı C^2-V çizimleri.....	103
Şekil 4.73. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapısının sıcaklığa bağlı C^2-V çizimleri.....	103
Şekil 4.74. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapısının sıcaklığa bağlı C^2-V çizimleri.....	104
Şekil 4.75. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapısının sıcaklığa bağlı C^2-V çizimleri.....	104
Şekil 5.1. Tavlınmamış, $T_{A1}, T_{A2}, T_{A3}, T_A$ ve T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS diyotlarından birinin (D6) oda sıcaklığındaki $I - V$ karakteristikleri.....	109

Şekil 5.2. T_{A1-5} tavlama işlemi uygulanmış $Au/p-TlInS_2/n-InP$ PS diyotlarından birinin oda sıcaklığındaki EY ve n idealite faktörünün tavlama sıcaklığına bağlı değişimi	110
Şekil 5.3. Referans $Au/n-InP$ ve T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış $Au/p-TlInS_2/n-InP$ PS diyotlarından birinin (D6) oda sıcaklığındaki $I - V$ karakteristikleri	110

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapıları için, idealite faktörü, engel yüksekliği, homojen engel yüksekliği, seri direnç, ortalama engel yüksekliği ve engel yüksekliğinin standart sapmaları	53
Çizelge 4.4. Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapıları için $\ln(I_0/T^2)-1/kT$ ve $\ln(I_0/T^2)-1/nkT$ çizimlerinden elde edilen aktivasyon enerjisi (ϕ_b) ve Richardson sabiti (A^*) değerleri	70
Çizelge 4.5. T _{A2} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için sıcaklığa bağlı olarak Cheung fonksiyonlarından elde edilen diyet parametreleri	77
Çizelge 4.6. T _{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için sıcaklığa bağlı olarak Cheung fonksiyonlarından elde edilen diyet parametreleri	78
Çizelge 4.7. T _{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için sıcaklığa bağlı olarak Cheung fonksiyonlarından elde edilen diyet parametreleri	79
Çizelge 4.8. T _{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS (D6) yapısı için sıcaklığa bağlı olarak Cheung fonksiyonlarından elde edilen diyet parametreleri	80
Çizelge 4.9. T _{A2} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapısının sıcaklığa bağlı C-V karakteristiklerinden elde edilen diyet parametreleri	105
Çizelge 4.10. T _{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapısının sıcaklığa bağlı C-V karakteristiklerinden elde edilen diyet parametreleri	105
Çizelge 4.11. T _{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapısının sıcaklığa bağlı C-V karakteristiklerinden elde edilen diyet parametreleri	106

Çizelge 4.12. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapısının sıcaklığa bağlı C-V karakteristiklerinden elde edilen diyot parametreleri.....	106
Çizelge 5.1. Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapıları için $(\phi_{ap} - q/2kT)$ çizimlerinden elde edilen ortalama EY ve onların standart sapma değerleri	115
Çizelge 5.2. Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapıları için $(n_{ap} - q/2kT)$ çizimlerinden elde edilen voltaj katsayı değerleri	115
Çizelge 5.3. Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapıları için $([\ln(I_0/T^2) - q^2\sigma^2/2(kT)^2] - 1000/T)$ çizimlerinden elde edilen aktivasyon enerjisi (ϕ_b) ve Richardson sabiti (A^{**}) değerleri.....	116
Çizelge 5.4. Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapıları için $(n_{ap} - q/2kT)$ çizimlerinden elde edilen voltaj katsayısı ve $(\phi_{ap} - q/2kT)$ çizimlerinden elde edilen ortalama EY ve onların standart sapma değerleri	118
Çizelge 5.5. Au/p-TlInS ₂ /n-InP PS yapıları için $([\ln(I_0/T^2) - q^2\sigma^2/2(kT)^2] - 1000/T)$ çizimlerinden elde edilen aktivasyon enerjisi (ϕ_b) ve Richardson sabiti (A^{**}) değerleri.....	119

1. GİRİŞ

Metal-yarıiletken (MY) kontaklar, yarıiletkenlerin farklı yasak enerji aralığına sahip olmalarından dolayı devre elemanı imalinde önemli bir yere sahiptirler. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte MY kontakların uygulama alanı artmıştır. Bu yapıların uygulama alanları: güneş pilleri, MESFET (metal-yarıiletken alan etkili transistör), MOSFET (metal-oksit-yarıiletken alan etkili transistör), yarıiletken detektörler, radyo dedektörleri, radar detektörleri ve mikro devre elemanları vb. şeklinde sıralanabilir.

Metal-yarıiletken kontaklar ayrıca DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy), PICTS (Photo-Induced Current Transient Spectroscopy) ve TSC (Thermally Stimulated Current) gibi yarıiletken karakterizasyon tekniklerinde ve OP-AMP (Operational Amplifier) gibi aktif devre elemanlarında da kullanılmaktadır. Schottky diyotlar, bir yarıiletken ile bir metalin kontak haline getirilmesiyle elde edilmektedir. 20. yüzyılın ilk yıllarında basitçe ince bir metal telin yarıiletken yüzeyine dokundurulması suretiyle oluşturulan Schottky diyotlarının güvenilirliği oldukça sınırlı idi. Bununla birlikte, daha sonraki yıllarda, vakum teknolojisinin gelişimi ile Schottky kontakların üretiminin tekrarlanabilirliği ve mekanik olarak dayanım özellikleri oldukça geliştirilmiştir. Bu yüzden de MY kontaklara olan ilgi her geçen gün artmaya devam etmektedir (Neamen 1992).

Bir metal ile yarıiletken malzeme kontak haline getirildiği zaman kontakların ara yüzeyinde bir potansiyel engeli oluşmaktadır. Buna ilişkin ilk modeller 1930'lu yıllarda önerilmeye başlanmıştır. 1938 yılında Schottky ve ondan bağımsız olarak aynı yılda Mott (1938) tarafından önerilen modellere göre elektronlar, potansiyel engeli üzerinden sürüklenme ve difüzyon yolu ile geçmektedirler. Mott (1938), bu potansiyel engelin kontak haline getirilen metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farklılıktan ileri geldiğini söylemiştir. Ayrıca, ara yüzey bölgesinin kirlilik atomlarından arındığını, dolayısıyla elektrik alanın sabit, elektrostatik potansiyelin de metale kadar uzanan bölgede lineer olarak değiştiğini kabul etmiştir. Bunun aksine; Schottky (1938), elektrostatik potansiyelin Poisson denklemine göre quadratik biçimde, E elektrik

alanının da potansiyelle lineer şekilde değişimi için ara yüzey bölgesinde sabit yoğunlukta kirlilik atomlarının bulunması gerektiğini kabul etmiştir (Rhoderick and Williams 1988). Bir kontağın engel yüksekliğinin (EY) inhomojenliği; engel dağılımının sürekliliği, süreksizliği veya şeklinden bağımsız olarak artan sıcaklıkla artma eğilimindedir. Bu durum, artan sıcaklıkla taşıyıcıların enerjilerinin artmasına atfedilmiştir (Oswald 1992). Artan sıcaklıkla değer artışı gösteren EY Gauss dağılımı ile tahmin edilir (Werner and Gütter 1991). Bu araştırmacılara göre MY kontak bölgesindeki ara yüzey halleri, “built-in” voltajı ve Schottky EY’de dalgalanmalara sebep olur. Ayrıca, yarıiletkenin ara yüzeyine yakın bölgelerdeki katkı atomlarının düzensiz olarak dizilimi ile meydana gelen dislokasyonların (çizgisel kusurların) ara yüzey potansiyelindeki dalgalanmaların diğer bir sebebi olduğu düşünülmektedir.

Genellikle altlık yarıiletken malzeme olarak Si, GaAs ve InP kullanılarak Au, Cu, Al ve Ni gibi metallerle oluşturulan Schottky diyotların üretimi ve karakteristik parametrelerinin belirlenmesi günümüz elektronik çağında önemli bir yere sahip olmasından dolayı birçok araştırmacı tarafından çalışılmasına neden olmuştur. Bununla birlikte, 2000 yılında “yüksek hız ve opto-elektronikte kullanılan yarıiletken hetero yapıların gelişimi” künyeli çalışma ile Zhores I. Aferov ve Herbert Kromer; 2009 yılında ise “Bir yarıiletken görüntüleme devresi (CCD sensörü)” başlıklı icatlarından dolayı Willard S. Boyle ve George E. Smith, Nobel Fizik ödülüne layık görülmüşlerdir. Böylece, yarıiletken teknolojisinde önemli yere sahip olan MY yapıların ehemmiyeti bir kez daha ortaya konulmuş oldu.

Günümüzde Silisyumun (Si) elektronik devre elemanı yapımında temel yarıiletken olarak yaygın bir şekilde kullanılmasına rağmen, “opto-elektronik, yüksek hız ve yüksek frekans” gibi önemli uygulamalarda yetersiz kalmıştır. Bu durum, araştırmacıları yeni yarıiletken malzeme arayışına sokmuştur. Böylece, son yıllarda, silisyumun yanı sıra III-V yarıiletken bileşikleri de elektronik devre elemanı imalinde kullanılmaya başlanmıştır. Bu bileşiklere örnek olarak, İndiyum Fosfit (InP), Galyum Arsenid (GaAs), Galyum Fosfit (GaP) vb. verilebilir.

Yüksek elektron mobilitesi ve direkt bant aralığına sahip olmasından ötürü elektronik aygıtlarda çok önemli bir yeri olan InP yarıiletken bileşiği, opto-elektronik ve yüksek hızlı devre elemanları için umut verici bir malzeme olmuştur. InP tabanlı malzemeler, optik (güneş pilleri, detektörler, vb.) ve mikrodalga (alan etkili transistorlar vb.) cihazlarda oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ancak, bu malzemenin kullanımını sınırlandıran iki önemli problem vardır. Bunlar, büyük sızıntı akımı ve düşük EY'dir. Bu problemler iki teknikle çözülebilir:

Bu tekniklerden ilki, pasivasyon tekniğidir. Yarıiletken yüzeyin pasive edilmesi ile bu tür sorunların ortadan kaldırılabilceği öngörülmüştür (Geib *et al.* 1984). Dolayısıyla yüzey pasivasyon ameliyesinin pek çok yolu denenmiştir (Yamagishi 1986; Oigawa *et al.* 1991; Maeda *et al.* 1993; Mitchell *et al.* 1996; Ahaitouf *et al.* 1998; Temirci *et al.* 2001). İlk zamanlarda, *n*-InP için özellikle sülfür pasivasyonu umut verici olarak görülmüştür. Iyer ve Lille (Iyer *et al.* 1988; Iyer and Lille 1991), sülfürlü solüsyonlar ile yüzey pasivasyonu gerçekleştiren ilk araştırmacılar olarak bilinmektedirler. Bu araştırmacılar InP'ın Schottky kontak yapılacak yüzeyini (NH₄)₂S solüsyonu ile pasive ederek diyot karakteristiklerinde azımsanmayacak iyileşmeler gözlemlemişlerdir. Bu proses, genellikle MY arasına ince bir ara yüzey tabakasının büyütülmesiyle icra edilir. Bu işlem, hidrojen sensorü imalatı için yaygın olarak kullanılan tekniklerden biridir (Lechuga *et al.* 1991; Lechuga *et al.* 1991; Lechuga *et al.* 1992). Quan ve Hbib (1993), PO_xN_yH_z ara yüzey tabakası ile 0.8 eV EY'ne sahip Au/*n*-InP diyot yapısına ulaşmışlardır. Ming-JerJeng *et al.* (1999), Ni/*n*-InP yapısında Praseodymium (Pr) arayüzey tabakası oluşturarak EY değişimini ve ters beslem akım yoğunluğunu incelediler. Araştırmacılar 100 Å kalınlıklı Pr ara yüzey tabakasına sahip Ni/*n*-InP Schottky diyotlarının 300°C'de 8 saat tavlandıktan sonra EY'de artma (1.05 eV) ters beslem sızıntı akımında ise azalma ($1,86 \times 10^{-10}$ A/cm²) gözlemlediler. Böylece, Pr ara yüzey tabakası ile MIS (Metal-Insulator-Semiconductor) yapılara benzer şekilde ters sızıntı akımının azaltılabileceği ve EY'nin artırılabilceği ön görülmüştür. Williams *et al.* (1977) yılında kimyasal olarak dağlanmış *n*-tipi InP altlık üzerinde oluşturulan Au/*n*-InP diyotların EY değerlerinin 0.43-0.50 eV aralığında değerlere sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, bu çalışmalarda Au/*n*-InP yapısının EY'nin Au/*p*-InP yapısınıninkine göre daha küçük olduğu görülmüştür. 1991 yılında Shi and Anderson

tarafından gerçekleştirilen diğer bir çalışmada yüzey pasivasyon tekniklerinden yararlanılarak *n*-tipi InP altlık üzerinde MIS yapıları üretilmiştir. Bu diyotlarda Schottky kontak için Au, Ni, Al ve Pd metallerini kullanmışlardır. Bu metallerden, reaktif olan Ni ve Al metallerinin, oksit tabakasında redüksiyona (indirgenme) sebep olması ve InP alttaşı ile reaksiyona girmesinden ötürü EY'nin beklenenden daha düşük; buna karşılık non-reaktif olan Au ve Pd metallerinin ise beklenenden daha yüksek EY oluşturduğu rapor edilmiştir. Diğer taraftan, 1979 yılında Anderson and Christou tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada MY arasına eklemiş oldukları P₂O₅ ara yüzey tabakasının EY'ni artırdığı gösterilmiştir.

Shi *et al.* (1991) tarafından yapılan çalışmada, *n*-InP üzerine yüksek EY'li ($\phi_b = 0,96$ eV) Schottky kontaklar, 77 K sıcaklıkta tutulan altlık üzerine vakumda metal buharlaştırılarak gerçekleştirilmiştir. 77 K altlık sıcaklığında imal edilen diyotlar için sızıntı akım yoğunluğunun, oda sıcaklığında oluşturulan diyotlara göre 6-7 mertebe daha düşük değerlere sahip olduğu görülmüştür. Oda sıcaklığında imal edilen Pd/*n*-InP ve Au/*n*-InP Schottky diyotlarının EY değerleri sırasıyla 0.48 ve 0.51 eV iken, 77 K'de imal edilen diyotların EY değerlerinin sırasıyla, 0.96 ve 0.85 eV'a yükseldiği rapor edilmiştir.

Soylu (2007), tarafından yapılan bir diğer çalışmada, Au/*n*-InP Schottky diyotun EY'nin modifikasyonu için organik Pyronine-B ara yüzey tabakalı Au/Pyronine-B/*n*-InP yapısı oluşturulmuştur. Üretilen Au/*n*-InP ve Au/Pyronine-B/*n*-InP Schottky kontaklarının, sıcaklığa bağlı olarak *I-V* ve *C-V* ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığındaki Au/Pyronine-B/*n*-InP yapısının EY'nin referans Au/*n*-InP yapısınıninkine göre yaklaşık 0.18 eV arttığı ve diyotların 1.103 idealite faktörü ile ideal sınır içerisinde kaldığı rapor edilmiştir. Ayrıca, Au/*n*-InP ve Au/Pyronine-B/*n*-InP yapılarının oda sıcaklığındaki *C-V* ölçümlerinden elde edilen $\phi_{b(C-V)}$ EY değerleri sırası ile 0.456 ve 0.643 eV olarak tespit edilmiştir. $\phi_{b(C-V)}$ EY'nin sıcaklık katsayısının InP'in yasak enerji aralığının sıcaklık katsayısına yaklaşık eşit olması EY'nin *n*-InP'in yasak enerji aralığının sıcaklıkla değişimine paralel bir değişim sergilediği şeklinde yorumlanmıştır. Sanayileşmiş ülkelerde atmosfer kirleticilerin binalar, bitki örtüsü ve insan sağlığı

üzerine zararlı etkileri hayati önem arz ettiği için, hava kalitesini izlemek öncelik haline gelmiştir. Hava kalitesinin kontrolü için hali hazırdaki izleme teknikleri büyük ve pahalı cihazlar gerektirdiğinden kirlilik dağılımının haritalanmasını elde etmek oldukça zordur. Yerel izleme sayısını genişletmek için düşük maliyetli, güvenilir ve duyarlı yarıiletken gaz sensor sistemlerinin geliştirilmesi kaçınılmazdır (Varenne *et al.* 2008). Bu nedenle, son birkaç yıldan beri laboratuvarlarda katalitik Au ve Pd metalleri ile gaz sensorü dizaynı için tek kristal *p*-tipi InP altlık üzerine Schottky yapılar geliştirilerek polikristal ve moleküler tabanlı gaz sensorlerindeki mevcutsorunların çoğu önlenmiş oldu (Varenne *et al.* 2009). Gaz sensorlerin performansı, MY eklemlerinin EY'ne sıkıca bağlı olduğu rapor edilmiştir (Talazac *et al.* 2004).

MY yapılarda istenmeden oluşan veya kasıtlı olarak oluşturulan ara yüzey özellikleri zamanla değişir ve kararlı kalmaz. Bu kararsızlığı gidermek için yapılan işlemlerin başında ısı tavlama gelir. Tavlama işlemi, sistemin termal dengeye ulaşmasına yardımcı olarak aygıtın daha kararlı olmasını sağlar.

Benamara *et al.* (2002) tarafından yapılan bir çalışmada Au/InP (100) ve Au/InSb/InP (100) Schottky diyotların elektriksel parametreleri üzerine tavlama ve yüzey etkileri araştırılmıştır. Araştırmacılar, Au/InSb/*n*-InP yapısında InSb ile oluşturulan ara yüzey tabakanın In atomlarının InP gövdeden yüzeye göçünü bloke ettiğini iddia etmişlerdir. İmal edilen diyotların *I-V* karakteristikleri, yüzeyde InSb filmi oluşturulmadan önce ve sonra incelenmiştir. Ayrıca, tavllanmış Au/*n*-InP ve Au/InSb/*n*-InP yapıları için ölçüler tekrarlanmıştır. Ara yüzeye sahip olmayan diyot karakteristiklerinde tavlandıktan sonra bozulma, ara yüzeye sahip diyot karakteristiklerinde ise iyileşme ve EY'de belirli bir artış görülmüştür.

Asubay *et al.* (2008), termal tavlamanın Au/*p*-InP/Zn-Au Schottky engel diyotların EY'nin homojenitesine etkisini araştırmışlardır. Hazırlamış oldukları Au/*p*-InP Schottky diyotları belirli adımlarla 400°C'ye kadar tavlayarak ısı işlemin diyot karakteristiklerindeki etkisini incelemişlerdir. *I-V* karakteristiklerinden as-deposited (referans) Au/*p*-InP/Zn-Au Schottky diyotlar için EY'nin 0.58-0.72 eV, *n* idealite faktörlerinin ise 1.14-1.47 aralığında değerlere sahip olduğu rapor edilmiştir.

Araştırmacılar, termal tavlama sonucunda EY değerlerinin arttığını tespit etmişlerdir. Tavlanmamış ve tavllanmış Au/p-InP yapıları için elde edilen EY ve n idealite faktörü değerleri arasındaki lineer ilişkiden homojen engel yüksekliği değerleri sırasıyla 0.72 ve 0.85 eV olarak belirlenmiştir. 400°C'deki ısıtılma nedeniyle meydana gelen EY'deki 0.13 eV'luk artış, yarıiletken yüzeyindeki elektriksel olarak aktif çoğunluk taşıyıcıların oluşumuna atfedilmiştir.

Gümüş (2006), Moleküler Beam Epitaksi (MBE) tekniği ile büyütülmüş n -tipi GaAs yarıiletkeni üzerinde imal ettikleri CrNiCo/MBE n -GaAs/AuGe Schottky diyot yapılarını N₂ atmosferi altında 200°C'den 650°C'ye kadar 50°C'lik adımlar ile tavlایarak tavlama işleminin diyot karakteristikleri üzerine etkisini incelemiştir. Doğru beslem I - V karakteristiklerinden referans CrNiCo/MBE n -GaAs Schottky diyotu için, EY ve n idealite faktörü değerleri sırasıyla 0,83 eV ve 1,38 olarak elde edilmiştir. İdealite faktörünün 400°C'ye kadarki tavlama işlemleri ile düzgün bir şekilde azalarak $n=1,18$ değerine yaklaştığı, 400°C'den sonra ise tekrar arttığı rapor edilmiştir.

Yıldırım (2009), yaptığı çalışmasında 200°C ve 400°C'de iki dakika, 600°C ve 700°C de birer dakika süreli ısıtılma maruz bırakılan Ni/ n -GaAs/In Schottky diyotların I - V karakteristiklerini oda sıcaklığında ve 60-320 K aralığında numune sıcaklığına bağlı olarak araştırmıştır. Her bir tavlama işlemi ardından oda sıcaklığında ve 60-320 K aralığında sıcaklığa bağlı I - V karakterizasyonu tekrarlanmıştır. 400°C'de tavlanan diyot için, idealite faktörlerinin 60-320 K aralığında ideal durum olan 1.00'e yakın olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, 300 K'de tavlanmamış (referans) diyot için 0,84 eV'luk EY değeri 400°C'de 2 dakika süreli tavlamanın ardından 0.88 eV değerine ulaşmıştır.

Soylu *et al.* 2010 yılında yaptıkları çalışmalarında imal ettikleri Au/Pyronine-B/MD n -InP yapılarını 100 ve 250°C'de tavlایarak ısıtılma işleminin diyot parametrelerine etkisini incelediler. I - V karakteristiklerinden Au/Pyronine-B/MD n -InP yapısının EY ve n idealite faktörü değerleri 100 ve 250°C tavlama sıcaklıkları için sırasıyla 0.600 eV;1.041 ve 0.571 eV;1.253 olduğu rapor edilmiştir. Tavlama sıcaklığının artmasıyla EY'nin 29.0 meV kadar azaldığı, sızıntı ters beslem akımının ise arttığı belirtilmiştir.

Kapasite-Voltaj ($C-V$) ölçümlerinden 100°C ve 250°C 'de tavllanmış yapının EY değerleri sırasıyla 1.001 eV ve 0.709 eV olarak elde edilmiştir. Böylece tavlama sıcaklığının artması ile birlikte diyot parametrelerinin modifikasyonunun mümkün olduğu öne sürülmüştür.

MY yapılarda EY modifikasyonu için kullanılan tekniklerinden biri de *Pseudo-Schottky* (PS) yapı fabrikasyonudur. Konvansiyonel Schottky kontak ile $p-n$ eklemi arasında bir yapı olarak kabul gören bu hybrid (melez) yapıya PS diyot denir. PS diyot, yarıiletken ve metal ara yüzeyine, altlık olarak kullanılacak yarıiletkenden farklı katkıda (tip)te yarıiletken filmbiriktirilmesi sonucu elde edilir. Metal/ n -tipi InP yarıiletken kontaklarının düşük EY ve büyük ters beslem sızıntı akımına sahip olmaları, bu yapıların devre elemanı olarak kullanıldıklarında istenmeyen sorunlara neden olmaktadır. Bu sorunlar, çoğu zaman araştırmacıları farklı alanlara yönlendirmiştir.

Abay (2009) tarafından yapılan bir çalışmada, Au/ n -InP yapısının modifikasyonu için ara yüzey tabakası olarak biyo-polimer Chitosan (CH) bileşiği kullanılmıştır. Spin coating (Dönel Kaplama) tekniği kullanılarak cam altlık ve n -InP üzerine büyütülen CH filmleri değişik karakterizasyon yöntemleri ile analiz edildikten sonra Au/Chitosan/ n -InP PS yapıları imal edilmiştir. Oda sıcaklığında $I-V$ karakteristiklerinden referans Au/ n -InP ve Au/Chitosan/ n -InP PS diyotlar için EY ven idealite faktörü değerleri sırasıyla 0.467 eV;1.002, 0.684 eV;1.575 olarak elde edilmiştir. Böylece ara yüzey tabakası olarak kullanılan biyopolimer CH bileşiği ile n -InP için sorun teşkil eden EY değerinin azımsanmayacak miktarda artışı sağlanmıştır.

Varenn *et al.* 2009 yılında yaptıkları çalışmalarında, p -InP PS diyot uygulaması ile EY'nin modifikasyonu üzerinde durmuşlardır. Bir metal/ n -InP Schottky diyotta yarıiletkenin yüzeyinde var olan ara yüzey durumları Fermi seviyesinin sabitlenmesinden (mıhlanmasından) sorumludurlar. Bu olay, EY'ni de sınırlandırır. Gaz sensorü uygulamalarında hassasiyetlik EY'ne göre değişir. Bu yüzden, Fermi seviyesinin mıhlanma etkisini azaltmak amacıyla p -InP üzerine PS yapıları geliştirilmiştir (Varenn *et al.* 2009). p -InP alttaş üzerine imal edilen PS yapıların EY değerlerinde Au kapılı diyotlarda 0.12-0.14 eV; Pd kapılı diyotlarda ise 0.06 eV'luk

artış olduğu rapor edilmiştir. Diğer taraftan, aynı araştırmacılar PS diyotların davranışını tavlama sürecinin bir fonksiyonu olarak analiz etmişlerdir. Bu yapılarda en iyi performansa düşük ısı işlem süresi ve yüksek tavlama sıcaklığında birikmiş (kümülatif) tavlama basamakları uygulanarak ulaşıldığı rapor edilmiştir.

Çaldıranet *al.*, 2013 yılında yaptıkları çalışmalarında, Au/Anthracene/*n*-Si/Al yapılarının iyi bir doğrultucu özelliğe sahip olduğu rapor edilmiştir. EY, idealite faktörü, ara yüzey durum yoğunluğu ve seri direnç gibi karakteristik parametreleri *I-V* ölçümleri ile belirlenmiştir. Bu araştırmacılar (Çaldıranet *al.* 2013) Anthracene organik tabakasının Au ve *n*-Si arasında fiziksel engel oluşturarak Au/*n*-Si/Al diyotunun etkin EY'ni artırdığını ileri sürmüşlerdir. Ayrıca, düşük voltaj bölgesinde *I-V* karakteristiklerinin omik davranış sergilediği; ancak daha yüksek voltaj bölgelerinde uzay yükü ile sınırlı akım (SCLC) mekanizmasının baskın olduğu rapor edilmiştir.

Çaldıranet *al.* tarafından yapılandırılan diğer bir çalışmada Au/Anthraquinone/*p*-Si/Al sisteminde 80-280 K aralığında *I-V* ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Çaldıranet *al.* 2014). Yazarlar, Anthraquinone tabakasının *p*-Si gövdenin uzay yükü bölgesini etkileyerek Au/*p*-Si/Al yapısının etkin EY'ni (280 K de) 0.770 eV'tan 0.850 eV'ta artırdığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, azalan sıcaklıkla Au/Anthraquinone/*p*-Si/Al sisteminin idealite faktöründe bir artış ve EY'de bir azalış gösterdiği rapor edilmiştir.

Doktora tezi olarak sunulan bu çalışmada *n*-tipi InP'ın devre elamanı olarak kullanımını sınırlandıran problemlerin iyileştirilmesi amacıyla *n*-InP alttaş üzerinde PS yapılarının oluşturulması ve bu yapıların ortam sıcaklığına ve tavlama sıcaklığına bağlı elektriksel karakterizasyonu amaçlanmıştır. Au/*p*-TlInS₂/*n*-InPPS diyot yapısı, *n*-InP altlık üzerine ters katkılı (*p*-tipi) TlInS₂ üçlü yarıiletken filminin *n*-InP alttaş ile metal arasına termal buharlaştırma yöntemiyle biriktirilmesi ile oluşturuldu. Oda sıcaklığında ve düşük sıcaklıklarda sıcaklığa bağlı *I-V* ve *C-V* karakteristikleri tavlamanın tabanına (referans), 100, 150, 200, 250 ve 300°C'de kümülatif tavlama işlemine tabi tutulmuş Au/*p*-TlInS₂/*n*-InP PS yapıları için ayrı ayrı incelenerek akım iletim mekanizması detaylı olarak analiz edilmiştir.

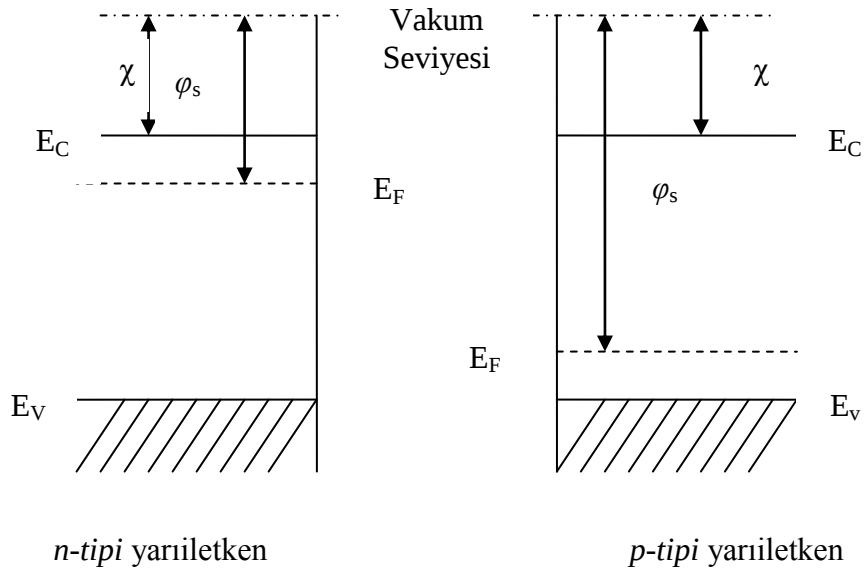
2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Metal-Yarıiletken Kontaklar

2.1.1. Giriş

Yarıiletkenleri n ve p tipi olmak üzere iki şekilde elde etmek mümkündür. Bu nedenle Metal-Yarıiletken (MY) kontaklar, iki kısımda incelenir.

1. Metal- n -tipi yarıiletken
2. Metal- p -tipi yarıiletken kontak.



Şekil 2.1. n -tipi ve p -tipi yarıiletkenin enerji-bant diyagramı

Fermi Enerjisi (E_F), bir metaldeki serbest elektronların $T=0$ K'deki taban enerjisi düzeyinden itibaren tamamen doldurabildikleri enerji seviyesi olarak tanımlanır. $T=0$ K'de bu seviyenin üzerindeki enerji seviyeleri boştur. Herhangi bir T sıcaklığındaki elektronun E enerjisine sahip olma ihtimaliyeti, Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu ile verilir:

$$f(E) = \left\{ 1 + \exp \left[\frac{E - E_F}{kT} \right] \right\}^{-1} \quad (2.1)$$

Bu ifadede k , Boltzman sabiti, T malzemenin sıcaklığı, E elektronun bulunabileceği enerji seviyesi ve E_F Fermi enerjisidir.

İş fonksiyonu (ϕ), Fermi enerji seviyesi ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkıdır. Elektron yakınlığı (ilgisi), yarıiletkenin iletkenlik bandının tabanı ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkı olup “ χ ” ile gösterilir. Vakum seviyesi, maddenin dışında hareketsiz bulunduğu bir elektronun enerjisini temsil eder.

Farklı iki malzeme kontak haline getirildiğinde malzemeler arasında yük alış-verişi meydana gelir. Bu alış-veriş iki malzemenin Fermi seviyeleri aynı düzeye gelinceye kadar devam eder (Ziel 1968). Kontaklar, metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına bağlı olarak;

Metal- n -tipi yarıiletken kontaklarda,

$\phi_m > \phi_s \Rightarrow$ Doğrultucu (Schottky) Kontak

$\phi_m < \phi_s \Rightarrow$ Omik Kontak

Metal- p -tipi yarıiletken kontaklarda,

$\phi_s > \phi_m \Rightarrow$ Doğrultucu (Schottky) Kontak

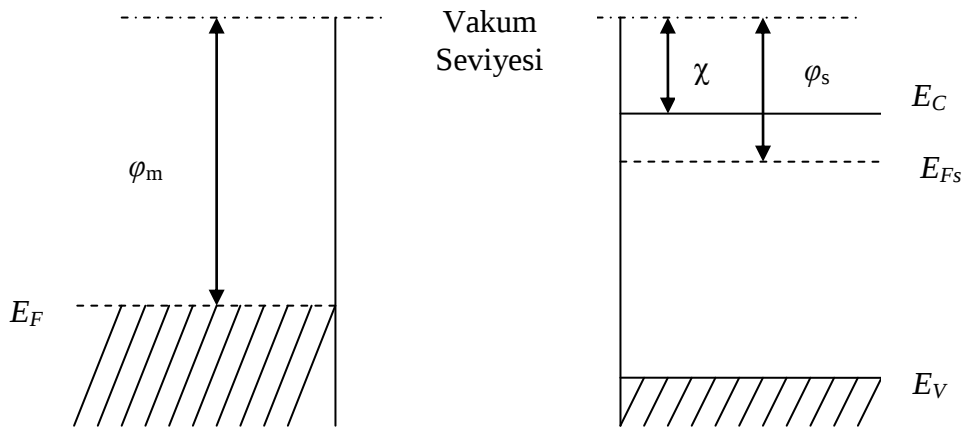
$\phi_s < \phi_m \Rightarrow$ Omik Kontak

olarak değerlendirilir.

Yarıiletkenin bir tarafı *n-tipi*, diğer tarafı da *p-tipi* yapıldığında *p-n* eklemi elde edilir. Teknolojik açıdan Schottky diyotu, *p-n* eklem diyottan daha kolay bir şekilde imal etmek mümkündür. Akım, Schottky diyotlarda çoğunluk taşıyıcılar tarafından diğer tarafa sağlanırken, *p-n* eklemli diyotlarda ise azınlık taşıyıcılar tarafından sağlanır (Neamen 1992). Diğer taraftan, *p-n* eklemde elektron hole rekombinasyonu (yeniden birleşme) sebebiyle akımda belli bir miktar kayıp kaçınılmazdır. Bununla birlikte, Schottky diyotlarda rekombinasyon nedeniyle akımda bir kayıp olmayacağından bu yapıların kullanıldıkları devreler daha yüksek verime sahip olurlar. Schottky yapılar yüksek akım ve düşük gerilim doğrultucuları iken, *p-n* eklemli diyotlarda düşük akım ve yüksek gerilim doğrultucularıdır (Neamen 1992; Mönch 1995). Günlük hayatta kullanılmakta olan elektrikli aletlerin büyük çoğunluğu doğru akımla çalışmaktadır. Bu yüzden doğrultucu yapılara ihtiyaç vardır. Doğrultma işlemi kısacası alternatif akımı doğru akıma çevirme işlemidir.

2.1.2. Metal-*n*-tipi Yarıiletken Doğrultucu (Schottky) Kontaklar

Akımın bir yönden diğer yöne göre çok daha kolay aktığı kontaklara **doğrultucu (Schottky) kontak** denir.

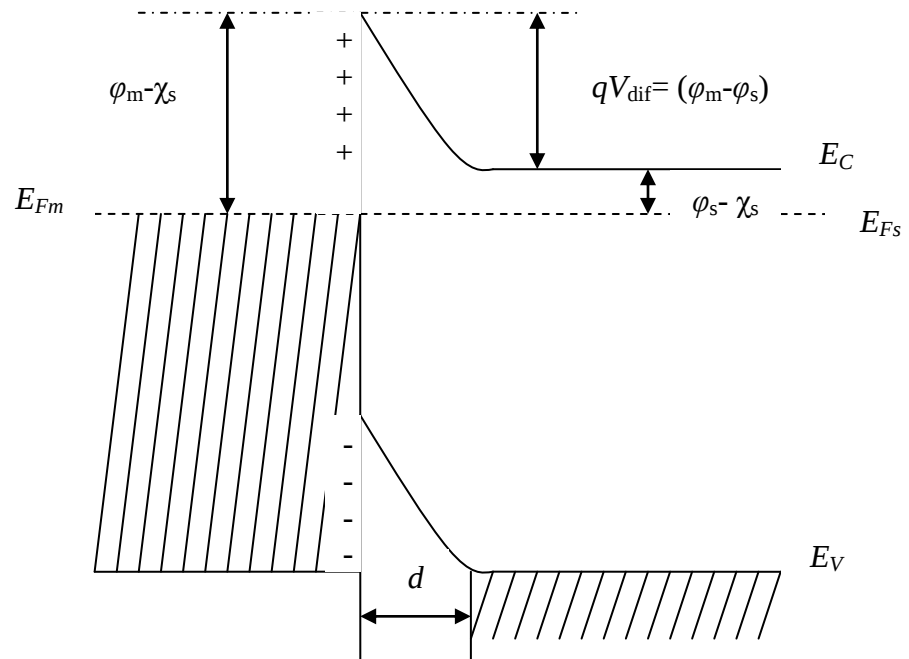


Şekil 2.2. Bir metal ve *n*-tipi yarıiletkenin kontakdan önceki enerji-bant diyagramı

Metal ve n -tipe yarıiletken kontak haline getirilmeden önceki enerji-bant diyagramı Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $(\phi_m - \phi_m)$ kadar yukarıdadır. Bu iki malzeme kontak haline getirildiğinde iş fonksiyonu düşük olandan büyük olana doğru bir yük akışı meydana gelir. Yani, yarıiletkenin yüzeyinden elektronlar metale geçerken geride iyonize olmuş donörler bırakırlar. Yük akışı bittikten sonra her iki malzemenin Fermi seviyeleri aynı düzeyde olur. Yani, yarıiletkenin enerji seviyeleri Şekil 2.3’te görüldüğü gibi $(\phi_m - \phi_m)$ kadar alçalmıştır. Bunun sonucunda yüzeyde bir potansiyel engeli meydana gelir. Bu engelin yarıiletken kısmındaki yüksekliği $(\phi_m - \phi_m)$ kadar ve metal kısmındaki yüksekliği ise $(\phi_m - \chi_s)$ kadardır. Difüzyon potansiyeli cinsinden engel yüksekliği;

$$qV_d = (\phi_m - \phi_s) \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 2.3. Kontakta sonra termal denge durumunda ki enerji-bant diyagramı (Ziel 1968)

Oluşan bu engel, yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronların metale geçişine mani olmaktadır. Kontakın yarıiletken kısmındaki pozitif yüklere, metalde ki iyonize olmuş atomların yük yoğunluğundan daha az olan iyonize olmuş donörlerin neden olduğu ve bunların yarıiletken içinde hareketsiz olduklarından dolayı bunlara yüzey yükü yerine uzay yükü olarak bakmak gerekir. Kontaktaki potansiyel engelinden dolayı, yüzey tabakası uzay yükü tabakası engel tabakası olarak bilinir. Engel tabakasının kalınlığı (d) iyonize olmuş donör konsantrasyonuna ve difüzyon potansiyelinin (V_d) değerine bağlıdır.

Metal ve yarıiletken içerisindeki bazı elektronların termal yolla kazandıkları enerji, elektronların potansiyel engelini aşmasına yetebilecek büyüklükte olduğu zaman kontakten eşit ve zıt yönde bir I_0 sızıntı akımı geçer.

Eğer yarıiletkene $-V$ gerilimi uygulanırsa metalden yarıiletkene geçecek olan elektronlar için engel yüksekliğinde bir değişiklik olmayacağından bu elektronların oluşturacağı akım da değişmeyecektir. Bununla birlikte, yarıiletken kısmında iletkenlik bandındaki enerji seviyeleri qV kadar yükseleceği için yarıiletkenden metale geçecek olan elektronlar için engel yüksekliği qV kadar azalacaktır. Bu nedenden dolayı metalden yarıiletkene doğru akan akım $\exp(qV/kT)$ çarpanı kadar değişmiş olacaktır.

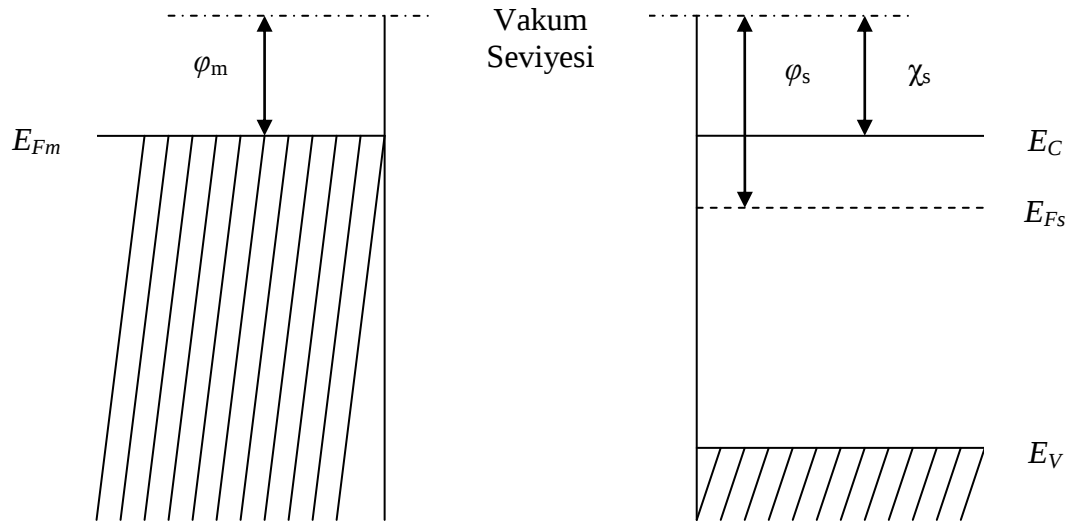
Bu durumda oluşan net akım,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

ile verilir. I net akımı pozitifdir. Bu beslem durumuna ($V \gg kT/q$) düz beslem denir. Yarıiletken kısmına $+V$ gerilimi uygulandığı zaman iletkenlik bandındaki enerji seviyeleri qV kadar alçalır ve yarıiletken kısmındaki engel yüksekliği qV kadar artar oluşan net akım da $-I_0$ değerine yaklaşır. Bu beslem durumuna da ($V \ll kT/q$) ters beslem denir.

2.1.3. Metal- *n*-tipi Yarıiletken Omik Kontaklar

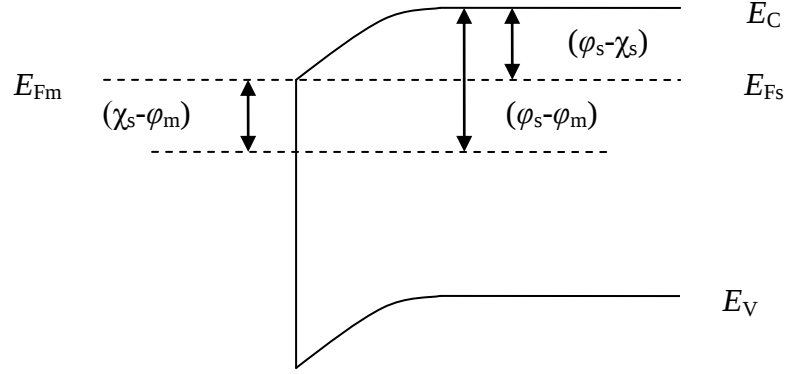
Yarıiletkenin iş fonksiyonu, metalin iş fonksiyonundan büyük olduğu bu kontak şekli içinkontaktan önceki enerji-bant diyagramını Şekil 2.4'teki gibi göstermek mümkündür. Şekilden görüldüğü üzere yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $(\phi_m - \phi_m)$ kadar aşağıdadır. Bu iki malzeme kontak haline getirildiğinde iş fonksiyonu küçük olandan iş fonksiyonu büyük olana doğru bir yük akışı meydana gelir. Yani, elektronlar metalden yarıiletkene, kontağın metal kısmında iyonize olmuş pozitif yüzey yükü bırakarak, geçerlerken yarıiletken kısmında negatif yüzey yüküne neden olurlar. Yük akışı bittikten sonra yarıiletkenin Fermi seviyesi $(\phi_m - \phi_m)$ kadar yükselmiş olur.



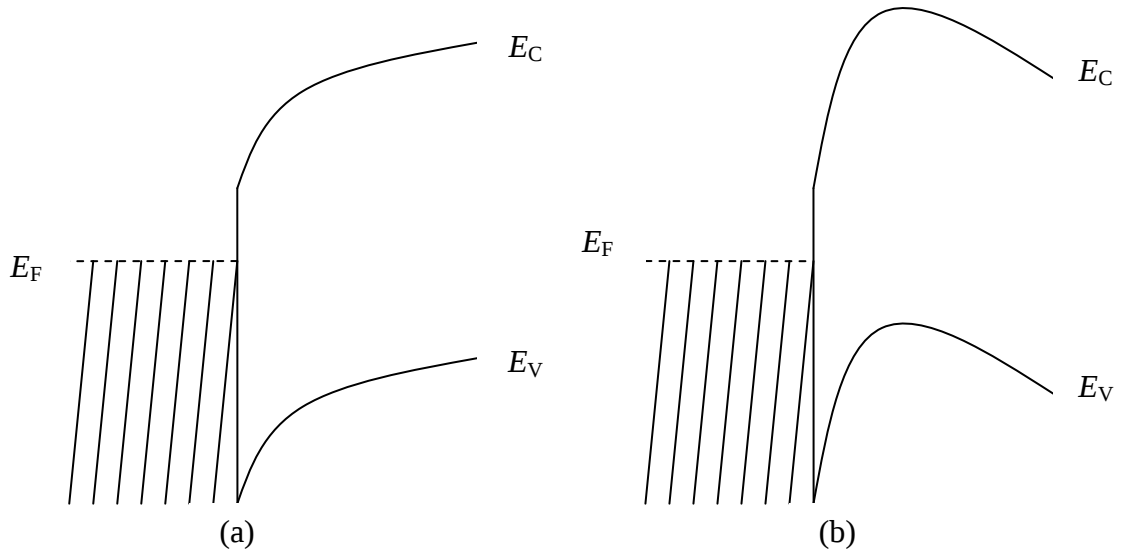
Şekil 2.4. Bir metal ve *n*-tipi yarıiletkenin kontak öncesi enerji-bant diyagramı

Kontaktan sonraki enerji-bant diyagramı Şekil 2.5'de gösterilmiştir. Böyle bir durumda, MY kontağın yarıiletken kısmına metal kısmına göre uygulanan negatif bir gerilim yarıiletkenin enerji seviyesinin daha yukarıya doğru bükülmesine neden olacaktır. Böylece, yarıiletkenden metale doğru elektron akışı daha kolay olacaktır. Bunun tam tersi bir gerilim uygulanırsa, yani kontağın yarıiletken kısmına metal kısmına göre pozitif bir gerilim uygulandığında, yarıiletken kısmında ki enerji seviyesinin daha aşağıya doğru bükülmesine neden olacaktır. Bundan dolayı da metalden yarıiletkene doğru elektron akışı daha rahat olacaktır.

Yarıiletkenden metale doğru, metalden de yarıiletkene doğru elektron akışının rahatlıkla sağlanmış oldukları kontak türüne **omik kontak** adı verilir. Yani omik kontaklarda her iki yönde de akım akışı kolay bir şekilde sağlanır.



Şekil 2.5. Bir metal ve n -tipi yarıiletkenin kontakta sonraki enerji-bant diyagramı



Şekil 2.6. (a) Kontakta negatif voltaj uygulandığında enerji-bant diyagramı (b) Kontakta pozitif voltaj uygulandığında enerji-bant diyagramı

2.2. Schottky Diyotlarda Termoiyonik Emisyon İle Akım İletimi

Sıcak bir yüzeyden termal enerjilerinden dolayı taşıyıcıların salınması olayına **Termoiyonik Emisyon** (TE) denir. Schottky diyotlarda akım iletimi çoğunluk taşıyıcılar ile sağlanır. Metal-*p*-tipi yarıiletkende boşluklar, metal-*n*-tipi yarıiletkenlerde ise elektronlar akımdan sorumludur. MY doğrultucu (Schottky) kontaklarda asıl işlem, TE teorisi ile tanımlanabilen, taşıyıcıların potansiyel engeli üzerinden geçmesidir.

Termoiyonik emisyon karakteristikleri türetilirken, Maxwell-Boltzman yaklaşımının uygulanabilmesi ve termal denge halinin prosesten etkilenmemesi açısından engel yüksekliğinin kT 'den çok daha büyük olduğu durum göz önüne alınır. Bu durumda Maxwell-Boltzman yaklaşımı uygulanmış olur ve termal denge hali bu işlemten etkilenmez. Şekil 2.7'de V_a değerinde bir doğru beslem gerilimi uygulanmış MY eklemin bir boyutlu engel yüksekliği ve elektron akım yoğunluğu bileşenleri gösterilmiştir. Buradaki $J_{s \rightarrow m}$, elektronların yarıiletken tarafından metale akışından dolayı oluşan akım yoğunluğu, $J_{m \rightarrow s}$ ise elektronların metal tarafından yarıiletkene akışından dolayı oluşan akım yoğunluğudur.

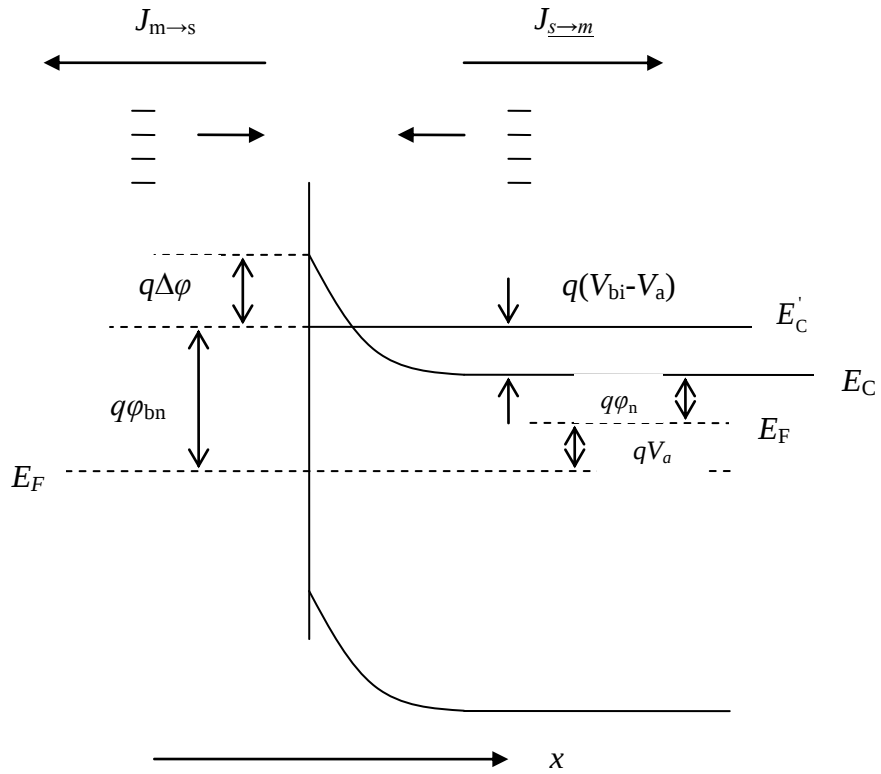
Akımlar yazılırken kullanılan indisli oklar elektron akış yönünü göstermektedir ve akımın yönü elektron akış yönünün tersidir.

$J_{s \rightarrow m}$ akım yoğunluğu, engeli aşmak için yeterli hızlara sahip olan ve pozitif x yönünde hareket eden elektron konsantrasyonunun bir fonksiyonudur. Bu durumda $J_{s \rightarrow m}$ akım yoğunluğu;

$$J_{s \rightarrow m} = q \int_{E_c}^{\infty} v_x dn \quad (2.4)$$

şeklinde yazılabilir. Burada E'_c metale doğru TE gerçekleşmesi için gerekli minimum enerji, v_x elektronların geçişi yönündeki taşıyıcı hızı ve q elektron yüküdür. Artanelektron konsantrasyonu,

$$dn = g_c(E) f_F(E) dE \quad (2.5)$$



Şekil 2.7. İmaj kuvvet düşme etkisini gösteren doğru beslemdeki bir MYeklemin enerji-bant diyagramı

ile verilir. Burada $g_c(E)$ iletkenlik bandındaki hal yoğunluğu ve $f_F(E)$ Fermi-Dirac dağılım fonksiyonudur. Maxwell-Boltzman yaklaşımını uyguladığımızı düşünürsek,

$$dn = \frac{4\pi(2m_n^*)^{3/2}}{h^3} \sqrt{E - E_c} \exp\left[\frac{-(E - E_f)}{kT}\right] \quad (2.6)$$

olarak yazılır. Eğer E_c enerjisinin üzerindeki tüm elektronların enerjilerinin kinetik enerji olduğunu düşünürsek bu durumda

$$\frac{1}{2}m_n^*v^2 = E - E_c \quad (2.7)$$

$$dE = m_n^*v dv \quad (2.8)$$

$$\sqrt{E - E_c} = v \sqrt{\frac{m_n^*}{2}} \quad (2.9)$$

elde edilir. (2.6) denklemi hıza bağılı olarak

$$dn = 2 \left(\frac{m_n^*}{h} \right)^3 \exp\left(\frac{-q\phi_n}{kT} \right) \exp\left(\frac{-m_n^*v^2}{2kT} \right) 4\pi^2 v^2 dv \quad (2.10)$$

olarak yazılabilir. (2.10) eşitliği, bütün yönlerde hareket eden, hızları v ile $v + dv$ arasında olan, birim hacim başına elektron sayısını verir. Elektronun hızı bileşenlerine ayrılırsa, hız dağılımı $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$ olarak yazılır. Diferansiyel hacim terimi $(4\pi^2 v^2 dv)$, $dv_x dv_y dv_z$ şekline dönüştürülürse (2.4) eşitliği şu şekilde yazılabilir:

$$J_{s \rightarrow m} = 2q \left(\frac{m_n^*}{h} \right)^3 \exp\left(\frac{-q\phi_n}{kT} \right) \cdot \int_{v_{0x}}^{\infty} v_x \exp\left(\frac{-m_n^*v_x^2}{2kT} \right) dv_x \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\frac{-m_n^*v_y^2}{2kT} \right) dv_y \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\frac{-m_n^*v_z^2}{2kT} \right) dv_z \quad (2.11)$$

Burada v_{0x} elektronun x yönünde potansiyel engelini aşması için gerekli olan minimum hızdır. Aşağıdaki tanımlamalarla (2.11) eşitliğinde değişken değiştirme yapabiliriz:

$$\frac{m_n^* v_x^2}{2kT} \equiv \alpha^2 + \frac{q(V_{bi} - V_a)}{kT} \quad (2.12a)$$

$$\frac{m_n^* v_y^2}{2kT} \equiv \beta^2 \quad (2.12b)$$

$$\frac{m_n^* v_z^2}{2kT} \equiv \gamma^2 \quad (2.12c)$$

Bu durumda, v_x yönünde engeli aşmak için gerekli minimum hız v_{0x}

$$\frac{1}{2} m_n^* v_{0x}^2 = q(V_{bi} - V_a) \quad (2.13)$$

olarak yazılır. Buradaki α değişkeni, aşağıdaki gibi integrasyon limitinin daha düşük bir sınırı olduğunu gösterir.

$$v_x \rightarrow v_{0x} \Rightarrow \alpha = 0 \quad (2.14a)$$

$$v_x dv_x = \left(\frac{2kT}{m_n^*} \right) \alpha d\alpha \quad (2.14b)$$

O zaman (2.11) eşitliği şu şekilde yazılabilir:

$$J_{s \rightarrow m} = 2q \left(\frac{m_n^*}{h} \right)^3 \left(\frac{2kT}{m_n^*} \right)^2 \exp \left(\frac{-q\phi_n}{kT} \right) \exp \left[\frac{-q(V_{bi} - V_a)}{kT} \right] \int_0^\infty \alpha \exp(-\alpha)^2 d\alpha \int_{-\infty}^\infty \exp(-\beta)^2 d\beta \int_{-\infty}^\infty \exp(-\gamma)^2 d\gamma \quad (2.15)$$

(2.15) eşitliğinin integrali alındıktan sonra,

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi q m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[\frac{-q(V_{bi} - V_a)}{kT} \right] \exp \left(\frac{qV_a}{kT} \right) \quad (2.16a)$$

ya da Şekil 2.7'den görüldüğü gibi, $\varphi_n + V_{bi} = \varphi_{bn}$ olarak yazılırsa (2.16a) eşitliği,

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi q m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[\frac{-q\varphi_{bn}}{kT} \right] \exp \left(\frac{qV_a}{kT} \right) \quad (2.16b)$$

halini alır. Metalden yarıiletkeneye doğru elektron akım yoğunluğu $J_{m \rightarrow s}$, eğer uygulama gerilimi sıfırsa $J_{s \rightarrow m}$ ile tamamen aynı olur. Bu durumda,

$$J_{m \rightarrow s} = \left(\frac{4\pi q m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left(\frac{-q\varphi_{bn}}{kT} \right) \quad (2.17)$$

olur. Bu eşitlikle verilen akım yoğunluğu, sızıntı akımı olarak da adlandırılan ters beslem doyuma akım yoğunluğuna karşılık gelir. Metalden yarıiletkeneye doğru seçilen akım yönü pozitif olarak tanımlanırsa, MY eklemünde net akım yoğunluğu;

$$J = J_{s \rightarrow m} - J_{m \rightarrow s} = \left[A^* T^2 \exp \left(\frac{-q\varphi_{bn}}{kT} \right) \right] \left[\exp \left(\frac{qV_a}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.18)$$

olarak verilir. Burada A^* TE için **etkin Richardson sabiti** olarak adlandırılır ve

$$A^* = \left(\frac{4\pi q m_n^* k^2}{h^3} \right) \quad (2.19)$$

olarak ifade edilir. (2.18) denklemi genel diyotlar için,

$$J = J_{sT} \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.20)$$

olarak yazılabilir. Eşitlikte verilen J_{sT} ters-saturasyon akım yoğunluğudur (sızıntı akımı yoğunluğu) ve

$$J_{sT} = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \quad (2.21)$$

ile verilir. Şekil 2.7’de gösterildiği gibi, imaj kuvvet etkisinden dolayı Schottky engel yüksekliğinin değiştiğini biliyoruz. Bu etkiyi göz önüne alırsak $\phi_{bn} = \phi_{b0} - \Delta\phi$ olarak alıp (2.20) eşitliğini şu şekilde yazabiliriz:

$$J_{sT} = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{b0}}{kT}\right) \exp\left(\frac{q\Delta\phi}{kT}\right) \quad (2.22)$$

Engel yüksekliğindeki $\Delta\phi$ değişimi, uygulanan elektrik alanın artmasıyla ya da uygulanan ters beslem geriliminin artmasıyla artacaktır. Engel düşme etkisinden dolayı ters beslem voltajı artarsa, ters beslem akımı da artar. Doğru beslemde ise ters bir etki görülür; uygulanan beslem geriliminin artmasıyla, akım azalır. Bu durum diyotun bozulmaya doğru gittiğini gösterir.

2.3. Metal-Yarıiletken Kontaklara Sıcaklığın Etkisi

2.3.1. Sıcaklığın bir Fonksiyonu Olarak Doğru Beslem I - V Karakteristikleri

İdeal bir Schottky diyotta akım iletiminin çoğunluk taşıyıcılar tarafından sağlandığını ve akımın ara yüzey engeli üzerinden TE teorisi ile açıklanabildiğini daha önce belirtmiştik. Doğru beslem durumunda bu TE akımı,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.23)$$

olarak yazılabilir (Rhoderick and Williams 1988). Burada I_0 , saturasyon akımıdır. Saturasyon akım yoğunluğu ise;

$$J_0 = \frac{I_0}{A_d} = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{b0}}{kT}\right) \quad (2.24)$$

ile verilir.(2.24) ifadesinde A_d etkin diyet alanı, ϕ_{b0} sıfır-beslem görünür EY, diğer nicelikler ise daha önce belirtilenlerle aynıdır.

Deneyisel I - V çizimlerinin ideal TE modelinden sapmasını tasvir edebilmek için tanımlanan idealite faktörü n ,

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d \ln I} \right) \quad (2.25)$$

ile verilir. (2.24) eşitliğinin her iki tarafının tabii logaritması alınıp, ϕ_{b0} 'a göre çözümlerse, EY ifadesi için

$$q\phi_{b0} = kT \ln \left(\frac{AA^* T^2}{I_0} \right) \quad (2.26)$$

elde edilir. Deneyisel veriler değerlendirilirken sıkça görülmüştür ki, elde edilen I - V eğrileri ideallikten sapar ve (2.23) eşitliği ile uyumlu olmaz. Deneyisel verilerdeki bu ideal olmayan davranışın Schottky etkisi, seri ve paralel direnç, ara yüzey etkisi ve homojen olmayan Schottky engel yüksekliğinden kaynaklandığı yönünde literatürde birçok çalışma vardır. Uygulama gerilimi ile ilgili ($V \geq 3kT/q$) kabulü yapıp, doğru

beslemengel yüksekliğinin gerilimle lineer olarak arttığı kabul edilerek, seri direnç etkisi göz önünde bulundurularak (2.23) eşitliği,

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV_d}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV_d}{kT}\right)\right] \quad (2.27)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Burada ($V_d = V - IR_s$) diyot voltajıdır. Paralel direnç R_p 'de (2.27) eşitliğine dâhil edildiği zaman toplam akım,

$$I_T = I + \frac{V_d}{R_p} \quad (2.28)$$

olarak yazılabilir (Ranuarez 2000; Hernandez 2001). Bu denklem, bir Schottky diyot için akım davranışını iyi bir şekilde tanımlamış olur.

Verilen bir sıcaklık değeri için **ayarlanabilen** I_0 , n , R_s **ve** R_p parametreleri, deneysel verilerden elde edilen I - V eğrilerine en uygun şekilde fit edilebilir ve böylece deney ile teori arasındaki uyum gözlenebilir (Chand 2002).

Sıfır-beslem görünür EY φ_{b0} (2.24) eşitliğinde deneysel verilerden elde edilen J_0 akım yoğunluğu ve A^* etkin Richardson sabiti değeri kullanılmak suretiyle her bir sıcaklıkta hesaplanabilir. Engel yüksekliğini değerlendirebilmek için (2.24) eşitliği,

$$\ln\left(\frac{J_0}{T^2}\right) = \ln A^* - \frac{q\varphi_{b0}}{kT} \quad (2.29)$$

şeklinde yeniden düzenlenebilir. Bu şekilde oluşturulan $\ln(J_0/T^2)$ - $1/T$ eğrisi, yani geleneksel Richardson çizimi, genellikle sıcaklıkla lineer bir değişim gösterir. 0 K için

tanımlanan sıfır beslem EY $\varphi_{b0}(T=0)$ ve A^* değerleri sırasıyla bu eğriye fit edilen doğrunun eğiminden ve ordinat eksenini kestiği noktadan elde edilir.

2.3.2. İmaj Kuvvet Düşme Etkisi

Teorik verilerle deneysel sonuçlar kıyaslanmadan önce, bir elektron ile metalin yüzeyi arasındaki imaj kuvvet etkisini de hesaba katmamız gerekir. Çünkü metal tarafındaki potansiyel EY gerçek manada sabit değildir ve az da olsa uygulama geriliminden etkilenir. Bunun nedeni yarıiletkendeki elektronlar tarafından metalde oluşturulan imaj yüküdür. Bir elektron bir metale yaklaştığı zaman elektrostatiğe göre, metal içerisinde kendisine eşit uzaklıkta aynı büyüklükte fakat zıt işaretli bir imaj yükü oluşturur. Bu durumda meydana gelen Coulomb etkileşmesinden dolayı MY kontak durumunda deplasyon bölgesinde oluşan elektrik alana zıt bir elektrik alan oluşur. Oluşan elektrik alan metal tarafındaki potansiyel engelin düşmesine sebebiyet verir. Metalin yüzeyinden x mesafesinde bulunan bir elektron ile bunun metal içerisinde oluşturduğu imaj yükü arasında

$$\frac{q^2}{4\pi\epsilon_s(2x)^2} = \frac{q^2}{16\pi\epsilon_s x^2} \quad (2.30)$$

büyüklüğünde bir çekim kuvveti oluşur. Bu çekici kuvvet nedeniyle elektron $-qV$ kadar negatif potansiyel enerjiye sahip olur. Böylece, potansiyel için

$$V = \frac{q^2}{16\pi\epsilon_s} \int_x^\infty \frac{dx}{x^2} = \frac{q^2}{16\pi\epsilon_s x} \quad (2.31)$$

ifadesi elde edilir. Şekil 2.12’de görüldüğü gibi imaj potansiyel enerjisi Schottky engelinden dolayı potansiyel enerjiye eklenmelidir.

Oluşan maksimum potansiyel enerji değeri, MY kontak bölgesindeki bileşke elektrik alanın sıfır olduğu durumda bir x_m mesafesinde meydana gelsin. Bu durumda imaj kuvvet nedeniyle oluşan maksimum elektrik alan $E_{\max}$;

$$E_{\max} = \frac{q}{16\pi\epsilon_s x_m^2} \quad (2.32)$$

olarak verilir. Bu elektrik alan deplasyon bölgesinde oluşan elektrik alana eşit büyüklükte ve zıt yönde olacaktır. İmaj kuvvetinden dolayı engeldeki potansiyel düşmesi,

$$\Delta\varphi_{bi} = x_m E_{\max} + \frac{q}{16\pi\epsilon_s x_m} = 2x_m E_{\max} \quad (2.33)$$

kadardır. Bu düşme dikkate alınırsa,

$$\Delta\varphi_{bi} = 2E_{\max} \left(\frac{q}{16\pi\epsilon_s E_{\max}} \right)^{1/2} = 2 \left(\frac{qE_{\max}}{16\pi\epsilon_s} \right)^{1/2} \quad (2.34)$$

$$E_{\max} = \left(\frac{2qN_d}{\epsilon_s} \right)^{1/2} \left[V_d - \frac{kT}{q} \right]^{1/2} \quad (2.35)$$

$$\Delta\varphi_{imf} = \left[\left(\frac{q^3 N_d}{8\pi^2 \epsilon_s} \right) \left(\varphi_{b0} - V - \xi - \frac{kT}{q} \right) \right]^{1/4} \quad (2.36)$$

şeklinde elde edilir. Burada $\xi = (kT/q)[\ln(N_c/N_d)]$ olarak tanımlanır (Wittmer 1990).

Aynı şekilde imaj kuvvet etkisi göz önüne alınarak idealite faktörü için,

$$\frac{1}{n_{imf}} = 1 - \frac{1}{4} \left(\frac{q^3 N_d}{8\pi^2 \epsilon_s} \right)^{1/4} \left(\varphi_{b0} - V - \xi - \frac{kT}{q} \right)^{-3/4} \quad (2.37)$$

eşitliği elde edilir (Wittmer 1990).

2.3.3. Homojen Olmayan Engel Yüksekliği Etkisi ve Modifiye Richardson Çizimi

TE teorisine göre, Shottky engelinin homojen olduğu farz edilir ve doğru beslem uygulama gerilimine (V_a) bağlı ideal Shottky engel akımı denklemi, $V_a \geq 3kT/q$ varsayımı yapılarak elde edilir (Rhoderick and Williams 1988). Bununla birlikte, düşük sıcaklıklarda diyot davranışında görülen anormallikleri açıklayabilmek için mevcut birçok çalışma vardır (Jiang *et al.* 2001; Huang and Lu 2005; Gülnahar ve Efeoğlu 2009; Abay 2010). Bu çalışmalarda doğru beslem I - V karakteristiklerinden elde edilen EY ve idealite faktörünün sıcaklığa büyük ölçüde bağlı olduğu bulunmuştur. Düşük sıcaklıklarda idealite faktöründe gözlenen artıştan ve sıfır beslem EY'de gözlenen dikkate değer azalıştan ilk olarak Song *et al.* (1986) bahsetmiştir. Bununla birlikte, engel bölgesinin kalınlığındaki değişim, ara yüzey kompozisyonu ve ara yüzey yüklerinin tek tip olmayışı vb. etkilerden dolayı MY arayüzeyde homojen olmayan engel kavramı öngörülmüştür (Song *et al.* 1986; Chin *et al.* 1990; Werner and Güttler 1991, 1993; Chand 2002).

Bu durumu açıklamak için Ohdomari tarafından ortaya atılan modelde MY arayüzeyde farklı engel yüksekliklerine sahip çok sayıda paralel diyotun var olduğu farz edilmektedir (Ohdomari and Tu 1980). Bu modelde, her bir engelin akıma birbirinden bağımsız olarak katkıda bulunduğu ve inhomojen engele sahip Schottky diyot boyunca akan toplam akımın bu akımların bileşimi olduğu düşünülmüştür. Normal şartlarda deneysel I - V verilerinden elde edilen EY ve idealite faktörünün sıcaklığa bağlı değişimi lineer olmalıdır. Bununla birlikte, bazı durumlarda sıcaklığa bağlı bu değişim iki veya daha fazla farklı eğimli lineer bölgelere sahip bir dağılım gösterebilmektedir. Buradan hareketle Multiple Gaussian Distribution of Barrier Height (Çoklu Gauss Dağılımlı Engel Yüksekliği) (ÇGD) modeli geliştirilmiştir. Bu modele göre; EY, ortalama EY ($\bar{\phi}_{b0}$) ve onun standart sapmasını (σ_{s0}) göz önünde bulunduran ÇGD ile temsil edilir. Bu dağılım;

$$P(\varphi_{b0}) = \sum_{i=1}^N \frac{\delta_i}{\sigma_{0i} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\bar{\varphi}_{b0i} - \varphi_{b0})^2}{2\sigma_{0i}^2} \right] \quad (2.38)$$

şeklinde ifade edilir. Burada δ_i , $\bar{\varphi}_{b0i}$ ve σ_{0i} sırasıyla i dağılım fonksiyonunun ağırlığını, ortalama EY değerini ve EY'nin standart sapmasını temsil etmektedir (Ohdomari and Tu 1980). Standart TE teorisine göre bir diyot için (2.27) ile verilen I - V ifadesi modifiye edilerek, her biri farklı engele sahip paralel diyotlardan geçen akım yoğunluklarının toplamı şeklinde

$$\begin{aligned} J(V) &= A^{**} T^2 \left[\exp \left(\frac{qV_d}{nkT} \right) - 1 \right] \int_{-\infty}^{\infty} P(\varphi_{b0}) \exp \left(-\frac{q\varphi_{b0}}{kT} \right) d\varphi_{b0} \\ &= J_0 \left[\exp \left(\frac{qV_d}{n_{ap} kT} \right) - 1 \right] \end{aligned} \quad (2.39)$$

ifade edilebilir (Songet *al.* 1986). Burada saturasyon akım yoğunluğu J_0 ,

$$J_0 = A^{**} T^2 \exp \left(-\frac{\varphi_{ap}}{kT} \right) \quad (2.40)$$

şeklindedir. Bu ifadelerde A^{**} , φ_{ap} ve n_{ap} sırasıyla modifiye Richardson sabiti, görünür EY ve görünür idealite faktörü değerleridir. Gauss dağılımının normalizasyonu, $\sum_i \delta_i = 1$ olmasını gerektirir. Bu durumda ÇGD sahip homojen olmayan Schottky diyotun görünür EY

$$\varphi_{ap} = \frac{kT}{q} \ln \sum_{i=1}^N \delta_i \exp \left(\frac{q\bar{\varphi}_{b0i}}{kT} - \frac{1}{2} \left(\frac{q\sigma_{0i}}{kT} \right)^2 \right) \quad (2.41)$$

eşitliği ile belirlenir (Jiang *et al.* 2001). (2.41) eşitliği $N=1$ için iyi bilinen şu formüle indirgenir (Werner and Güttler 1991):

$$\varphi_{ap} = \bar{\varphi}_{b0} - \frac{q\sigma_0^2}{2kT} \quad (2.42)$$

Eğer EY dağılımı Gauss fonksiyonu ile tanımlanabiliyorsa, görünür EY $\varphi_{ap} - q/2kT$ çizimi lineer bir değişim göstermelidir. Bu doğrunun eğimi standart sapmanın karesine (σ_0^2) ve kesim noktası da $\bar{\varphi}_{b0}$ değerine eşit olur. Fakat bazı çalışmalarda, bu çalışmada olduğu gibi, bu değişim düşük ve yüksek sıcaklık bölgeleri için ikili Gauss dağılımı sergilemektedir. Bu durumda diyotun sergilediği anormal davranış EY'nin ikili Gauss dağılım (Double Gaussian Distribution- DGD) modeline göre yapılmalıdır. DGD modeli göz önüne alındığında, (2.41) eşitliği şu şekilde tekrar yazılabilir (Jiang *et al.* 2001):

$$\varphi_{ap} = \frac{kT}{q} \ln \left[\delta_1 \exp \left(\frac{q\bar{\varphi}_{01}}{kT} - \frac{1}{2} \left(\frac{q\sigma_{01}}{kT} \right)^2 \right) + \delta_2 \exp \left(\frac{q\bar{\varphi}_{02}}{kT} - \frac{1}{2} \left(\frac{q\sigma_{02}}{kT} \right)^2 \right) \right]. \quad (2.43)$$

Görünür EY için söylenene benzer şekilde, eğer idealite faktörü $n_{ap} - q/2kT$ çizimi de ikili bir değişim gösteriyorsa, aynı şekilde DGD modeli kullanılarak idealite faktörü için de aşağıdaki eşitlik yazılabilir (Abayet *al.* 2006, Abay 2010):

$$\frac{1}{n_{ap}(V,T)} - 1 = \frac{kT}{qV} \ln \left[\exp \left\{ \frac{q}{kT} \left(\frac{q\rho_{31}V}{2kT} - \rho_{21}V \right) \right\} + \exp \left\{ \frac{q}{kT} \left(\frac{q\rho_{32}V}{2kT} - \rho_{22}V \right) \right\} \right] \quad (2.44)$$

(2.44) eşitliği $N=1$ için

$$\frac{1}{n_{ap}(V,T)} - 1 = \frac{q\rho_3}{2kT} - \rho_2. \quad (2.45)$$

bilinen hale indirgenir (Werner and Güttler 1991).

Böylelikle, $\varphi_{ap} - q/2kT$ çiziminden elde edilen fit parametreleri δ_1 ve $\delta_2 (= 1 - \delta_1)$ ile $\overline{\varphi}_{01}$, σ_{01} , $\overline{\varphi}_{02}$, σ_{02} değerleri (2.43) eşitliğinde yerine yazılarak sıcaklığa bağlı teorik EY değerleri elde edilir. Benzer şekilde, $\eta_{ap} - q/2kT$ çiziminden elde edilen fit parametreleri ρ_{21} , ρ_{22} , ρ_{31} , ρ_{32} (2.44) eşitliğinde yerine yazılarak teorik idealite faktörü değerleri elde edilir.

Yukarıda bahsedildiği gibi homojen olmayan EY'den ötürü $\ln(J_0/T^2) - 1000/T$ geleneksel Richarson çizimi de çoğu zaman düşük sıcaklıklarda lineerlikten sapma gösterir. Bu sapmadan dolayı EY için DGD modeli kullanılarak (2.40) ve (2.41) eşitlikleri birleştirilerek, modifiye Richarson ifadesi için,

$$\ln\left(\frac{J_0}{T^2}\right) = \ln A^{**} + \ln \sum_{i=1}^N \delta_i \exp\left[-\frac{q\overline{\varphi}_{b0i}}{kT} + \frac{1}{2}\left(\frac{q\sigma_{0i}}{kT}\right)^2\right] \quad (2.46)$$

eşitliği elde edilir. DGD için her bir sıcaklık bölgesi için elde edilen $\left[\ln(J_0/T^2) - (q^2\sigma^2/2k^2T^2)\right] - 1000/T$ çizimine fit edilen doğrunun eğiminden sıfır beslem ortalama EY $\overline{\varphi}_{b0}$, kesim noktasından ise modifiye Richardson sabiti A^{**} değeri elde edilir.

2.4. Cheung Fonksiyonları ile Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi

MY kontak yapılarının doğru beslem $I - V$ karakteristiklerinden Schottky diyot parametrelerinin hesaplanabilmesi için Cheung and Cheung (1986) tarafından farklı bir model ileri sürülmüştür. Bu model yardımıyla seri direnç R_s , sıfır beslem EY φ_b ve

idealite faktörü n değerleri hesaplanmıştır. TE teorisinden bulunan akım yoğunluğu J ifadesinin, etkin diyot alanı A_d ile çarpılmasıyla toplam akım ifadesi,

$$I = A_d \cdot J = \left[A_d A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(-\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.47)$$

olarak elde edilir. Eğer $qV \gg kT$ ise, eşitliğin sağ terimindeki 1 ihmal edilebilir. Pratikte, diyota uygulanan gerilimin tamamı deplasyon bölgesi üzerinden geçmediğinden, ideal durumdan sapmalar gözlenecektir. Bu sapmaları ifade edebilmek için, birimsiz bir sabit olarak tanımlanan idealite faktörü n değerinin hesaba katılması gerekmektedir. Bu durumda akım ifadesi şu hale dönüşür:

$$I = A_d \cdot J = \left[A_d A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(-\frac{qV}{nkT}\right) \right] \quad (2.48)$$

Burada uygulama geriliminin IR_s kadarlık bir kısmının seri direnç üzerinden geçeceği göz önünde bulundurularak, gerilimdeki bu düşüş hesaba katılırsa, $V = V - IR_s$ olarak alınabilir ve (2.48) eşitliği,

$$I = A_d \cdot J = \left[A_d A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(-\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) \right] \quad (2.49)$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitliğin her iki tarafının doğal logaritması alınırsa,

$$\ln I = \ln(A_d A^* T^2) - \frac{q\phi_b}{kT} + \frac{qV}{nkT} - \frac{qIR_s}{nkT} \quad (2.50)$$

ifadesi elde edilir. (2.50) eşitliğinden V çekilirse,

$$V = \left(\frac{nkT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{A_d A^* T^2} \right) + n\phi_b + IR_s \quad (2.51)$$

elde edilir. Eşitlik (2.51)'in her iki tarafının $\ln(I)$ 'ya göre türevi alınırsa,

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (2.52)$$

eşitliğine ulaşılır. Buradan, $dV/d(\ln I)$ - I çiziminin bir doğru vereceği açıktır: Doğrunun eğiminden R_s seri direnç değeri, $I = 0$ için ordinat ekseninin kesim noktasından ise,

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (2.53)$$

ifadesine göre n idealite faktörü hesaplanabilir (Cheung and Cheung 1986). (2.52) ifadesi birinci Cheung fonksiyonu olarak bilinir.

ϕ_b EY değerinin bulunabilmesi için yeni bir $H(I)$ fonksiyonu tanımlanır. (2.51) eşitliğinin her iki tarafı $H(I)$ 'ya eşitlenirse aşağıdaki gibi iki tane $H(I)$ fonksiyonu elde edilir:

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{A_d A^* T^2} \right) \quad (2.54)$$

$$H(I) = n\phi_b + IR_s. \quad (2.55)$$

(2.54) ve (2.55) eşitlikleri de ikinci Cheung fonksiyonları olarak bilinir. (2.53) eşitliğinden elde edilen n değeri, (2.54) eşitliğindeki $H(I)$ değerini hesaplamak için

yerine yazılır. Buradan $H(I)$ - I grafiği çizilir. Bu grafik lineer bir doğru verecektir. Bu doğrunun eğimi, deplasyon bölgesinin direnci ile kontak direncinin toplamı olan seri direnç R_s değerini verir. Yine, bu doğrunun $I = 0$ için ordinat eksenini kestiği nokta $n\phi_b$ değerini verir. n değeri (2.53) eşitliğinden bilindiği için yerine yazılır ve buradan da EY ϕ_b elde edilir.

2.5. Metal-Yarıiletken Schottky Diyotlarda Schottky Kapasitesi

MY kontaklarda Schottky tabakası bir kondansatör gibi davranır. Çünkü metal tarafındaki negatif yüzey yükleri ve yarıiletkenin yüzey tabakasındaki donörler iyonize olmuşlardır. Burada zıt yüklenmiş yüzeyler kondansatör levhaları gibi, arınma bölgesinin kalınlığı ise levhalar arasındaki mesafe gibidir. İdeal bir metal- n tipi yarıiletken Schottky diyotun uçları aradındaki ters beslem gerilimi arttırılırsa arınma bölgesinin genişliği artar. Bununla birlikte, yarıiletkenin metale yakın kısmında belli büyüklükte boşluk yoğunluğu mevcutsa yeni Fermi seviyesi metaldeki Fermi seviyesiyle aynı hizaya geleceği için boşluk yoğunluğu düşecektir. Böylece, Schottky bölgesinin sığası bu yük düzenlenimindenötürü değişecektir. Yukarıda belirttiğimiz özelliklerden dolayı Schottky diyotlar, gerilim kontrollü değişken kondansatör olarak kullanılabilir.

Metal- n tipi yarıiletken diyotun engel tabakası ile yük yoğunluğu arasındaki ifade aşağıdaki Poisson eşitliği ile verilir:

$$\nabla^2\psi(x) = \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_s\epsilon_0} \quad (2.56)$$

Burada ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti ve $\rho(x)$ konuma bağlı uzay yükü yoğunluğudur. n -tipi yarıiletkenin donör yoğunluğu N_d ve iletkenlik bandındaki elektron yoğunluğu n olmak üzere uzay yükü yoğunluğu

$$\rho(x) = q(N_d - n) \quad (2.57)$$

eşitliği ile verilir. Engel tabakasının difüzyon potansiyeli V_d , kontağa uygulanan gerilim V ve deplasyon tabakasının kalınlığı d ile gösterilir. $q(V_d + V) \gg kT$ olduğu zaman, $0 \leq x \leq d$ aralığında $N_d \gg n$ olacağı için uzay yükü yoğunluğu ifadesi,

$$\rho(x) = qN_d \quad (2.58)$$

şeklinde yazılır. Bu değeri (2.56) denkleminde yerine yazarak, tek boyutta Poisson denklemini için

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\frac{qN_d}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (2.59)$$

elde edilir. Eşitlik (2.59)'un çözümü aşağıdaki sınır şartlarında aranabilir.

1. $x = 0$ için $\psi(x) = 0$
2. $x \geq 0$ için $\psi(x) = V_d + V$
3. $x = d$ için $\frac{d\psi(x)}{dx} = 0$

(2.59) eşitliği için üçüncü sınır şartını göz önünde bulundurarak integrali alınırsa, arınma bölgesindeki elektrik alan,

$$E(x) = -\frac{d\psi(x)}{dx} = \frac{qN_d}{\epsilon_s \epsilon_0} (x - d) \quad (2.60)$$

şeklinde yazabiliriz. Yukarıdaki sınır şartlarından birincisini göz önünde bulundurarak (2.60) eşitliğinin integrali alınırsa potansiyel fonksiyonunu,

$$\psi(x) = -\frac{qN_d}{\varepsilon_s \varepsilon_0} \left(\frac{1}{2} x^2 - xd \right) \quad (2.61)$$

şeklinde yazabiliriz. (2.61) eşitliğinin çözümü için ikinci sınır şartı göz önüne alınarak

$$V_d + V = \frac{qN_d}{2\varepsilon_s \varepsilon_0} d^2 \quad (2.62)$$

$$d = \left[\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0}{qN_d} (V_d \pm V) \right]^{1/2} \quad (2.63)$$

ifadelerine ulaşılır. (2.63) ifadesi herhangi bir $\pm V$ geriliminde Schottky bölgesinin genişliği olarak bilinir. Bu ifadede V_d difüzyon potansiyelidir. Yarıiletkendeki birim yüzey başına yük

$$Q = -qN_d d = -[2\varepsilon_s \varepsilon_0 qN_d (V_d + V)]^{1/2} \quad (2.64)$$

ifadesi ile verilir. Birim alan başına kapasite, uygulama gerilimine göre yük değişimi olarak tanımlanır:

$$C = \left| \frac{\partial Q}{\partial V} \right| = \left[\frac{\varepsilon_s \varepsilon_0 qN_d}{2(V_d + V)} \right]^{1/2} = \frac{\varepsilon_s \varepsilon_0}{d}. \quad (2.65)$$

Böylece, A_d etkin alanına sahip bir diyotun kapasitesi (2.65) ifadesini kullanılarak

$$C = A_d \frac{\varepsilon_s \varepsilon_0}{d} \quad (2.66)$$

şeklinde elde edilir. Bu eşitliğin tersinin karesini alırsak,

$$\frac{1}{C^2} = \left[\frac{d}{A_d \varepsilon_s \varepsilon_0} \right]^2 \quad (2.67)$$

ifadesi elde edilir. (2.63) eşitliğini, (2.67) eşitliğinde kullanırsak,

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_d + V)}{q \varepsilon_s \varepsilon_0 A_d^2 N_d} \quad (2.68)$$

ifadesine ulaşırız. Burada, V uygulama gerilimidir. $C^{-2} - V$ çizimine yapılacak lineer fitin gerilim (V) eksenini kestiği nokta V_d difüzyon potansiyelini verir. Eşitlik (2.68)'in V 'ye göre türevi alınırsa,

$$\frac{d(C^{-2})}{dV} = \frac{2}{\varepsilon_s \varepsilon_0 q A_d^2 N_d} \quad (2.69)$$

elde edilir. (2.69) eşitliğinden yarıiletkenin taşıyıcı konsantrasyonu için

$$N_d = \frac{2}{q \varepsilon_s \varepsilon_0 A_d^2} \frac{dV}{d(1/C^2)} \quad (2.70)$$

ifadesi elde edilir. $C^{-2} - V$ çiziminin eğiminden taşıyıcı konsantrasyonu N_d elde edilebilir. n -tipi bir yarıiletkendeki elektron konsantrasyonu,

$$n_0 = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \quad (2.71)$$

ile verilmektedir (Neamen 1992). Burada, N_c termal denge durumunda iletkenlik bandındaki elektron konsantrasyonu olup,

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (2.72)$$

ifade ile verilir. n -InP yarıiletkeni için $m^* (=0.078m_0)$ etkin kütle değeri kullanılarak oda sıcaklığındaki N_c değeri elde edilebilir. n_i asal elektron konsantrasyonu olmak üzere n -tipi yarıiletken durumunda $N_d \gg n_i$ olacağı için $n_0 \cong N_d$ olur (Neamen 1992). Bu durumda (2.71) eşitliği,

$$N_d = N_c \exp \left(\frac{E_f - E_c}{kT} \right) \quad (2.73)$$

şeklinde yazılır. Eşitlik (2.73)'ün her iki tarafının da logaritması alınır ve iletkenlik bandı referans seviye olarak ($E_c = 0$) kabul edilirse Fermi enerji seviyesi,

$$E_f = kT \ln \left(\frac{N_d}{N_c} \right) \quad (2.74)$$

şeklinde yazılabilir. (2.70) eşitliğinden elde edilen N_d değeri kullanılarak bu ifadede Fermi enerji seviyesi hesaplanabilir.

Ayrıca bir Schottky diyot için $C-V$ karakteristiğinden elde edilecek EY,

$$\phi_{b(C-V)} = E_f + V_d + kT \quad (2.75)$$

ifadesiyle verilir (Rhoderick 1988). Bu ifade ideal durum için geçerlidir, ideal olmayan durum için düzeltilmiş $\phi_{b(C-V)}^d$ EY, aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$\phi_{b(C-V)}^d = E_f + \frac{V_d}{n} + kT. \quad (2.76)$$

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde Au/*n*-InP ve Au/*p*-TlInS₂/*n*-InP/Au:Ge Pseudo Schottky (PS) yapılarının hazırlanması için gerekli olan malzemeler, numune temizlenmesi ve imalat ile ilgili bilgiler verilecektir. Ayrıca hazırlanan PS yapılarına ait karakteristik parametrelerin elde edilmesinde kullanılan karakterizasyon teknikleri ve kullanılan cihazlarla ilgili bilgiler de bu bölümde yer almaktadır.

3.1. Numune Hazırlanması

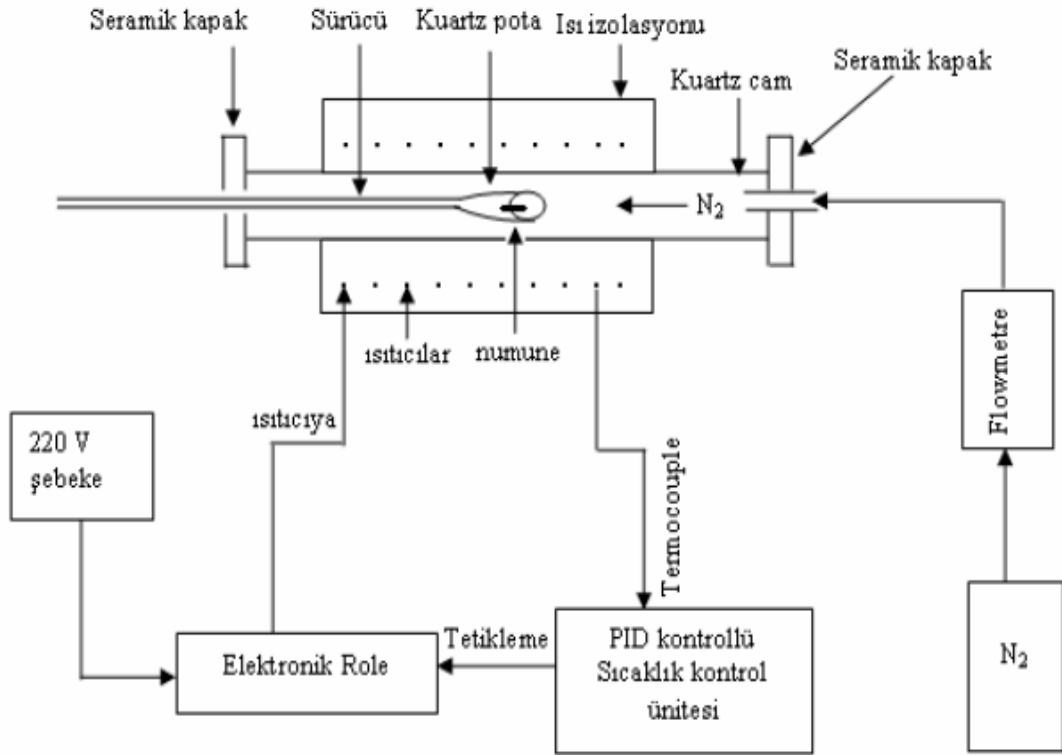
Au/*n*-InP ve Au/*p*-TlInS₂/*n*-InP PS yapıları InPact-Sumitomo Electric şirketinden alınan, S katkılı ($n=1.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) 500 μm kalınlıklı (100) yönelimli *n*-tipi InP yongası üzerinde imal edildi. 2 inç çaplı yongadan yaklaşık 16.0x8.0 mm boyutlara sahip parçalar kesildi. İdeal ve kaliteli bir diyot yapılabilmesi için kullanılacak numunenin yüzeylerinin parlak, organik ve ağır metal kirliliklerden arındırılmış olması gerektiğinden öncelikle numune yüzeyleri kimyasal dağlama işlemine tabi tutularak parlatıldıktan sonra, yüzeylerindeki organik ve ağır metal kirliliklerin uzaklaştırılması gereklidir. Temizleme işlemi sırasıyla

1. Trikloretilende ultrasonik olarak 10 dk. yıkama,
2. Asetonda ultrasonik olarak 10 dk. yıkama,
3. Metanolde ultrasonik olarak 10 dk. yıkama,
4. Deiyonize su ile iyice yıkama,
5. H₂SO₄ : H₂O₂ : H₂O (3 : 1 : 1) solüsyonunda 60 sn. bekletme,
6. Deiyonize su ile iyice yıkama,
7. HF % 49 : H₂O (1 : 10) solüsyonunda 60 sn. bekletme,
8. Deiyonize su ile iyice yıkama,
9. Azot gazı (N₂) ile kurutma,

basamakları uygulanarak gerçekleştirildi.

3.2. Omik Kontak İmalatı

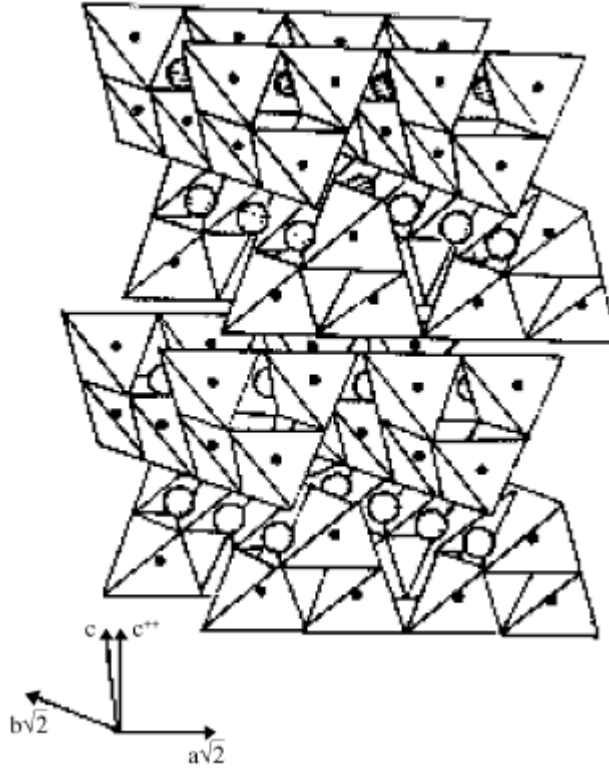
Omik kontak ve Pseudo Schottky diyot imalatı için Leybold-Heraeus Univex 300 Metal Kaplama Ünitesi (MKÜ) ve *n*-InP malzemesine omik kontak imalatında Au:Ge (%88 ve %12) alaşımı kullanıldı. Buharlaştırmada kullanılan malzemeler (pota ve tutucu) HCl (HCl+10H₂O) içerisinde temizlenip deiyonize su içerisinde durulandıktan sonra kurutuldu. Metalizasyon için MKÜ'ne yerleştirilen malzemeler (pota ve tutucu) mevcut kirliliklerinden arındırmak amacıyla pota boş iken tavlanaarak hazır hale getirilmiş oldu. Omik kontak imali için buharlaştırılacak Au:Ge alaşımını ultrasonik banyoda sırasıyla aseton, metanol, seyreltilmiş HCl ve deiyonize su ile iyice temizlenip kurutulduktan sonra potanın içine yerleştirilip alaşım eritilerek içinde bulunabilecek kirlilik atomlarından arındırılmaya çalışıldı. Bu süreç $\approx 10^{-5}$ mbar'lık vakum ortamında gerçekleştirildi. Kimyasal temizleme işlemini yaptığımız altlık kristal MKÜ içerisinde uygun yükseklikte bulunan tutucunun üzerine mat yüzeyi aşağıdaki potaya bakacak şekilde yerleştirildi. Kristalin üst yüzeyine cam lamalar konularak buharlaşan alaşımın bu yüzeyi kirliletmesi önleildi. Daha sonra, vakum seviyesinin $\approx 10^{-5}$ mbar'a düşüncüye kadar beklendi ve potaya akım verilerek kristalin mat yüzeyinin Au:Ge alaşımla kaplanması sağlandı. Ardından MKÜ'ne hava verilerek numune dışarı çıkarıldı. Şekil 3.1'de şematik olarak gösterilen tavlama fırının sıcaklığı 400°C'ye ayarlandı ve bu derecede dengeye gelene kadar beklendi. Kuartz pota içine iki adet temizlenmiş Si yonga arasında kalacak şekilde yerleştirilen numune, kuartz çubuk yardımıyla tavlama fırınının ortasına sürülerek 3 dk. süreyle tavladıktan sonra pota tavlama fırınının girişine çekilip bir süre soğumaya bırakıldı. Bu işlemler fırın içerisinde azot (N₂) gazı akışı bir flowmetre vasıtası ile kontrol edildi. Azot gazı kullanılmasındaki amaç ortamın nemlenmesini önleyerek numune üzerinde oksit tabaka oluşumunu engellemektir. Böylece, *n*-InP üzerinde omik kontak oluşturmuş oldu.



Şekil 3.1. Tavlama fırınının şeması

3.3. Pseduo Schottky Yapısı İçin Kullanılan Malzemenin Özellikleri

Schottky kontak imaline geçmeden önce omik kontağı tamamlanmış altlık ortadan ikiye bölünerek yaklaşık 8.0x8.0 mm boyutlarda altlıklar oluşturuldu. Bu altlıklardan biri üzerinde PS diyot imalatı için $n\text{-InP}$ 'tan ters tipte ($p\text{-tipi}$) $p\text{-TlInS}_2$ üçlü yarıiletken bileşiği kullanıldı. TlInS_2 , $\text{A}^3\text{B}^3\text{C}_2^6$ kimyasal formülü ile üçlü (ternary) kalkojenit yarıiletkenler grubunun bir üyesidir. TlInS_2 tek kutuplu, anizotropik ve geniş yasak enerji aralığına sahip (~ 2.50 eV) ferroelektrik bir yarıiletkendir (Müller *et al.* 1974). TlInS_2 'nin kristal yapısı, köşedeki ortak kalkojen atomlarıyla bağlanmış In_4S_{10} kompleksleriyle oluşan metal-kalkojen tabakalarıyla karakterize edilir. Bu bileşiğin kristal yapısı Şekil 3.2'de verilmiştir (Mikailov *et al.* 2003).



Şekil 3.2.Üçlü TlInS₂yarıiletken bileşiğinin kristal yapısı (Mikailov *et al.* 2003)

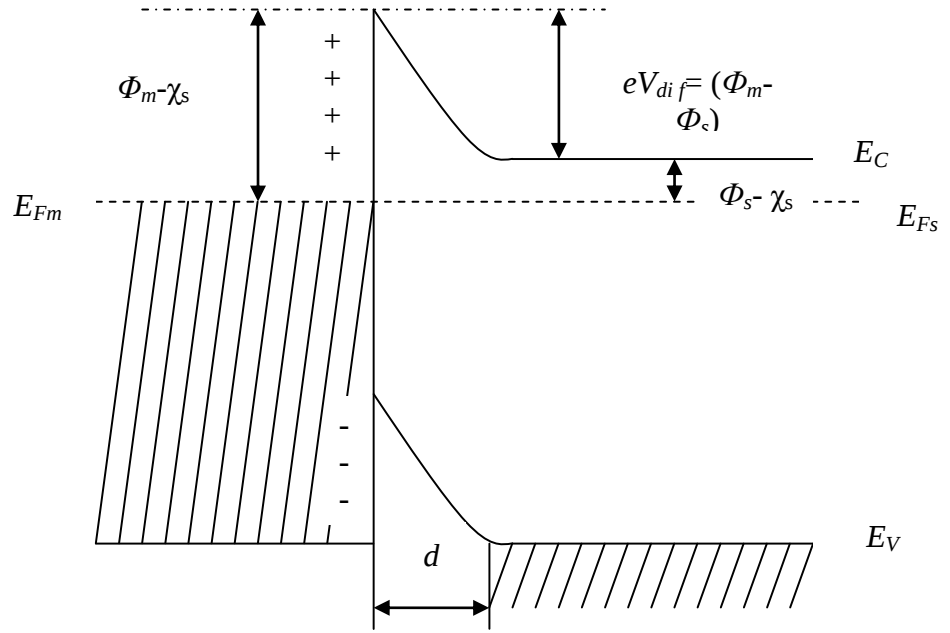
InP alltaşın PS kontak oluşturulacak parlak yüzeyi HF:H₂O (1:9) solüsyonunda 30 saniye yüzdürülmek suretiyle tekrar dağlandıktan sonra deiyonize suyla tekrar tekrar durulanıp N₂ gazı akışında kurutuldu. Kimyasal temizleme işlemini yaptığımız altlık MKÜ içerisinde uygun yükseklikte bulunan tutucunun üzerine parlak yüzeyi potaya bakacak şekilde yerleştirildi. Altlığın üzerine cam lamalar koyarak buharlaşan bileşiğin omik kontak yapılan yüzeyi kirletilmesi önleildi. Daha sonra, vakum seviyesi $\approx 10^{-5}$ mbar'a düşünceye kadar beklendi ve MKÜ'deki potaya akım verilerek altlığın parlak yüzeyi üzerine p-TlInS₂ bileşiği biriktirildi. Ardından MKÜ'ne hava verilerek numune dışarı çıkartıldı. Belirli N₂ gazı akış rejiminde tavlama fırın sıcaklığı 200°C'ye ayarlandı ve bu sıcaklıkta dengeye gelinceye kadar beklendi. İki adet temizlenmiş Si yonga arasında kalacak şekilde yerleştirdiğimiz numune kuartz pota içine yerleştirildikten sonra kuartz çubuk yardımıyla tavlama fırınının ortasına yerleştirildi. 3 dk. süreyle tavlama işlemine tabii tutulan numune pota ile beraber tavlama fırınının girişine yakın

bölgeye çekilip N₂ gazı akışında soğumaya bırakıldı. Bu işlem, *p*-TlInS₂ tabakasının *n*-InP altlık yüzeyine difüze olup tutunması için yapıldı.

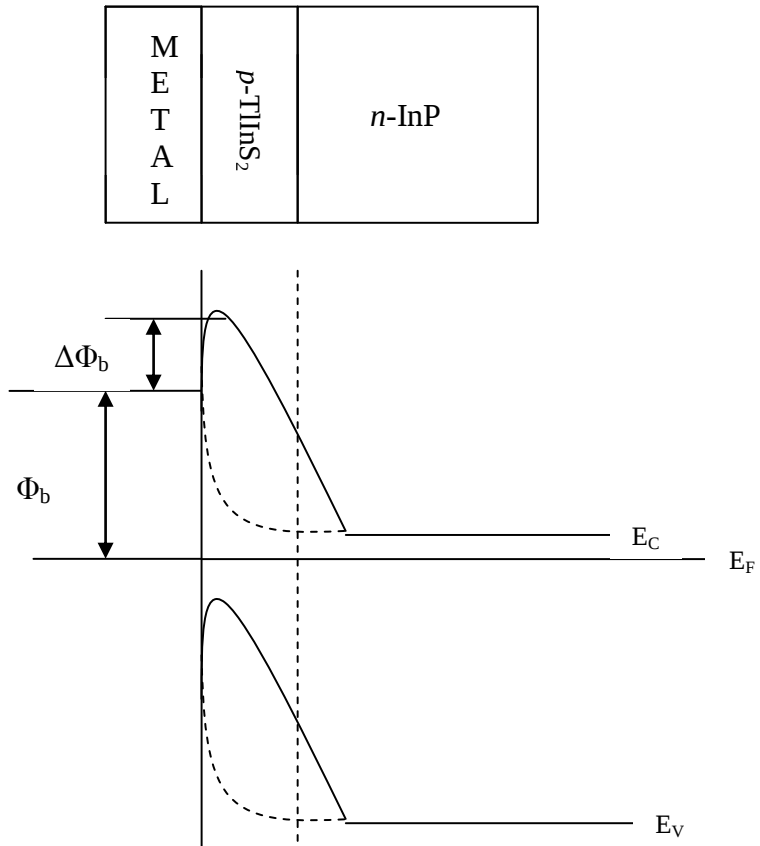
3.4. Schottky Kontak İmalatı

Referans Au/*n*-InP ve Au/*p*-TlInS₂/*n*-InP PS yapılarının imali için omik kontak işlemi tamamlanmış referans ve TlInS₂ filmi kaplı altlıklar 0.6 mm çapında dairesel boşluklara sahip molibden maske üzerine, parlak ve TlInS₂ film kaplı yüzeyler aşağıya doğru bakacak şekilde maskenin tam üzerine yerleştirilen altaşlar üzerine cam lam konulmak suretiyle ile sabitlendi. Aynı zamanda, bu işlem ile üste kalan omik kontak imalatı yapılmış yüzeylerin korunması da gerçekleştirilmiş oldu. Ardından ve MKÜ'nin cam fanusu kapatılarak sistem vakuma alındı. MKÜ'nin içerisinde basınç $\approx 10^{-5}$ mbar değerine gelince, ısıtıcıya akım verildi. Au metali, ısınan ısıtıcı sayesinde buharlaştırılarak altlık yüzeyinde dairesel noktalar şeklinde Schottky (Doğrultucu) kontaklar elde edildi. Böylece Au/*n*-InP ve Au/*p*-TlInS₂/*n*-InP PS yapılarını oluşturulmuş oldu.

(Bu işlemlerden önce omik kontak imalatında icra edilen işlemler tekrarlandı: Buharlaştırmada kullanılan malzemeler (pota ve tutucu) HCl (HCl+10H₂O) içerisinde temizlenip deiyonize su içerisinde durulandıktan sonra kurutuldu. Metalizasyon için MKÜ'ne yerleştirilen malzemeler (pota ve tutucu) mevcut kirliliklerinden arındırmak amacıyla pota boş iken tavlansak hazır hale getirilmiş oldu. Schottky kontak imali için buharlaştırılacak 3N8 saflıktaki Au metali ultrasonik banyoda sırasıyla aseton, metanol, seyreltilmiş HCl ve deiyonize su ile iyice temizlenip N₂ gazı akışında kurutulduktan sonra potanın içine yerleştirilip Au metali eritilerek içinde bulunabilecek kirlilik atomlarından arındırılmaya çalışıldı).



Şekil 3.3. Metal/*n*-yarıiletken diyotun enerji bant diyagramı



Şekil 3.4. Pseudo-Schottky diyot yapısının enerji bant diyagramı (Talazac *et al.* 2002)

3.5. Deney ve Ölçüm Sistemi

Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapılarının Akım-Voltaj (*I-V*) ve Kapasite-Voltaj (*C-V*) karakterizasyonu için bilgisayar kontrolünde çalışan KEITLEY 487 Picoammeter/Voltage Source ve HP 4192A LF Impedance Analyzer sistemleri kullanıldı. Sıcaklığa bağlı ölçümlerde $\pm 0,1$ K hassasiyete sahip Lake Shore 331 sıcaklık kontrol ünitesi ile kontrol edilen ARS HC-2 kapalı devre Helyum (He) kryostatı kullanıldı.



Şekil 3.5. Numunelerin *I-V* ve *C-V* karakterizasyonunda kullanılan bilgisayar kontrolünde çalışan KEITLEY 487 Picoammeter/Voltage Source, HP 4192A LF Impedance Analyzer ve Lake Shore 331 sıcaklık kontrol ünitesi ile kontrol edilen ARS HC-2 kapalı devre Helyum (He) kryostatı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

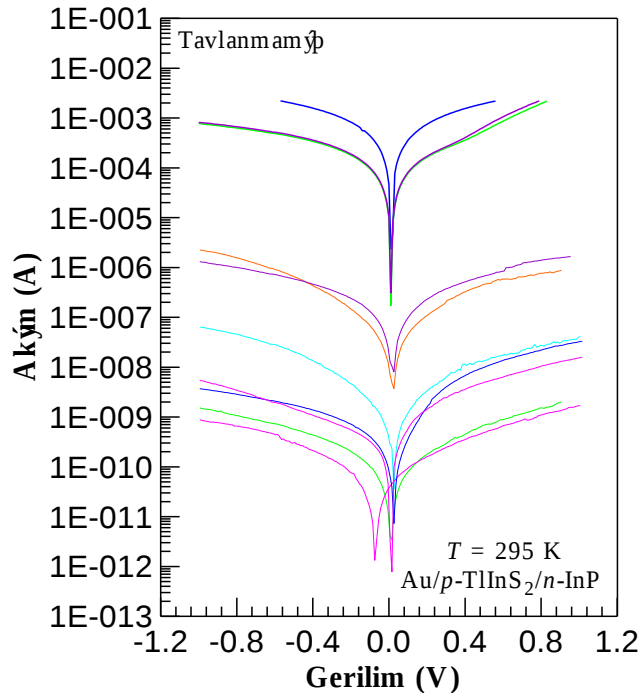
4.1. Giriş

Bu bölümde, bir önceki bölümde ayrıntıları verilen işlem basamakları takip edilerek hazırlanan $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ Pseudo Schottky (PS) yapılarının sıcaklığa bağlı akım-voltaj (I - V) ve kapasite-voltaj (C - V) karakteristiklerinin, ikinci bölümde verilen teorilerin ışığı altında, detaylı olarak değerlendirilmesine yer verilmiştir. Ayrıca, elde edilen temel diyot parametrelerinin tavlama ve numune sıcaklığına bağlı değişimlerinin analizi, sonuçların değerlendirilmesi ve irdelenmesi de bu bölümde sunulmaktadır.

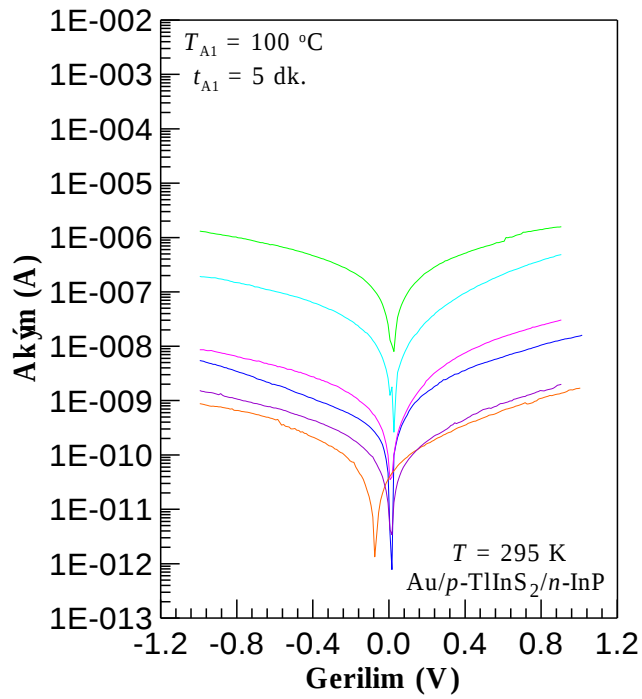
4.2. Tavlamanmadan Önce ve Sonra Oda sıcaklığında Ölçülen Akım-Gerilim (I - V) Karakteristikleri ile Schottky Diyot Parametrelerinin Hesaplanması

Şekil 4.1’de tavlamanmamış (referans) $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS yapıların oda sıcaklığındaki I - V karakteristikleri verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere yapılar omik özellik gösterdiği için diyot parametrelerinin hesaplanması yapılmadan tavlama işlemi uygulanmıştır. Tavlama, MY yapılarda kasıtlı olarak ya da istenmeden oluşturulan ara yüzeyin kararsızlığını gidermek için uygulanan bir ısıtım işlemidir. Karakterizasyon işlemlerinin tamamı tavlama işlemi üzerinden 24 saat geçtikten sonra icra edilmiştir.

Tavlama işlemi, kümülatif olarak üst üste icra edilmiştir. $T_{A1}=100^\circ\text{C}$ tavlama işleminin $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS yapısının I - V karakteristiklerinde herhangi bir değişikliğe neden olmadığı, yani incelenen yapıların halâ omik özellik gösterdiği gözlenmiştir (Şekil 4.2). Bu yüzden, tavlama sıcaklığı/süresi değiştirilerek $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS yapılarının I - V ve C - V karakteristikleri oda sıcaklığında ve ardından düşük sıcaklıklarda 10 K adımlarla (80-360 K) sıcaklığa bağlı olarak ayrı ayrı incelendi.

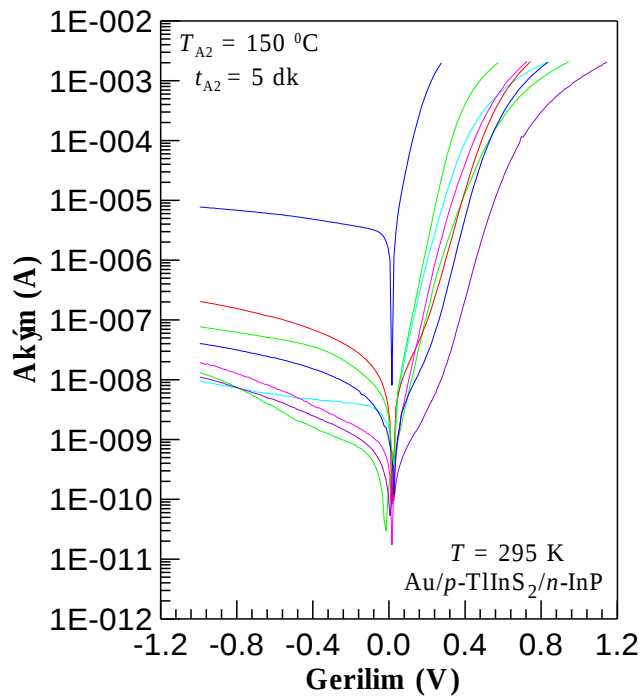


Şekil 4.1. Tavlama yapılmamış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS Schottky diyotların bir kaçı için oda sıcaklığındaki tipik $I - V$ karakteristikleri

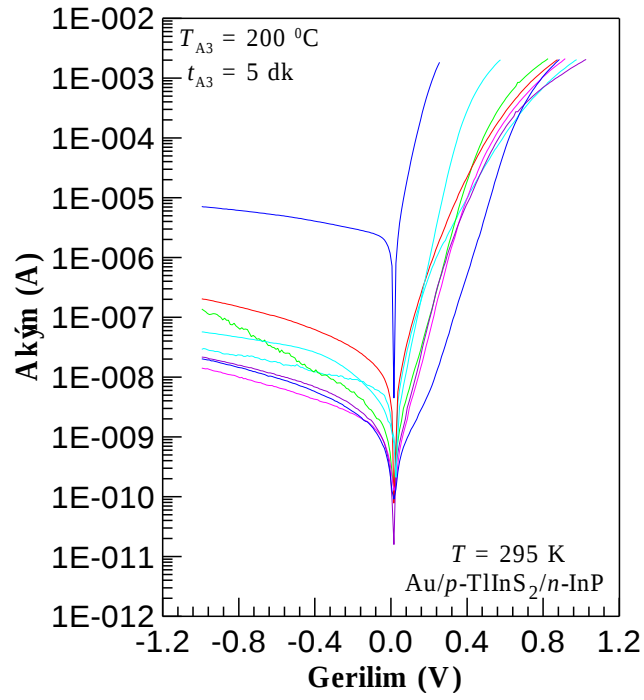


Şekil 4.2. T_{A1} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS Schottky yapılarının bir kaçı için oda sıcaklığındaki tipik $I - V$ karakteristikleri

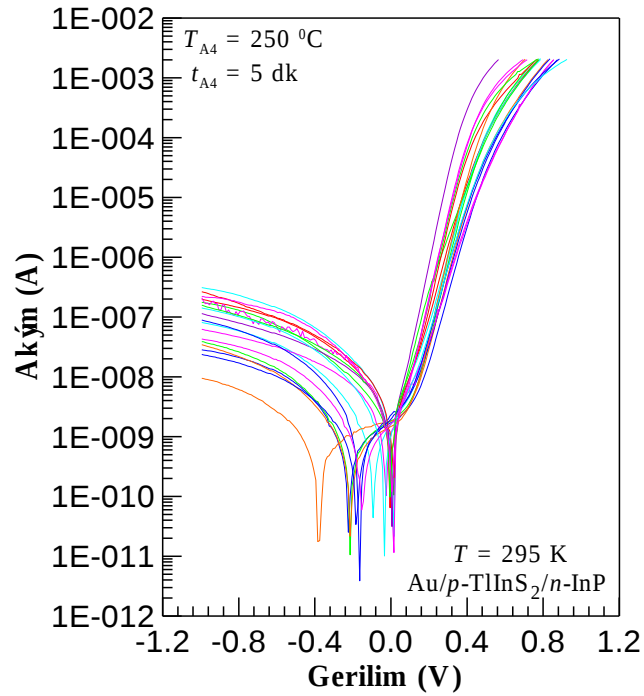
Şekil 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6’da $T_{A2}=150^{\circ}\text{C}$, $T_{A3}=200^{\circ}\text{C}$, $T_{A4}=250^{\circ}\text{C}$ ve $T_{A5}=300^{\circ}\text{C}$ tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS yapılarının oda sıcaklığındaki $I-V$ karakteristikleri toplu olarak verilmiştir. Şekil 4.7’de ise tavlınmamış, $T_{A1}=100^{\circ}\text{C}$, $T_{A2}=150^{\circ}\text{C}$, $T_{A3}=200^{\circ}\text{C}$, $T_{A4}=250^{\circ}\text{C}$ ve $T_{A5}=300^{\circ}\text{C}$ tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS yapılarından biri (D6) için oda sıcaklığındaki $I-V$ karakteristiklerine yer verilmiştir.



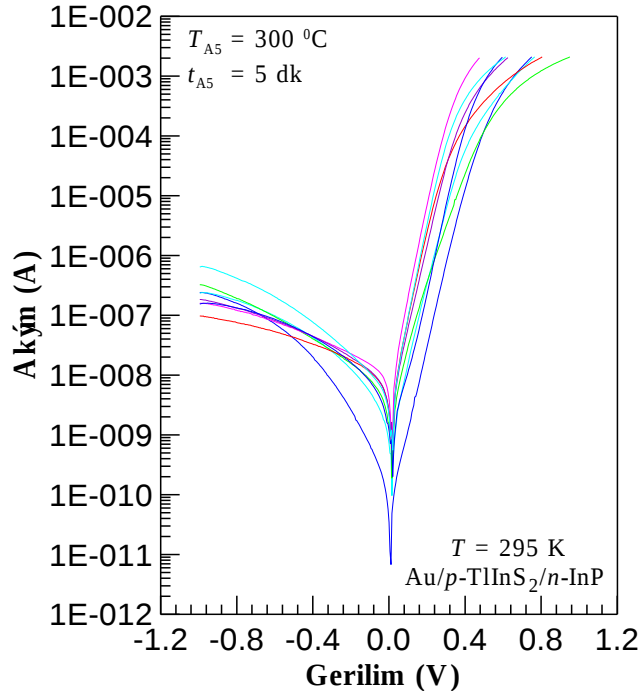
Şekil 4.3. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS Schottky yapılarının bir kaçısı için oda sıcaklığındaki tipik $I-V$ karakteristikleri



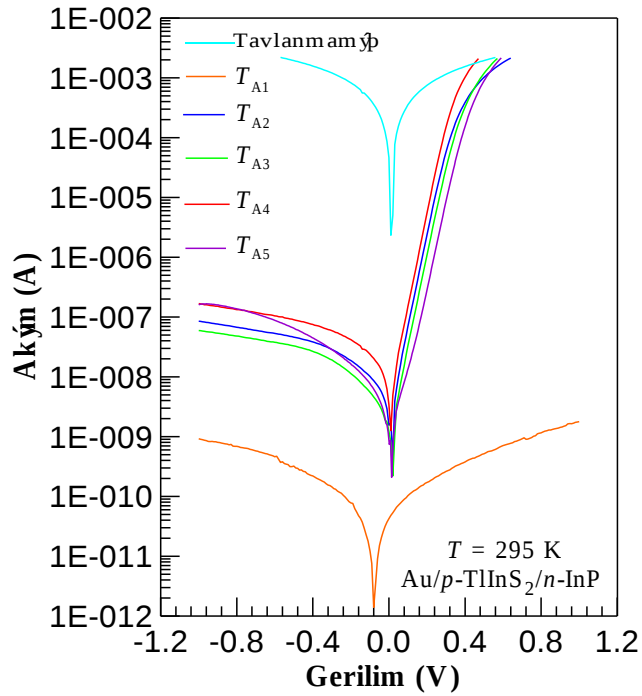
Şekil 4.4. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS Schottky yapıların bir kaçı için oda sıcaklığındaki tipik $I-V$ karakteristikleri



Şekil 4.5. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS Schottky yapıların bir kaçı için oda sıcaklığındaki tipik $I-V$ karakteristikleri



Şekil 4.6. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS Schottky yapıların bir kaçı için oda sıcaklığındaki tipik $I - V$ karakteristikleri

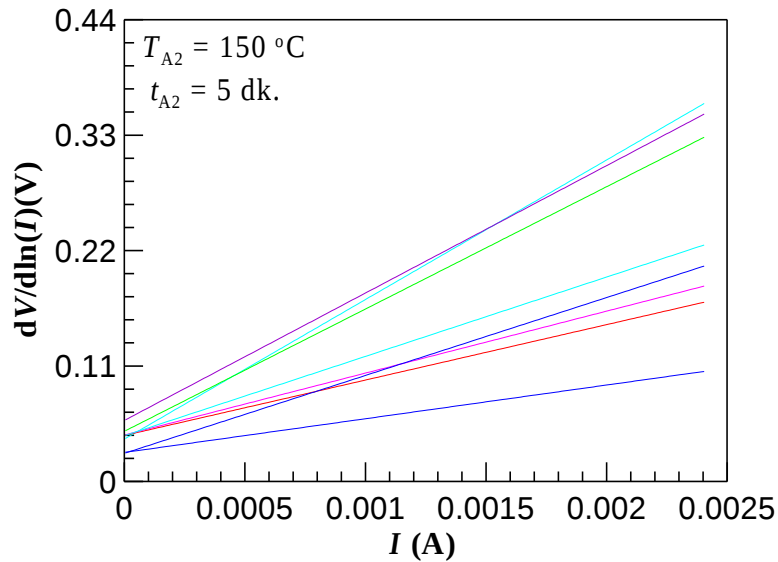


Şekil 4.7. Tavlanmamış, T_{A1} , T_{A2} , T_{A3} , T_{A4} ve T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapılarından birinin (D6) oda sıcaklığındaki $I - V$ karakteristikleri

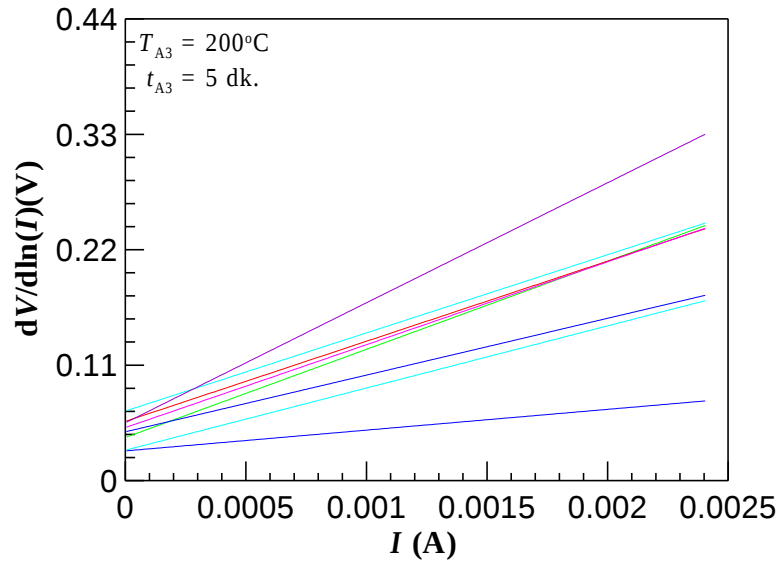
Şekil 4.7'den görüldüğü gibi, $I - V$ karakteristiğinin doğru beslem tarafı uygulama geriliminin büyük değerlerinde lineerlikten sapma göstermektedir. Bu durum, ilk olarak seri direnç (R_s) etkisini akla getirir. Seri direnç etkisinin detaylı incelemesi Cheung and Cheung (1986) tarafından teklif edilen yöntem kullanılarak icra edildi.

4.3. Cheung Fonksiyonları ile Diyot Parametrelerinin Hesaplanması

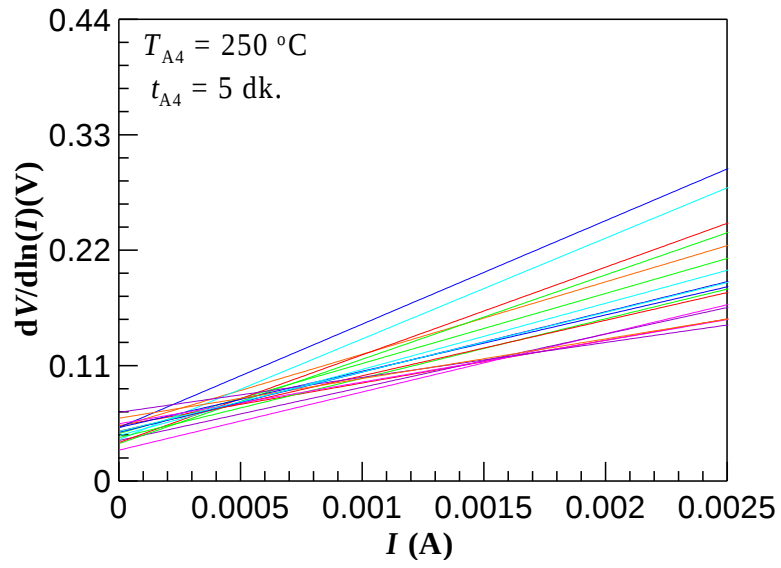
$I - V$ karakteristiklerinin doğru beslem tarafını göz önünde bulundurularak elde edilen Cheung çizimlerinden (2.52), (2.54) ve (2.55) yardımı ile idealite faktörü (n), seri direnç (R_s) ve EY (ϕ) değerleri elde edildi. İmal edilen Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapılarına ait $dV/d(\ln I) - I$ ve $H(I) - I$ değişimleri sırası ile Şekil 4.8-11 ve Şekil 4.12-15'de verilmiştir. Farklı sıcaklıklarda tavllanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapıları için oda sıcaklığındaki düz beslem $I - V$ karakteristiklerinden geleneksel yöntemle ve Cheung fonksiyonları kullanılarak elde edilen idealite faktörü, engel yüksekliği, homojen engel yüksekliği, seri direnç, ortalama engel yüksekliği ve onların standart sapmaları, Çizelge 4.1'de verilmiştir.



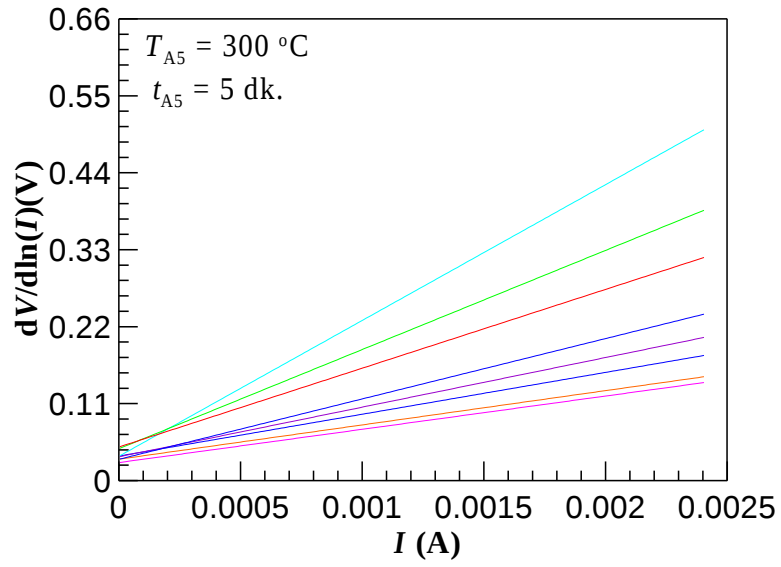
Şekil 4.8. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapıların oda sıcaklığındaki $dV/d(\ln I) - I$ çizimleri



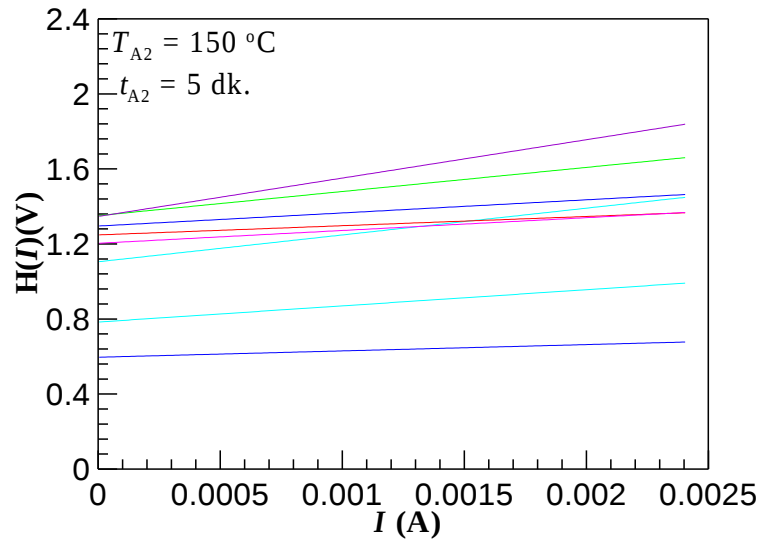
Şekil 4.9. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/n\text{-InP}$ PS yapıların oda sıcaklığındaki $dV/d(\ln I) - I$ çizimleri



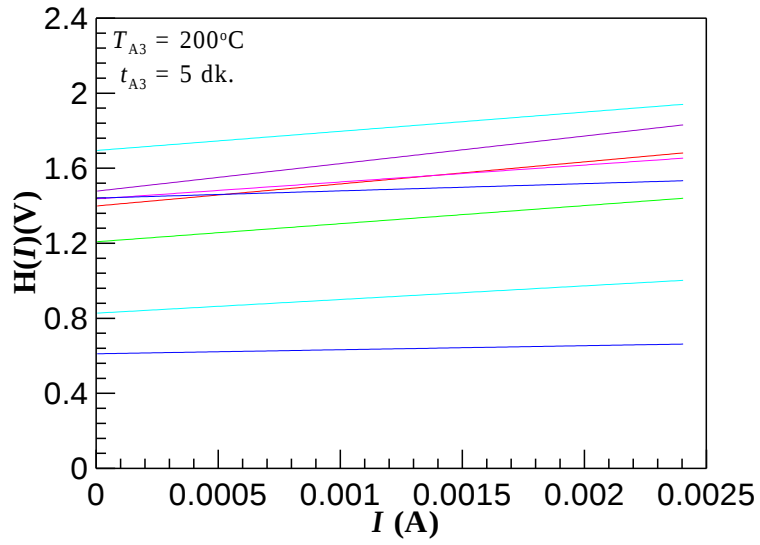
Şekil 4.10. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/n\text{-InP}$ PS yapıların oda sıcaklığındaki $dV/d(\ln I) - I$ çizimleri



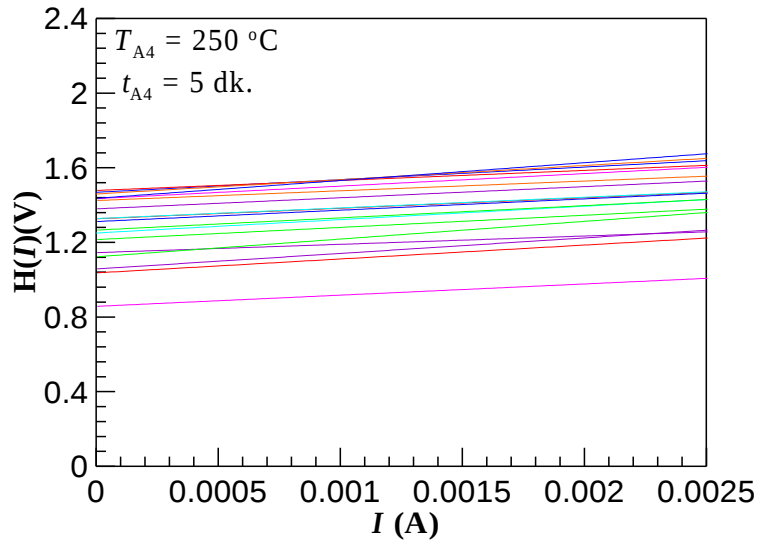
Şekil 4.11. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au}/p\text{-TlInS}_2/n\text{-InP}$ PS yapıların oda sıcaklığındaki $dV/d(\ln I) - I$ çizimleri



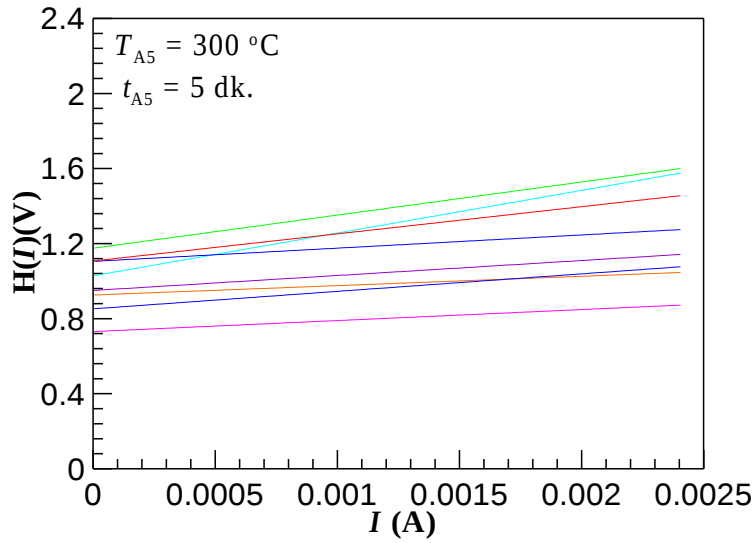
Şekil 4.12. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au}/p\text{-TlInS}_2/n\text{-InP}$ PS yapıların oda sıcaklığındaki $H(I) - I$ çizimleri



Şekil 4.13. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/n\text{-InP}$ PS yapıların oda sıcaklığındaki $H(I) - I$ çizimleri



Şekil 4.14. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/n\text{-InP}$ PS yapıların oda sıcaklığındaki $H(I) - I$ çizimleri



Şekil 4.15. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS yapılarının oda sıcaklığındaki $H(I) - I$ çizimleri

Çizelge 4.1. $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS yapıları için, idealite faktörü, engel yüksekliği, homojen engel yüksekliği, seri direnç, ortalama engel yüksekliği ve engel yüksekliğinin standart sapmaları

Au/p-TlInS ₂ /n-InP			T_{A2}	T_{A3}	T_{A4}	T_{A5}
	I - V	n	1.056-1.530	1.088-1.890	1.063-1.699	1.042-1.232
		ϕ (eV)	0.541-0.850	0.682-0.893	0.730-0.788	0.688-0.795
		$\bar{\phi}$ (eV)	0.733±0.084	0.818±0.070	0.758±0.017	0.727±0.032
		ϕ_{hom} (eV)	-	0.776	0.780	0.789
	dV/d(lnI)	n	1.109-1.940	1.101-2.190	1.100-2.089	1.080-1.715
		R_s (Ω)	32.15-154.66	60.98-180.27	45.97-96.00	47.54-194.14
	H(I) - I	$\bar{\phi}$ (eV)	0.655-0.796	0.648-0.812	0.696-0.736	0.650-0.768
		R_s (Ω)	33.70-204.42	64.93-182.79	47.29-94.75	49.92-208.56

TE teorisine göre $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS yapıların geleneksel yolla hesaplanan (yarı-logaritmik I -V çizimlerinden) engel yüksekliklerine karşı nidealite faktörlerinin değişimlerinin yer aldığı çizimlere (Şekil 4.16-18) bakıldığında, deneysel EY ve idealite faktörü değerlerinin diyottan diyota değiştiği görülmektedir. Bununla birlikte, EY ve idealite faktörleri arasında lineer ve ters bir ilişki mevcuttur. Yani, idealite faktörü

artarken EY azalmakta veya idealite faktörü azalırken EY artmaktadır. Bu durum engel yüksekliğinin inhomojenliği ile açıklanabilir (Tung 2001; Huang and Fang 2006, Asubay *et al.* 2008, Akkılıç *et al.* 2004). Songet *et al.* (1986) engel inhomojenliğini, arayüzey yüklerine ve arayüzey tabaka kalınlığının düzgün olmayışına atfetmişlerdir (Werner and Güttler 1991; Chand and Kumar 1997; Zhu *et al.* 2000; Doğan 2006).

İmaj kuvvet etkisine bağlı olarak potansiyel engel düşmesi

$$\Delta\varphi_{imf} = \left[\left(\frac{q^3 N_d}{8\pi^2 \epsilon_s^3} \right) \left(\varphi_b - V - \xi - \frac{kT}{q} \right) \right]^{1/4} \quad (4.1)$$

eşitliği ile verilir (Rhoderick 1988). Burada,

$$\xi = (kT/q) [\ln(N_c / N_d)] \quad (4.2)$$

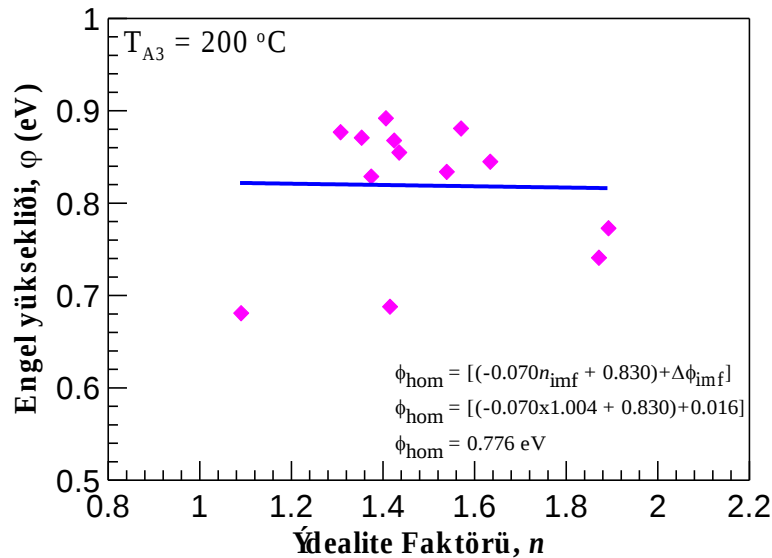
şeklinde ifade edilir (Rhoderick 1988; Wittmer 1990). İdealite faktörü ise,

$$\frac{1}{n_{imf}} = 1 - \frac{1}{4} \left(\frac{q^3 N_d}{8\pi^2 \epsilon_s^3} \right)^{1/4} \left(\varphi_b - V - \xi - \frac{kT}{q} \right) \quad (4.3)$$

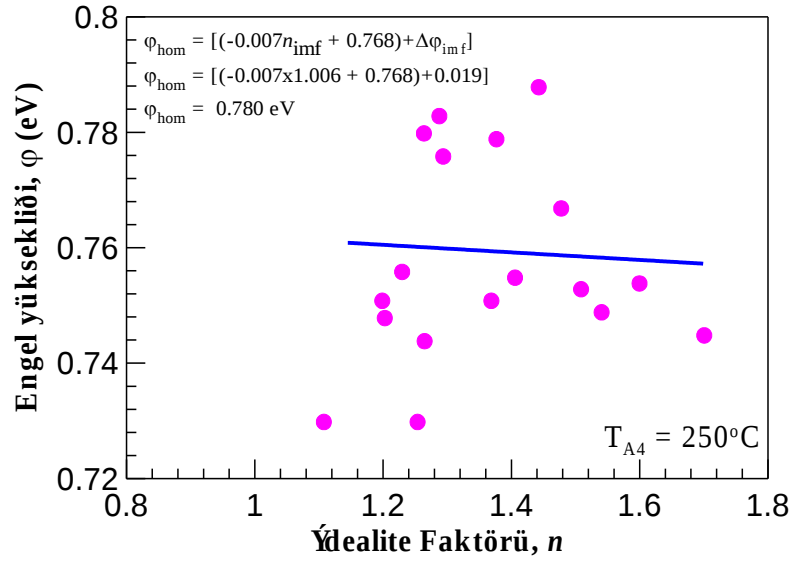
olarak verilir (Wittmer 1990). (4.1) ve (4.3) eşitlikleri kullanılarak, imal edilen Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapılarına ait imaj kuvvet etkisi parametreleri T_{A3} tavlama işlemi ardından $\Delta\varphi_{imf} = 0.016$ eV ve $n_{imf} = 1.004$, T_{A4} işlemi ardından $\Delta\varphi_{imf} = 0.019$ eV ve $n_{imf} = 1.006$, T_{A5} işlemi ardından $\Delta\varphi_{imf} = 0.022$ eV ve $n_{imf} = 1.006$ olarak hesaplandı. Böylece, Şekil 4.15’de deneysel verilere fit edilen doğrunun $n_{imf} = 1.004$ değerine ekstrapolasyonu ile homojen EY, $\varphi_{hom} = 0.776$ eV, Şekil 4.16’da deneysel verilere fit edilen doğrunun $n_{imf} = 1.006$ değerine ekstrapolasyonu ile de homojen EY $\varphi_{hom} = 0.780$

eV, Şekil 4.17’de deneysel verilere fit edilen doğrunun $n_{\text{imf}} = 1.006$ değerine ekstrapolasyonu ile de homojen EY $\phi_{\text{hom}} = 0.789$ eV olarak elde edildi.

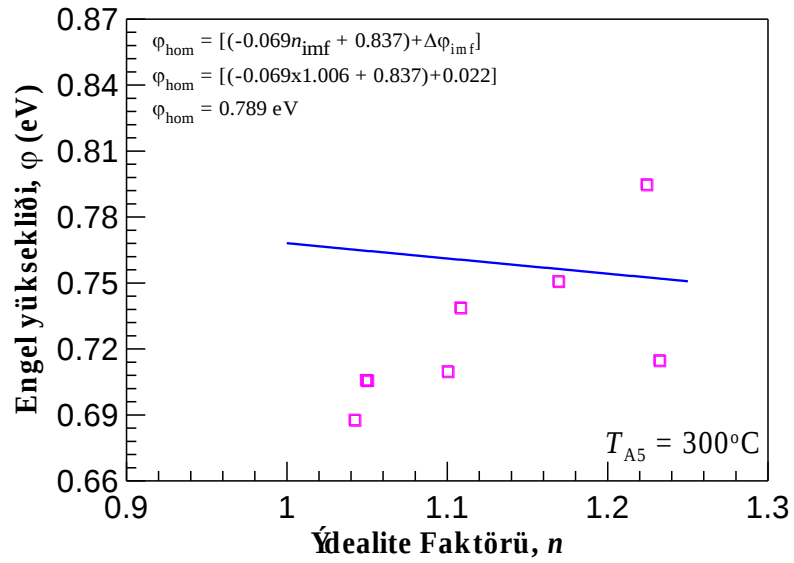
n idealite faktörü ve EY, ortalama idealite faktörü $\langle n \rangle$ ve ortalama EY $\langle \phi_b \rangle$ ve bunların standart sapmaları σ_n ve σ_ϕ olan Gauss Dağılım Fonksiyonu (GDF) ile temsil edilebilir (Werner and Güttler, 1991). İmal edilen Au/p-TlInS₂/n-InP PS diyotlarının doğru beslem $I - V$ karakteristikleri engel inhomojenliği üzerine geliştirilen Gaussian dağılıma sahip EY modeli kullanılarak irdelendi. İmal edilen diyotlarda T_{A2}, T_{A3}, T_{A4} ve T_{A5} tavlama işlemleri ardından Gaussian dağılıma sahip EY yaklaşımı sonucunda idealite faktörü ve EY değerlerinin ortalama değerleri sırasıyla 1.265 ± 0.172 ; 0.733 ± 0.084 eV; 1.483 ± 0.212 ; 0.819 ± 0.070 eV, 1.360 ± 0.153 ; 0.758 ± 0.017 eV, 1.122 ± 0.073 ; 0.727 ± 0.032 eV olarak elde edildi. Bu sonuçlardan $\bar{\phi}_{\text{hom}}$ değerlerinin ortalama EY ($\bar{\phi}_b$) değerleri ile uyum içerisinde olduğu söylenebilir. Bu durum, Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapılarının EY’deki inhomojenitenin yanal dağılımlı EY kavramı ile tasvir edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 4.16. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapılarında engel yüksekliğine karşı idealite faktörü değerlerinin değişimi



Şekil 4.17. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapılarında engel yüksekliğine karşı idealite faktörü değerlerinin değişimi



Şekil 4.18. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapılarında engel yüksekliğine karşı idealite faktörü değerlerinin değişimi

4.4. Tavlardan Önce ve Sonra Oda sıcaklığında Ölçülen Ters Beslem Kapasite-Gerilim (C-V) Karakteristikleri ile Schottky Diyot Parametrelerinin Hesaplanması

Schottky diyotlarda uzay yükü bölgesinin kapasitesi, MY arayüzeyinin oluşumu hakkında önemli bilgiler vermektedir. Kapasitenin ters beslem durumunda gerilime

bağlı değişiminden; doğrultucu kontağın EY, yarıiletkendeki donör konsantrasyonu, difüzyon potansiyeli ve Fermi enerji seviyesi gibi parametreler tayin edilebilir. Hazırlanan Au/p-TlInS₂/n-InP PS diyotlarının ters beslemC-V ölçümleri oda sıcaklığında, 5 MHz çalışma frekansında ve -1.00-0.00 V aralığında alındı.

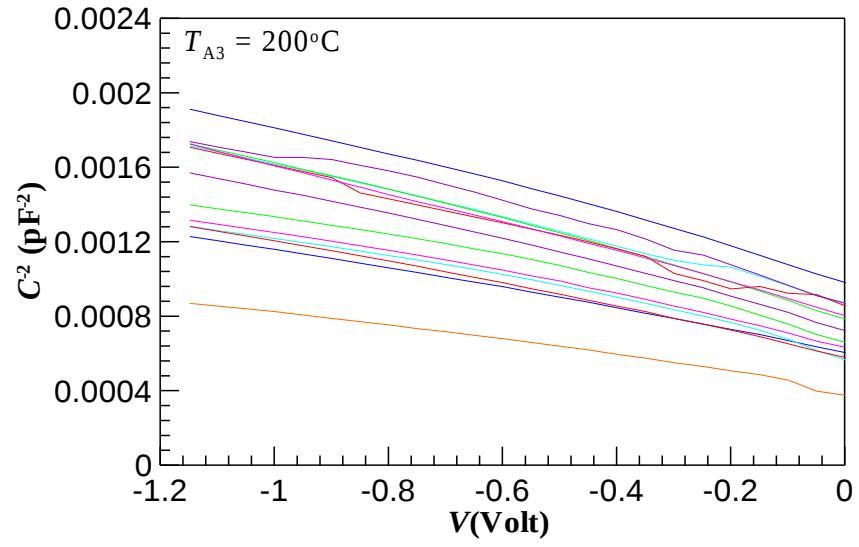
Bir Schottky diyot için C – V karakteristiğinden elde edilecek EY(2.75) ifadesi ile verilir (Rhoderick 1988):

$$\phi_{b(C-V)} = E_f + V_d + kT. \quad (4.4)$$

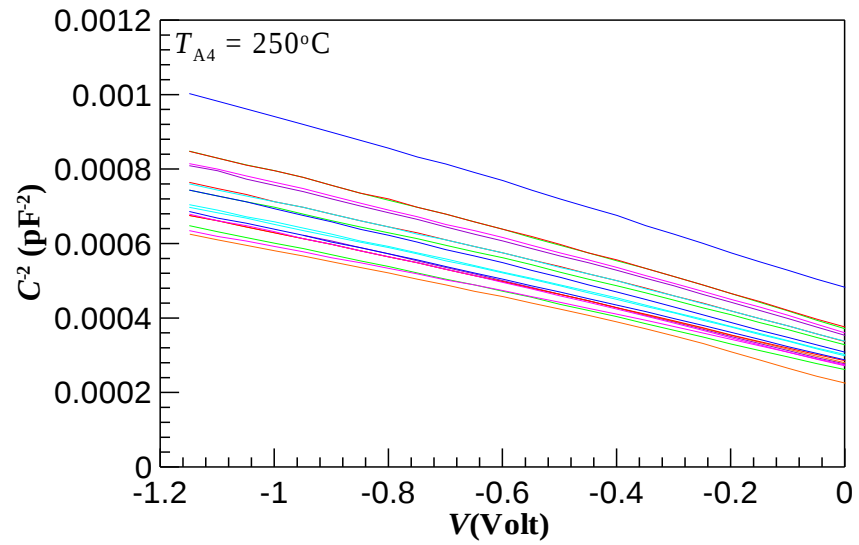
Bu ifade ideal durum için geçerlidir, ideal olmayan durum için düzeltilmiş $\phi_{b(C-V)}^d$ EY, eşitlik (2.76) ile verildiği gibi

$$\phi_{b(C-V)}^d = E_f + \frac{V_d}{n} + kT \quad (4.5)$$

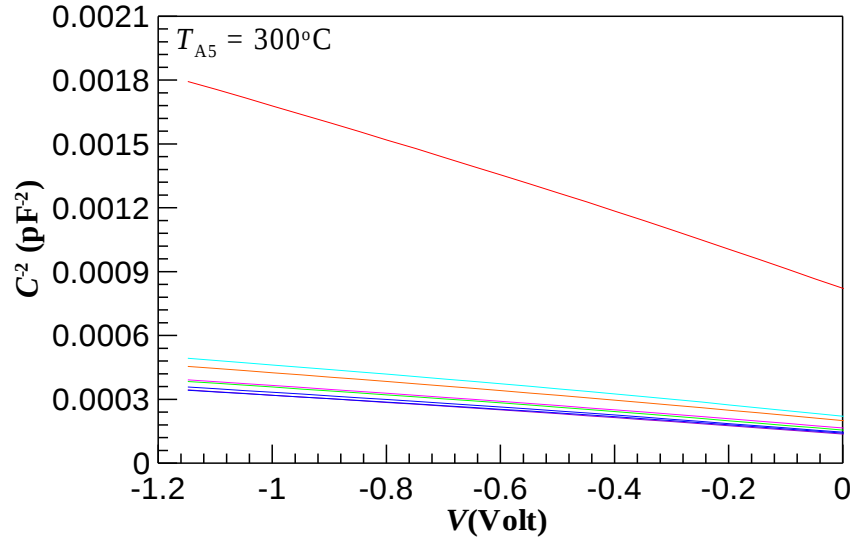
şeklindedir. $T_{A3}=200$, $T_{A4}=250$ ve $T_{A5}=300^\circ\text{C}$ tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapılarına ait $C^{-2} - V$ değişimleri sırasıyla Şekil 4.19-21’de verilmiştir. Bu çizimlerden görüldüğü gibi $C^{-2} - V$ çizimleri hemen hemen lineer olarak değişmektedirler ve bir doğru ile fit edilebilirler: Fit doğrularının kesim noktası ve eğimlerinden V_d ve N_d değerleri elde edildi. Ardından, bu değerler (4.5) denkleminde yerine konularak $\phi_{b(C-V)}^d$ EY hesaplandı. Farklı tavlama işlemi uygulanan Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapıları içinC-V karakteristiklerinden elde edilen diyot parametreleri $\phi_{b(C-V)}^d$, E_f , N_d , N_c ve V_d değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.



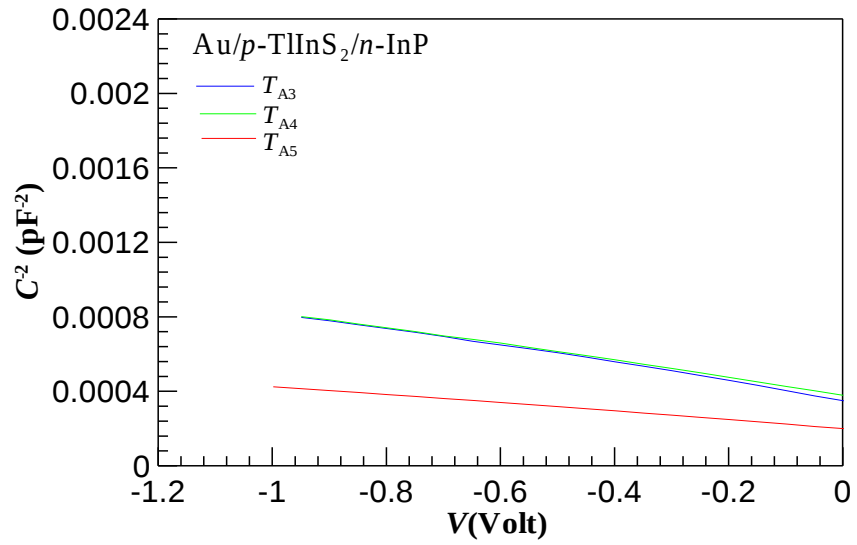
Şekil 4.19. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/n\text{-InP}$ PS yapıların oda sıcaklığındaki $C^{-2} - V$ değişimleri



Şekil 4.20. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/n\text{-InP}$ PS yapıların oda sıcaklığındaki $C^{-2} - V$ değişimleri



Şekil 4.21. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/n\text{-InP}$ PS yapıların oda sıcaklığındaki $C^{-2} - V$ değişimleri



Şekil 4.22. T_{A3} , T_{A4} ve T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/n\text{-InP}$ PS yapılarından birinin (D6) oda sıcaklığındaki $C^{-2} - V$ değişimleri

Çizelge 4.2. T_{A3} , T_{A4} ve T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS yapıları için $C-V$ ölçümlerinden elde edilen $\phi_{b(C-V)}^d$, E_f , V_d , N_c ve N_d değerleri ($f=5$ MHz)

Au/p-TlInS ₂ /n-InP	Tavlama kodu →		T_{A3}	T_{A4}	T_{A5}
	C-V Karakterizasyon	E_f (eV)	0.129-0.150	0.124-0.129	0.105-0.147
		V_d (V)	0.896-0.983	0.763-0.992	0.888-0.986
		$\phi_{b(C-V)}^d$ (eV)	0.683-0.999	0.686-0.911	0.708-0.997
		N_d ($\times 10^{15}$) (cm^{-3})	1.440 -2.304	2.930-4.039	1.661-8.730
		N_c ($\times 10^{17}$) (cm^{-3})	5.333	5.333	5.333

Şekil 4.22’de (D6) diyotu için verilen tipik $C^{-2} - V$ çiziminden görüldüğü gibi-1.00-0.00 V aralığında uygulama voltajına bağlı olarak hemen hemen lineer bir değişim mevcuttur. Bu durum, diyotun keskin bir engel kenarına sahip olduğunu belirtir. Diğer taraftan, ölçüm frekansında ara yüzey hallerinin uygulanan AC sinyali takip edemediği ve bu hallerin kapasiteye katkısının ihmal edilecek derecede küçük olduğu anlamına gelir. Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’den görüldüğü gibi, $C-V$ ölçümlerinden elde edilen EY değerleri $I-V$ ölçümlerinden elde edilen EY değerlerinden daha büyüktür. Bu durum, metal-yarıiletken arasında oluşturulan ara yüzey tabakasının kalınlığına, ara yüzey hallerinin dağılımına ve yoğunluğuna atfedilebilir. Ayrıca $I-V$ ve $C-V$ ölçüm tekniklerinin doğasının farklılığından kaynaklanabilir.

4.5. Tavlanmadan Önce ve Sonra Sıcaklığa Bağlı Ölçülen Akım-Gerilim ($I-V$) Karakteristikleri ile Schottky Diyot Parametrelerinin Hesaplanması

Hazırlanan $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS diyotlarının $I-V$ karakteristikleri bilgisayar kontrolünde çalışan KEITLEY 487 Picoammeter/Voltage Source cihazı ile kaydedildi. Sıcaklığa bağlı ölçümlerde ARS HC-2 kapalı devre Helyum (He) kryostatı kullanıldı. Numune sıcaklığı Lake Shore 331 sıcaklık kontrol ünitesi yardımı ile $\pm 0,1$ Kelvin hassasiyetle kontrol edildi. TE teorisine göre, bir Schottky diyotun

doğru beslem akımı uygulanan potansiyele bağlı olarak (2.23) ifadesi ile verilir. Bu ifade kullanılarak elde edilen idealite faktörü (2.25) ifadesi ile verildiği üzere,

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d \ln I} \right) \quad (4.6)$$

şeklindedir. Doğru beslem I - V karakteristikleri kullanılarak elde edilen n , diyotun ideallikten ayrıldığını gösteren boyutsuz bir parametredir. İdeal bir diyot için n değeri $n=1$ olarak verilir. n değeri 1'den uzaklaştıkça diyot ideal olmayan bir davranış sergiler.

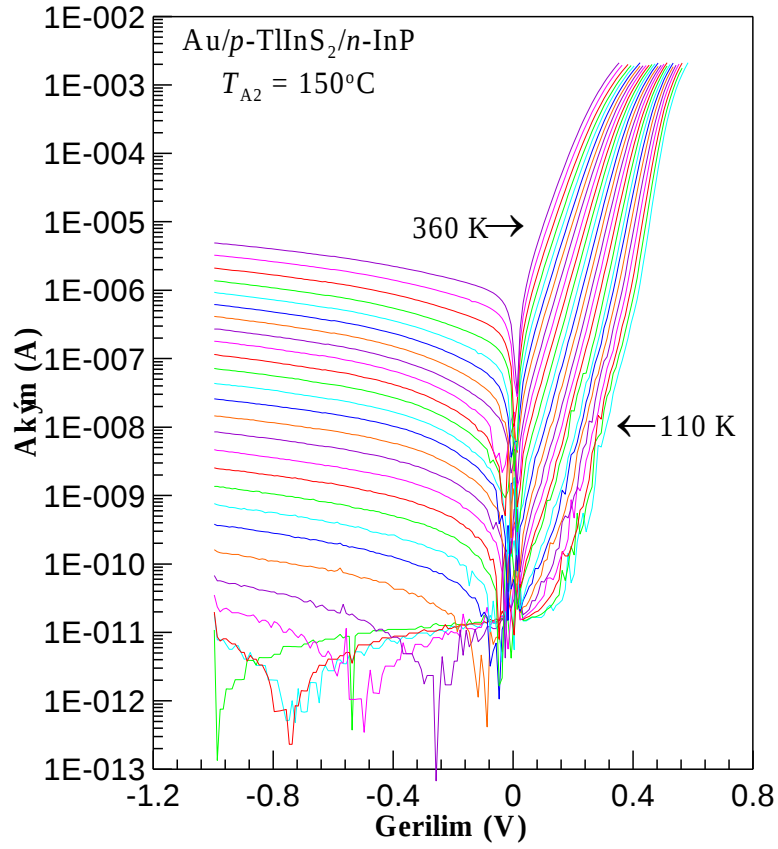
Doğru beslem $\ln(I-V)$ çizimlerinin lineer kısımlarına fit edilen doğrunun eğim ve kesim noktalarından sırasıyla $dV/d(\ln I)$ ve I_0 doyma akım değerleri elde edildi. Her bir sıcaklık için $dV/d(\ln I)$ değeri ve gerekli fiziksel sabitler (4.6) denkleminde yerine yazılarak idealite faktörü değerleri hesaplandı. (2.24) eşitliğinin her iki tarafının tabii logaritması alınıp ϕ_{b0} 'a göre çözülürse,

$$q\phi_{b0} = kT \ln \left(\frac{A_d A^* T^2}{I_0} \right) \quad (4.7)$$

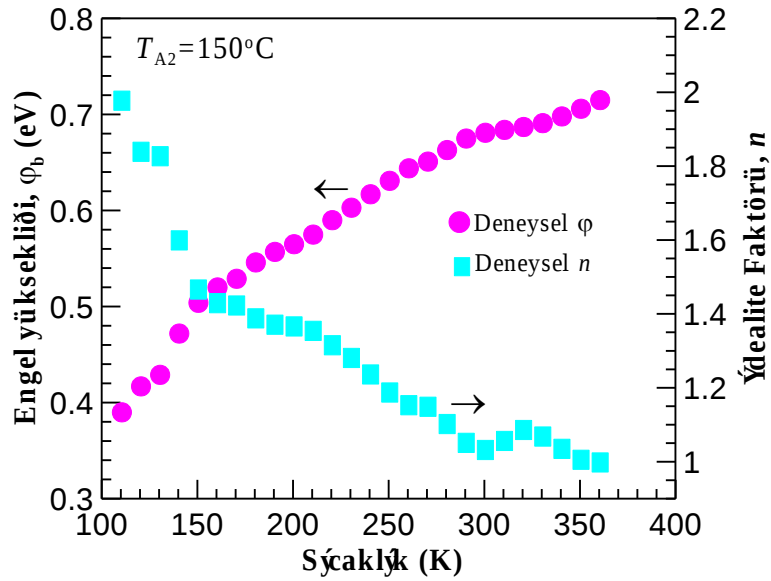
elde edilir. $\ln(I-V)$ çizimlerinin lineer kısımlarına fit edilen doğruların kesim noktalarından elde edilen I_0 doyma akım değerleri, etkin diyot alanı $A_d (=2.827 \times 10^{-3} \text{ cm}^2)$ ve n -InP için etkin Richardson sabiti $A^* (=9.40 \text{ AK}^{-2} \text{ cm}^{-2})$ değerleri (4.7) denkleminde kullanılarak her bir sıcaklık için EY değerleri elde edildi. Çizelge 4.3'te elde edilen idealite faktörü ve EY değerleri verilmiştir. Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapısı için sıcaklığa bağlı geleneksel I - V karakteristiklerinden elde edilen n ve ϕ_b değerlerinde (Çizelge 4.3) her bir tavlama adımından sonra belli bir artış gözlenirken T_{A5} tavlama işleminden sonra bir azalma mevcuttur. Çizelge 4.3'de görüldüğü gibi artan sıcaklıkla EY değerlerinde artma, idealite faktörü değerlerinde ise azalma söz konusudur.

Çizelge 4.3. T_{A2} , T_{A3} ve T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS (D6) yapısına ait sıcaklığa bağlı doğru beslem $I - V$ karakteristiklerinden elde edilen idealite faktörü ve EY değerleri

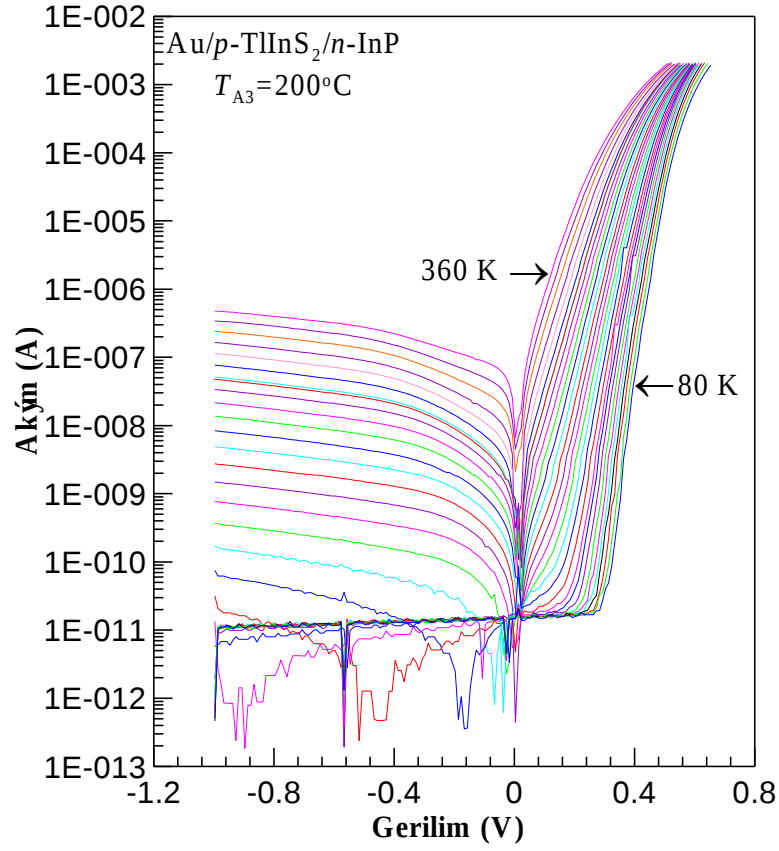
	T_{A2}		T_{A3}		T_{A4}		T_{A5}	
$T(K)$	n	$\phi_b (eV)$	n	$\phi_b (eV)$	n	$\phi_b (eV)$	n	$\phi_b (eV)$
360	1.001	0.716	1.019	0.785	1.053	0.847	1.012	0.768
350	1.008	0.707	1.050	0.782	1.065	0.844	1.012	0.747
340	1.038	0.699	1.065	0.775	1.078	0.839	1.007	0.734
330	1.071	0.692	1.083	0.768	1.082	0.831	1.001	0.732
320	1.089	0.688	1.085	0.761	1.092	0.821	1.013	0.727
310	1.059	0.685	1.094	0.756	1.109	0.804	1.024	0.719
300	1.035	0.682	1.102	0.746	1.112	0.794	1.013	0.716
290	1.054	0.676	1.105	0.740	1.122	0.785	1.023	0.706
280	1.105	0.664	1.109	0.728	1.150	0.773	1.028	0.700
270	1.152	0.652	1.118	0.718	1.187	0.760	1.050	0.683
260	1.156	0.645	1.123	0.709	1.196	0.748	1.084	0.669
250	1.190	0.632	1.130	0.699	1.211	0.736	1.104	0.658
240	1.239	0.618	1.142	0.688	1.244	0.719	1.136	0.641
230	1.284	0.604	1.162	0.674	1.276	0.706	1.183	0.622
220	1.318	0.591	1.175	0.663	1.290	0.688	1.196	0.608
210	1.357	0.576	1.190	0.649	1.342	0.672	1.198	0.595
200	1.369	0.566	1.193	0.637	1.386	0.650	1.195	0.583
190	1.374	0.558	1.199	0.626	1.450	0.628	1.249	0.563
180	1.391	0.547	1.206	0.614	1.514	0.602	1.332	0.540
170	1.426	0.530	1.221	0.598	1.613	0.575	1.381	0.518
160	1.432	0.521	1.225	0.584	1.668	0.554	1.412	0.499
150	1.469	0.505	1.23	0.570	1.774	0.524	1.452	0.480
140	1.602	0.473	1.269	0.549	1.876	0.499	1.463	0.464
130	1.830	0.430	1.324	0.524	1.991	0.472	1.526	0.441
120	1.842	0.418	1.353	0.501	2.128	0.443	1.611	0.414
110	1.980	0.391	1.400	0.477	2.364	0.408	1.771	0.382
100	-	-	1.597	0.431	-	-	1.896	0.354
90	-	-	1.712	0.400	-	-	2.038	0.325
80	-	-	1.899	0.362	-	-	2.259	0.292



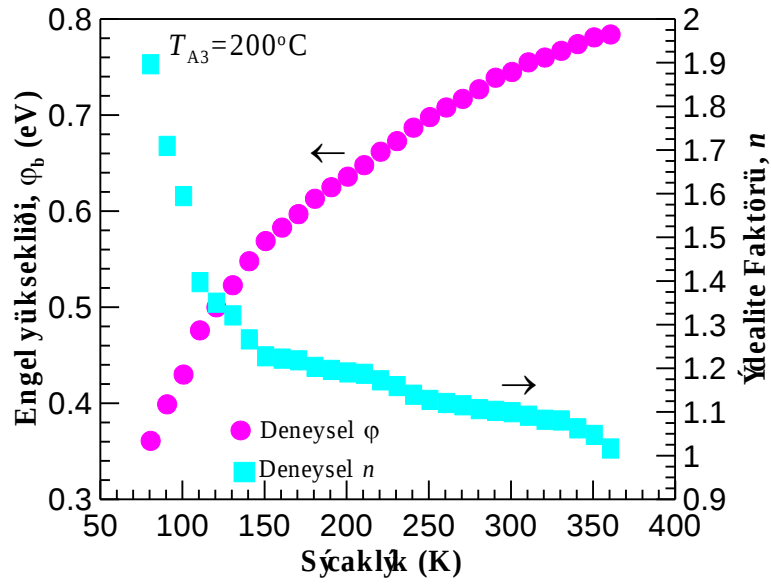
Şekil 4.23. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS (D6) yapısına ait 110-360 K sıcaklık aralığında 10 K adımlarla ölçülen $I - V$ değişimleri



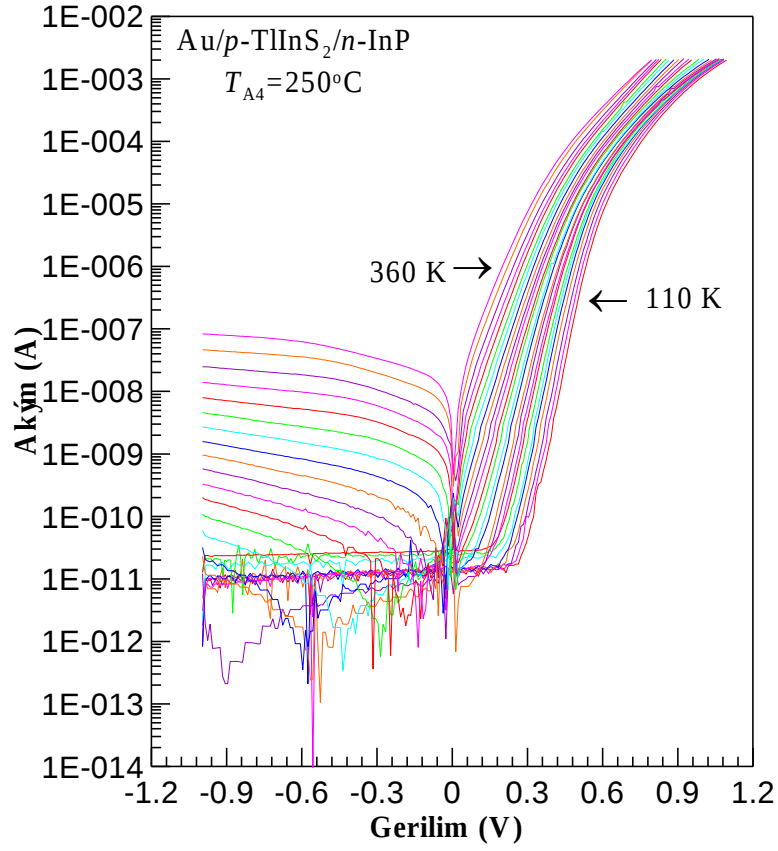
Şekil 4.24. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS (D6) yapısına ait sıcaklığa bağlı idealite faktörü ve EY'nin sıcaklıkla değişimi



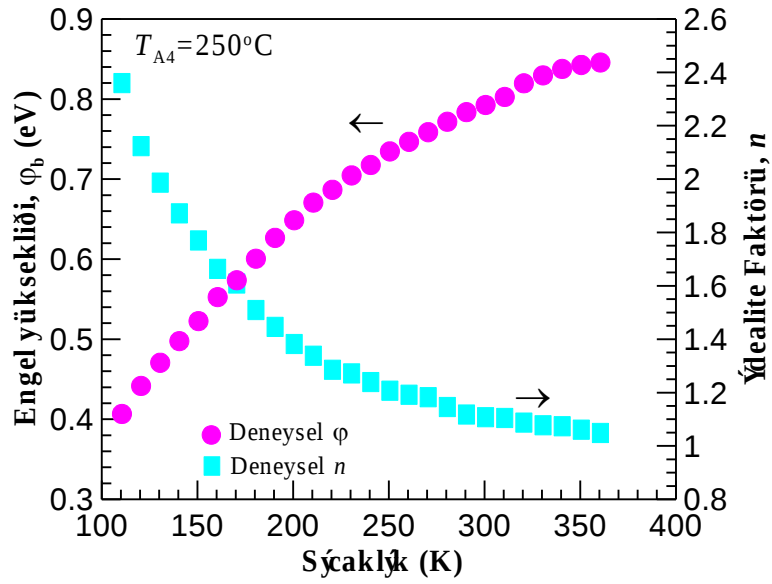
Şekil 4.25. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS (D6) yapısına ait 80-360 K sıcaklık aralığında 10 K adımlarla ölçülen $I - V$ değişimleri



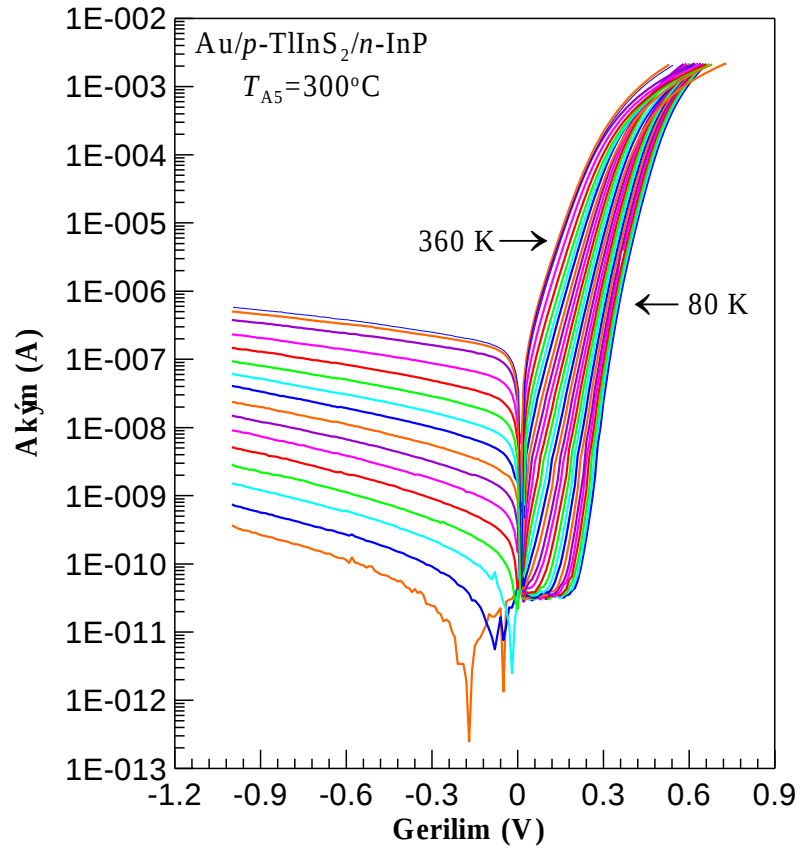
Şekil 4.26. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS (D6) yapısına ait sıcaklığa bağlı idealite faktörü ve EY'nin sıcaklıkla değişimi



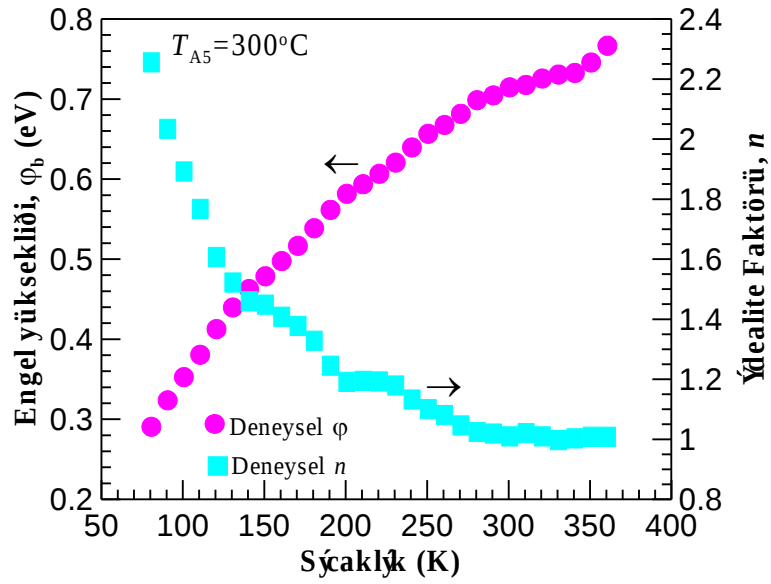
Şekil 4.27. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS (D6) yapısına ait 110-360 K sıcaklık aralığında 10 K adımlarla ölçülen $I - V$ değişimleri



Şekil 4.28. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS (D6) yapısına ait sıcaklığa bağlı idealite faktörü ve EY'nin sıcaklıkla değişimi



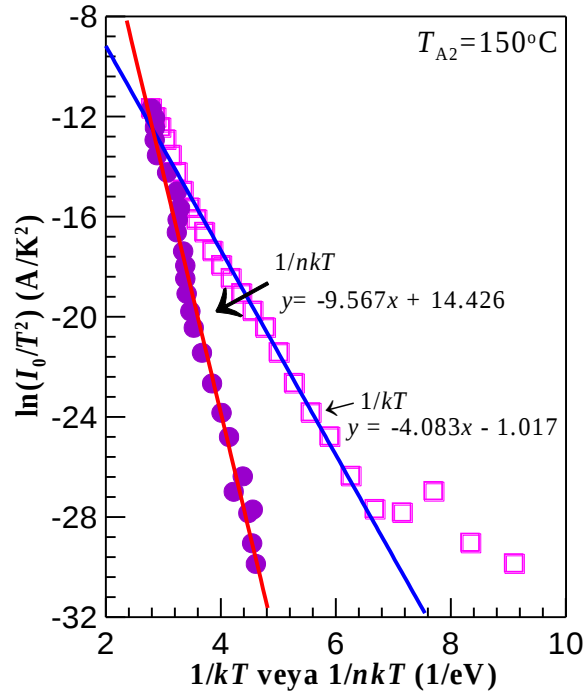
Şekil 4.29. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS (D6) yapısına ait 80-360 K sıcaklık aralığında 10 K adımlarla ölçülen $I - V$ değişimleri



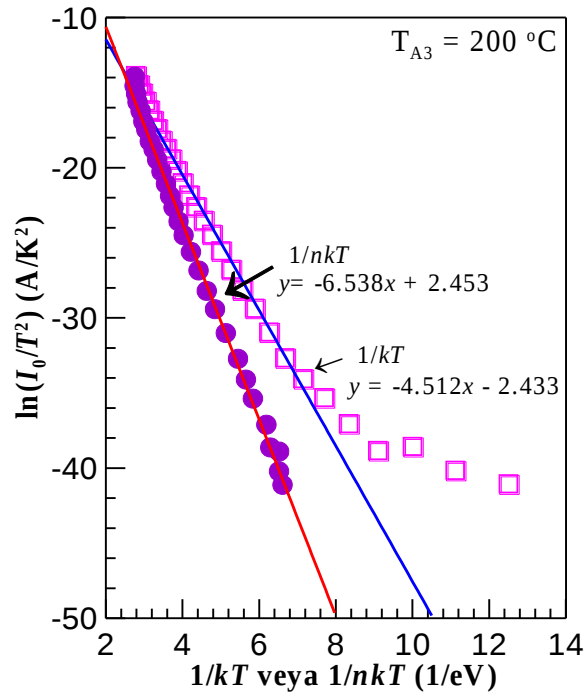
Şekil 4.30. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS (D6) yapısına ait sıcaklığa bağlı idealite faktörü ve EY'nin sıcaklıkla değişimi

Bu durum TlInS₂ arayüzeyi ile InP alttaşı arasındaki homojen olmayan engelle açıklanabilir. Bu inhomojenite, ara yüzeydeki farklı atomik fazlar, yüzey kusurları vb. etkilere atfedilebilir (Werner and Güttler 1991, 1993).

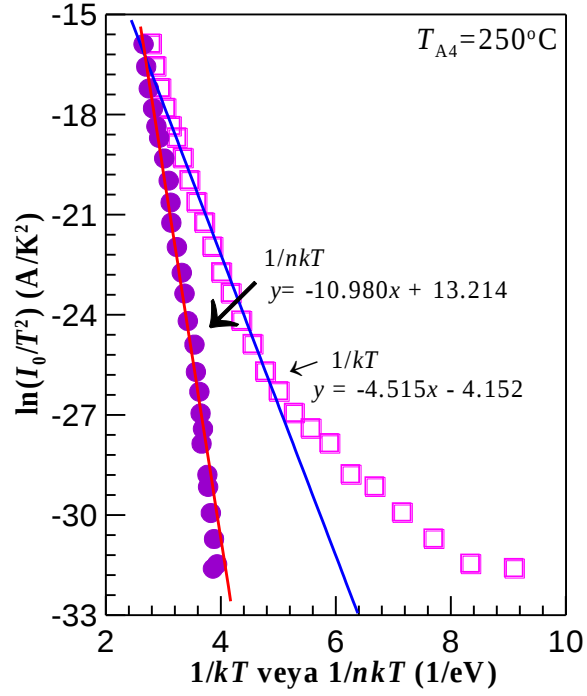
Sıcaklığa bağlı I - V karakteristikleri geleneksel Richardson çizimi ($\ln(I_0/T^2) - 1/kT$) ile analiz edilmektedir. Şekil 4.29, 30, 31’de Au/ p -TlInS₂/ n -InP PS yapısı için bu çizimlere yer verilmiştir. Çizimlerden görüldüğü gibi ilgilenilen sıcaklık aralığının tamamında lineer bir davranış mevcut olmayıp düşük sıcaklıklarda Richardson çizimlerinde bir bükülme mevcuttur. (2.29) eşitliğine bakıldığında zaman, geleneksel Richardson çiziminin lineer kısmına yapılan fitin eğiminin $q\phi_b/k$ ve ordinat eksenini kestiği noktanın da $\ln(A^*)$ değerine eşit olacağı açıktır. Bu değerler kullanılarak $T_{A2}=150^\circ\text{C}$ tavlama işlemi uygulanmış diyot için aktivasyon enerjisi $\phi_b = 0.352$ eV ve etkin Richardson sabiti $A^* = 2.765 \times 10^{-3}$ $\text{AK}^{-2}\text{cm}^{-2}$ olarak hesaplandı. Diğer tavlama sıcaklıkları için elde edilen sonuçlara Çizelge 4.4’te yer verilmiştir. Bu çizelgedeki A^* değerlerin-InP için bilinen değerle kıyasla oldukça küçüktürler. Aynı şekilde, elde edilen aktivasyon enerji değerleri de beklenen değerlerden oldukça uzaktır. Ortaya çıkan bu tutarsızlıkların bertaraf edilmesi ve Richardson çiziminin linearizasyonu için $\ln(I_0/T^2) - 1/nkT$ çizimleri sıklıkla kullanılmaktadır (Chand and Kumar 1995, 1996; Zhu *et al.* 2000, Abay *et al.* 2003; Cimilliet *al.* 2004; Soylu and Abay 2009). Şekil 4.31, 32, 33 bu çizimleri de ihtiva etmektedir. Bu çizimler incelendiğinde mevcut bükülmelerin hemen hemen ortadan kalktığı görülebilir. Bir önceki işlemlere benzer şekilde, $\ln(I_0/T^2) - 1/nkT$ çizimlerine yapılan lineer fitin eğim ve ordinat eksenini kestiği noktadan sırasıyla ϕ_b ve $\ln(A^*)$ değerlerine ulaşılır. Bu işlemler sonucunda T_{A2} , T_{A3} , T_{A4} ve T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/ p -TlInS₂/ n -InP PS yapıları için elde edilen sonuçlar Çizelge 4.4’te verilmiştir. Çizelge 4.4’teki ϕ_b ve A^* değerleri sırası ile 0.824, 0.563, 0.946 ve 0.343 eV; 183.9, 1.162×10^{-3} , 54.790 ve 1.881×10^{-2} $\text{AK}^{-2}\text{cm}^{-2}$ büyüklüğündedir. Elde edilen bu değerler, teorik Richardson sabiti (n -InP yarıiletkenindeki elektronlar için $A^* = 9.4 \text{ AK}^{-2}\text{cm}^{-2}$) ile uyumlu olmayıp, beklenen değerden oldukça farklıdır.



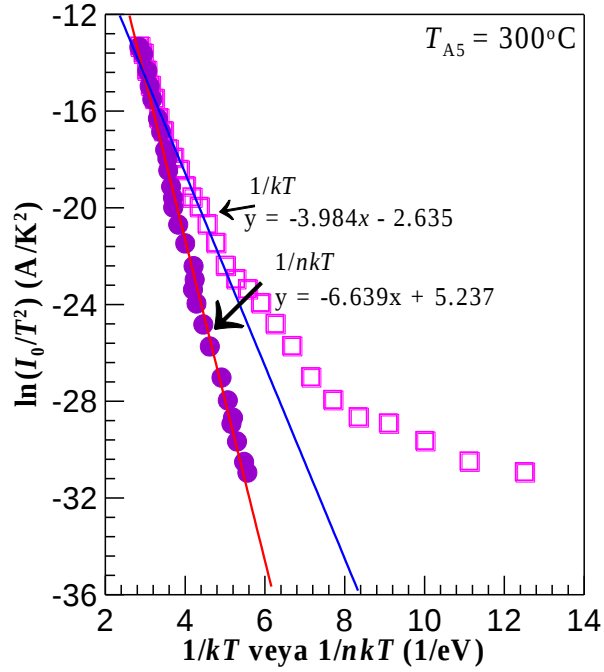
Şekil 4.31. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS (D6) yapısına ait $\ln(I_0/T^2)$ - $1/kT$ ve $\ln(I_0/T^2)$ - $1/nkT$ çizimleri



Şekil 4.32. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS (D6) yapısına ait $\ln(I_0/T^2)$ - $1/kT$ ve $\ln(I_0/T^2)$ - $1/nkT$ çizimleri



Şekil 4.33. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS (D6) yapısına ait $\ln(I_0/T^2)-1/kT$ ve $\ln(I_0/T^2)-1/nkT$ çizimleri



Şekil 4.34. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS (D6) yapısına ait $\ln(I_0/T^2)-1/kT$ ve $\ln(I_0/T^2)-1/nkT$ çizimleri

Çizelge 4.4. Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapıları için $\ln(I_0/T^2)-1/kT$ ve $\ln(I_0/T^2)-1/nkT$ çizimlerinden elde edilen aktivasyon enerjisi (ϕ_b) ve Richardson sabiti (A^*) değerleri

Au/p-TlInS ₂ /n-InP			T_{A2}	T_{A3}	T_{A4}	T_{A5}
	$\ln(I_0/T^2)-1/kT$	$A^* (AK^{-2}cm^{-2})$	2.765x10 ⁻³	1.140x10 ⁻²	6.356x10 ⁻²	5.860x10 ⁻³
		$\phi_b (eV)$	0.352	0.388	0.389	0.309
	$\ln(I_0/T^2)-1/nkT$	$A^* (AK^{-2}cm^{-2})$	183.90	1.162x10 ⁻³	54.790	1.881x10 ⁻²
		$\phi_b (eV)$	0.824	0.563	0.946	0.343

Bu uyuşmazlığa engelin homojen olmayışı ve/veya gerçek etkin kütle değerinin hesaplamalarda kullanılan teorik değerinden farklı oluşu sebep olabilir (Horwáth 1996). Diğer taraftan, elde edilen EY değerleri de beklenen değere kıyasla oldukça küçüktürler. Richardson çizimindeki düşük sıcaklıklarda gözlemlenen lineerlikten sapma, EY ve idealite faktörünün sıcaklığa bağlı olarak değişiminden kaynaklanmaktadır. MY ara yüzeyde akım iletimi sıcaklıkla aktive edilen bir işlem olduğundan, düşük sıcaklıkta elektronlar daha düşük engelleri aşma kabiliyetine sahiptirler. Düşük sıcaklıklarda diyot boyunca akan akım tercihli olarak ve dolayısıyla potansiyel dağılımındaki düşük engel bölgelerinden akacağı ekstra akımla daha büyük idealite faktörüyle sonuçlanacaktır. Ayrıca $I - V$ ölçüm tekniği, engel düşme mekanizmalarına çok hassas bir şekilde bağlı olduğundan, $I - V$ ölçümlerinden elde edilen etkin EY uygulama potansiyeline ve malzemedeki kirlilik atomlarının sayısına bağlıdır.

Düşük sıcaklıklarda EY'nin küçük oluşu ve Richardson eğrisinin lineerlikten sapması; imaj kuvvet etkileri, potansiyel engeli boyunca tünelleme akımı etkileri, düşük voltajlarda görülen uzay yükü bölgesindeki rekombinasyon ve ara yüzeye yakın yük dağılımındaki değişimden kaynaklanabilir (Newman *et al.* 1986; Werner and Güttler 1991; Chand and Kumar 1995, 1996; Zhu *et al.* 2000). Şimdi bu anormalliklerin kaynağı olarak atfedilen imaj kuvvet düşme etkisini ve homojen olmayan engel kavramını inceleyelim.

4.6. İmaj Kuvvet Düşme Etkisi

Schottky yapılarda, azalan ölçüm sıcaklığı ile idealite faktöründeki artış ve EY'deki düşüşün sebebi olarak ilk başta imaj kuvvet düşme etkisi ele alınmalıdır. Bunu anlamak için de aşağıda yapmış olduğumuz hesaplamalara bakalım:

İmaj kuvvet düşmesi ($\Delta\phi_{\text{imf}}$), ikinci bölümde detaylı olarak ele alınmış ve (2.36) eşitliği ile verilmişti. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış diyot için imaj kuvvet etkisine bağlı engel düşmesi, (360 K ve 120 K sıcaklıkları için) (2.36) eşitliği kullanılarak $\Delta\phi_{\text{imf}} = 0.014$ ve 0.021 eV olarak hesaplandı. Benzer şekilde, T_{A3} , T_{A4} ve T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış diyot için bu değerler (360 ve 80 K; 360 ve 120 K; 360 ve 80 K sıcaklıkları için) sırasıyla $\Delta\phi_{\text{imf}} = 0.014$ ve 0.012 eV; $\Delta\phi_{\text{imf}} = 0.014$ ve 0.021 eV; $\Delta\phi_{\text{imf}} = 0.018$ ve 0.014 eV aralığında değişmektedir. Hesaplanan $\Delta\phi_{\text{imf}}$ değerlerinden görüldüğü gibi, incelenen sıcaklık aralıklarında imaj kuvveti nedeniyle engeldeki düşme miktarı hemen hemen sabit kabul edilebilir. Bu durumda artan ölçüm sıcaklığı ile birlikte EY'nin artmasında $\Delta\phi_{\text{imf}}$ 'nin yanında diğer etkilerin de hesaba katılması gerektiğini söyleyebiliriz.

Diğer taraftan, azalan ölçüm sıcaklığıyla idealite faktöründeki artışın nedeninin imaj kuvvet etkisi olup olmadığına da bakılabilir: (2.37) eşitliği kullanılarak, T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış diyot için idealite faktörü değerleri (360 ve 110 K sıcaklıkları için) sırasıyla $n_{\text{imf}} = 1.004$ ve 1.010 elde edildi. T_{A3} , T_{A4} ve T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış diyotları için bu değerler (360 ve 80 K; 360 ve 120 K; 360 ve 80 K sıcaklıkları için) sırasıyla $n_{\text{imf}} = 1.004$ ve 1.006 ; $n_{\text{imf}} = 1.007$ ve 1.010 ; $n_{\text{imf}} = 1.005$ ve 1.008 büyüklüğündedir. Bununla birlikte, T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış diyot için hesaplanan $n_{\text{imf}} = 1.004$ ve 1.010 değerleri aynı sıcaklıklardaki I - V karakteristiklerinden hesaplanan $n=1.001$ ve 1.842 değerleri ile kıyaslandığında düşük sıcaklıklarda farkın çok çok büyük olduğu görülmektedir. Aynı durum T_{A3} , T_{A4} ve T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış yapıları için de geçerlidir: ($T=80$ K, 120 K ve 80 K için sırasıyla $n_{\text{imf}} = 1.006$, 1.010 ve 1.008 iken $n=1.899$, 2.128 ve 2.259 'dir). Böylece, bu

veriler ışığı altında, azalan sıcaklıkla EY'deki aşırı azalmanın ve idealite faktöründeki aşırı artmanın imaj kuvvet düşmesi dikkate alınarak açıklanamayacağı; imaj kuvvet etkisinden ziyade başka akım mekanizmalarının da var olduğu/olabileceği düşünülmelidir (Chand and Kumar 1996a,b; Jones *et al.* 1999; Abay *et al.* 2003; Gülnahar and Efeoğlu 2009; Cimilliet *al.* 2009).

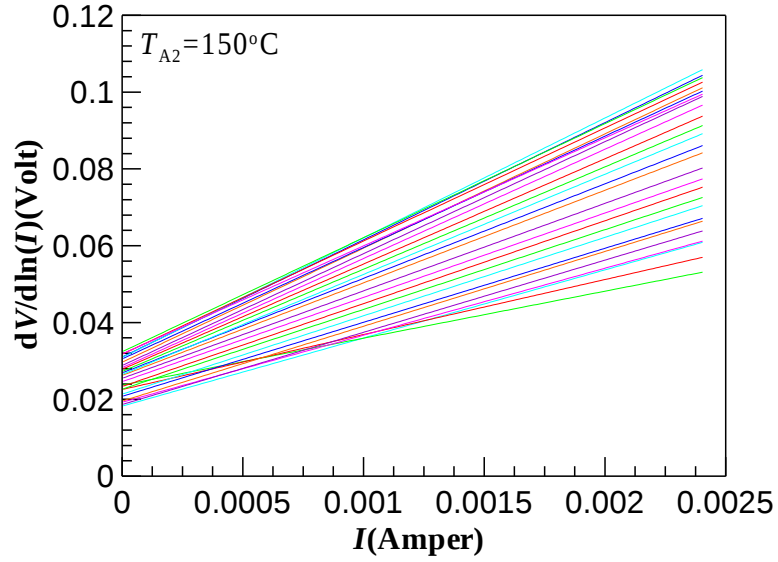
4.7. Cheung Fonksiyonları Kullanılarak Sıcaklığa Bağlı Analiz

$I - V$ karakteristiklerinin doğru beslem tarafını göz önünde bulundurularak elde edilen Cheung fonksiyonları (2.28) ve (2.31) yardımı ile idealite faktörü (n), seri direnç (R_s) ve EY (ϕ_b) değerleri tayin edildi. Cheung fonksiyonları yardımıyla belirlenen Schottky diyot parametreleri n , R_s ve ϕ_b değerleri Çizelge 4. 4, 5, 6'da Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapılarının T_{A2} , T_{A3} ve T_{A4} tavlamalarından sonra (D6) diyotunun sıcaklığa bağlı $dV / d(\ln I) - I$ ve $H(I) - I$ değişimleri ise sırası ile Şekil 4. 35, 36, 37, 38 ve Şekil 4. 39, 40, 41, 42'de verilmiştir. Ayrıca, Au/p-TlInS₂/n-InP PS diyotlarının geleneksel $I - V$ karakteristiklerinin analizi ve Cheung fonksiyonlarının kullanımı sonucunda elde edilen idealite faktörü ve EY değerlerinin sıcaklıkla değişimlerine de Şekil 4.43, 44, 45, 46 ve Şekil 4. 47, 48, 49, 50'de yer verilmiştir.

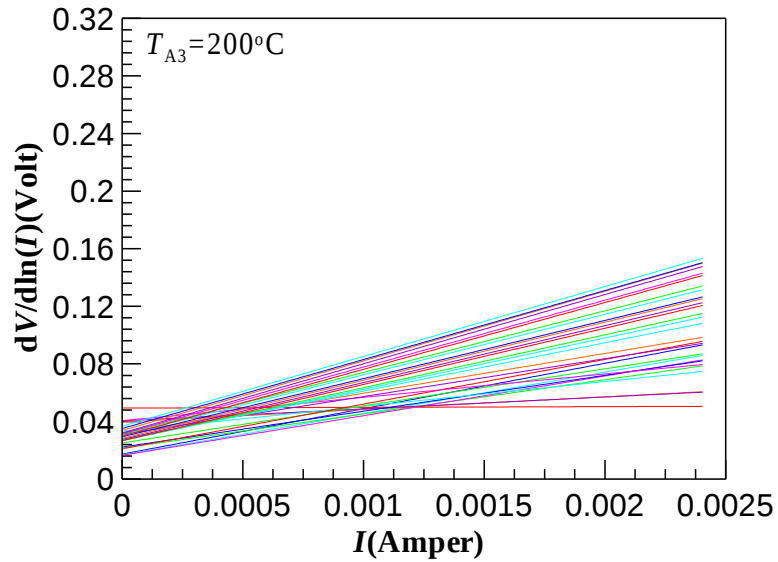
Tavlama etkisine bakıldığında, sıcaklığa bağlı olarak Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapısı için Cheung fonksiyonlarından elde edilen n , R_s ve ϕ_b değerleri (Çizelge 4.5,6,7) her bir tavlama adımı sonrasında artmıştır. Ancak, T_{A5} tavlama işlemi ardından Cheung fonksiyonlarından elde edilen n , R_s ve ϕ_b değerlerinde belli bir miktar azalma gözlenmiştir (Çizelge 4.8).

Şekil 4.43, 4.44, 4.45, 4.46 ve Şekil 4.47, 4.48, 4.49, 4.50'de görüldüğü üzere Cheung fonksiyonlarından elde edilen idealite faktörü ve EY değerlerinin sıcaklıkla değişimi, $I - V$ eğrilerinden elde edilenlerle benzer karaktere sahiptirler. Bu durum değişik

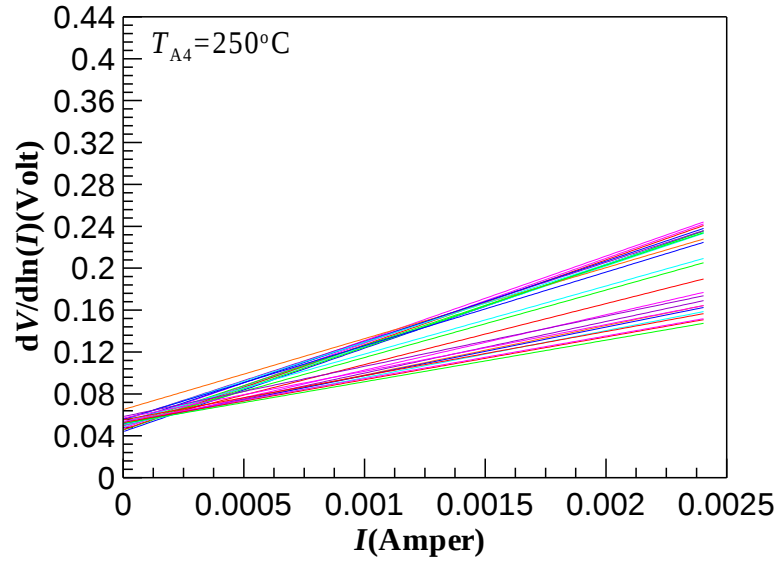
değerlendirme metotları arasındaki uyumu ve bu metotların uygulanabilirliğini ifade etmektedir.



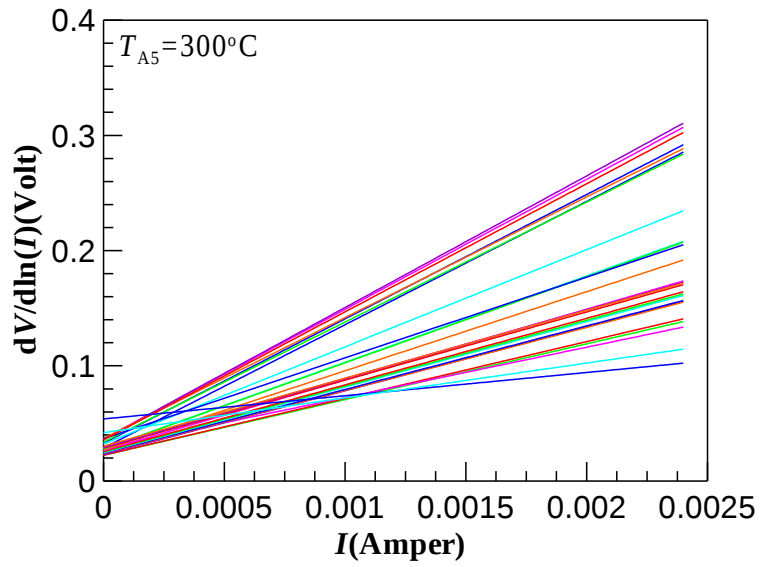
Şekil 4.35. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/n\text{-InP}$ PS (D6) diyotuna ait 110-360 K sıcaklık aralığında I. Cheung çizimleri



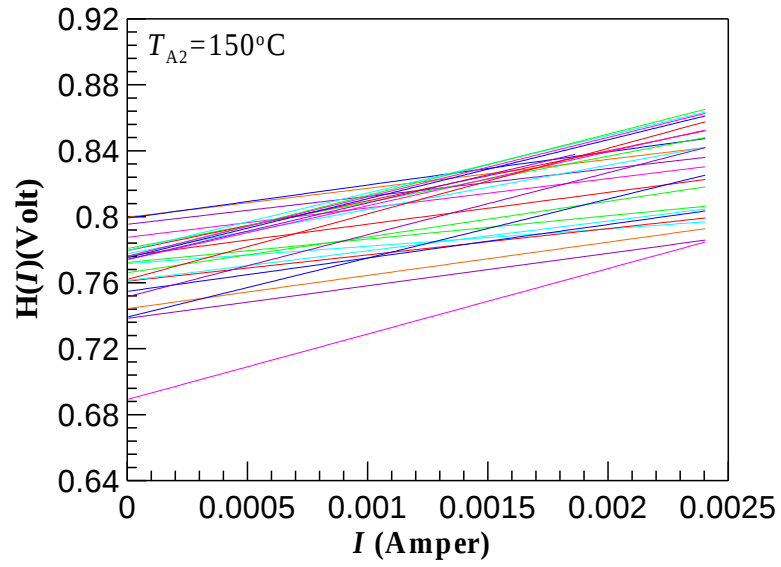
Şekil 4.36. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/n\text{-InP}$ PS (D6) diyotuna ait 80-360 K sıcaklık aralığında I. Cheung çizimleri



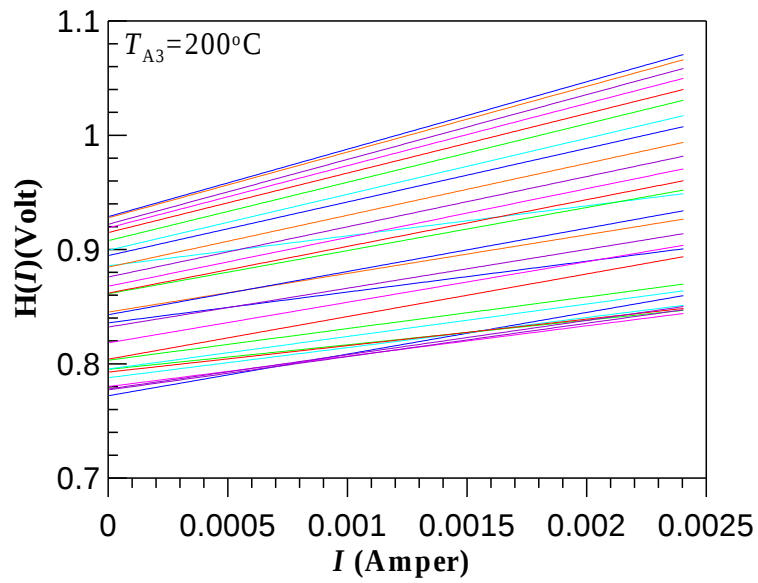
Şekil 4.37. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/n\text{-InP}$ PS (D6) diyotuna ait 110-360 K sıcaklık aralığında I. Cheung çizimleri



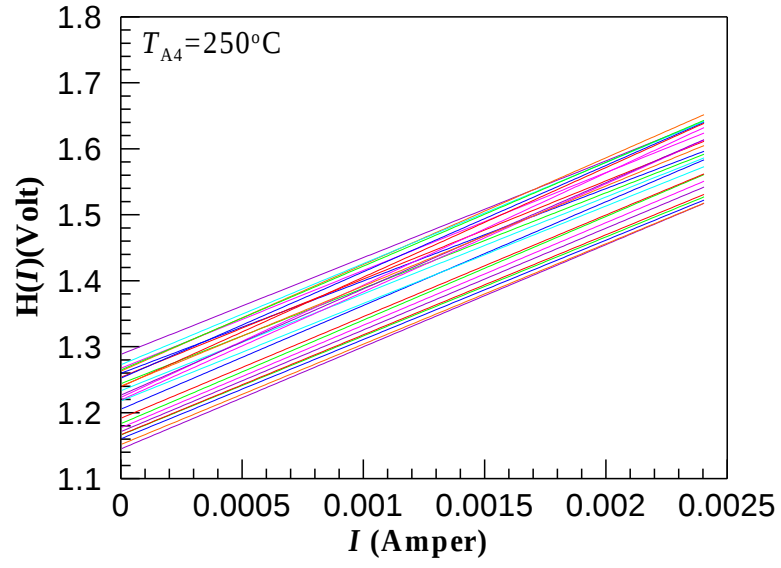
Şekil 4.38. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/n\text{-InP}$ PS (D6) diyotuna ait 80-360 K sıcaklık aralığında I. Cheung çizimleri



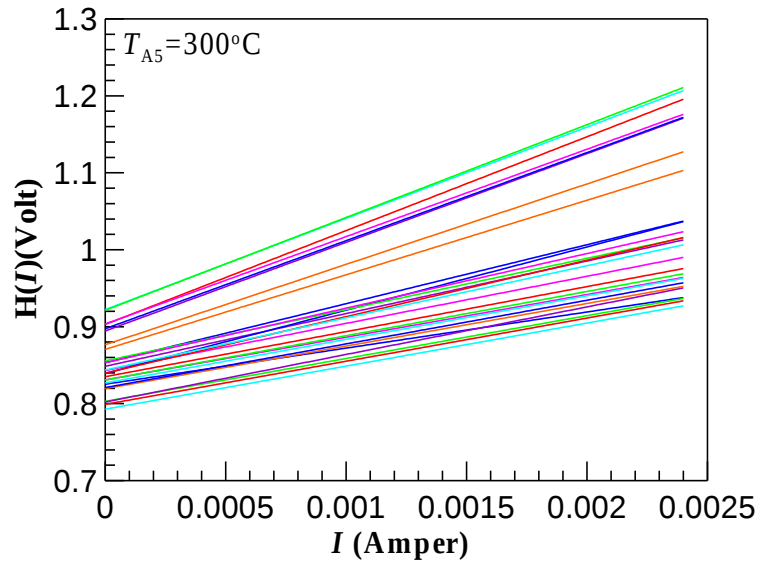
Şekil 4.39. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/n\text{-InP}$ PS (D6) diyotuna ait 110-360 K sıcaklık aralığında II. Cheung çizimleri



Şekil 4.40. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/n\text{-InP}$ PS (D6) diyotuna ait 80-360 K sıcaklık aralığında II. Cheung çizimleri



Şekil 4.41. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au}/p\text{-TlInS}_2/n\text{-InP}$ PS (D6) diyotuna ait 110-360 K sıcaklık aralığında II. Cheung çizimleri



Şekil 4.42. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au}/p\text{-TlInS}_2/n\text{-InP}$ PS (D6) diyotuna ait 80-360 K sıcaklık aralığında II. Cheung çizimleri

Çizelge 4.5. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış $Au/p-TlInS_2/n-InP$ PS (D6) yapısı için sıcaklığa bağlı olarak Cheung fonksiyonlarından elde edilen diyot parametreleri

Sıcaklık (K)	$dV/d\ln(I)$		$H(I)-I$	
	n	$R_s (\Omega)$	ϕ_b (eV)	$R_s(\Omega)$
360	1.041	28.146	0.711	35.693
350	1.070	29.186	0.703	37.561
340	1.121	29.689	0.693	36.203
330	1.128	30.565	0.688	37.458
320	1.140	30.539	0.681	37.309
310	1.158	29.121	0.674	34.997
300	1.163	29.667	0.667	35.690
290	1.174	29.108	0.660	34.313
280	1.187	28.440	0.653	32.854
270	1.214	27.487	0.642	30.088
260	1.234	26.671	0.633	27.864
250	1.246	26.036	0.625	26.670
240	1.319	24.479	0.606	20.170
230	1.346	23.977	0.595	17.410
220	1.364	22.925	0.584	17.029
210	1.377	22.116	0.573	17.861
200	1.380	21.375	0.563	19.293
190	1.395	20.950	0.550	21.665
180	1.403	20.251	0.543	18.235
170	1.434	19.462	0.526	20.166
160	1.439	19.392	0.518	20.234
150	1.465	18.924	0.505	19.739
140	1.664	17.139	0.457	19.461
130	1.732	17.067	0.440	16.252
120	1.904	16.372	0.405	16.049
110	1.970	17.742	0.392	10.570

Çizelge 4.6. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış $Au/p\text{-TlInS}_2/n\text{-InP}$ PS (D6) yapısı için sıcaklığa bağlı olarak Cheung fonksiyonlarından elde edilen diyot parametreleri

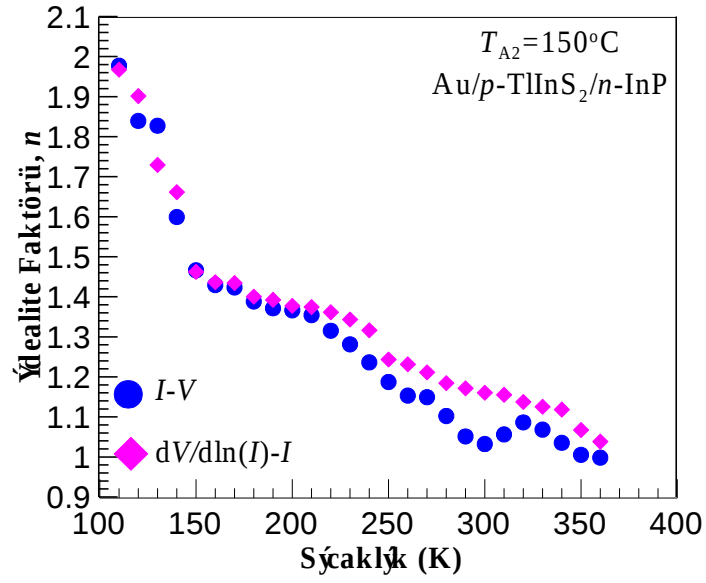
Sıcaklık (K)	dV/dln(I)		H(I)-I	
	n	$R_s (\Omega)$	ϕ_b (eV)	$R_s (\Omega)$
360	1.213	48.523	0.767	59.092
350	1.226	47.158	0.757	57.608
340	1.231	47.176	0.750	56.640
330	1.234	46.276	0.745	54.356
320	1.240	44.888	0.738	52.156
310	1.244	44.358	0.731	51.139
300	1.245	42.741	0.723	49.004
290	1.256	41.939	0.713	46.865
280	1.257	40.382	0.705	45.360
270	1.260	40.274	0.696	44.048
260	1.266	39.531	0.686	42.804
250	1.279	39.111	0.675	41.014
240	1.306	38.539	0.661	37.816
230	1.390	35.692	0.638	26.395
220	1.335	36.314	0.632	37.851
210	1.381	33.644	0.613	34.001
200	1.393	32.930	0.597	35.428
190	1.405	31.777	0.581	38.237
180	1.413	31.065	0.570	37.199
170	1.433	30.644	0.561	28.101
160	1.480	28.224	0.538	28.467
150	1.794	24.810	0.466	26.951
140	1.575	27.844	0.493	32.129
130	1.699	27.327	0.466	29.260
120	1.789	26.605	0.436	27.304
110	1.994	25.835	0.397	24.972
100	2.158	26.714	0.369	20.946
90	2.321	28.733	0.340	25.206
80	2.466	35.305	0.314	35.479

Çizelge 4.7. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış $Au/p-TlInS_2/n-InP$ PS (D6) yapısı için sıcaklığa bağlı olarak Cheung fonksiyonlarından elde edilen diyot parametreleri

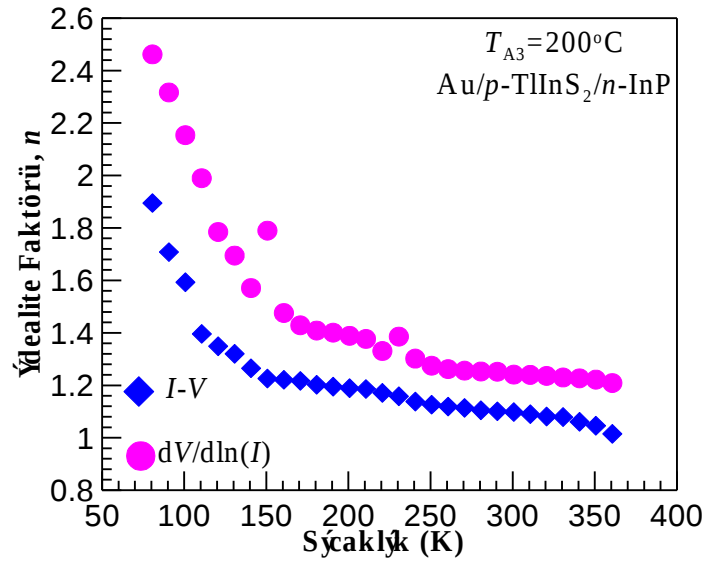
Sıcaklık (K)	dV/dln(I)		H(I)-I	
	n	$R_s (\Omega)$	ϕ_b (eV)	$R_s (\Omega)$
360	1.386	427.819	0.847	154.174
350	1.393	537.762	0.839	151.544
340	1.399	461.091	0.835	150.200
330	1.407	451.245	0.827	150.383
320	1.414	466.207	0.816	152.196
310	1.422	631.888	0.807	155.133
300	1.509	416.856	0.782	154.680
290	1.561	372.848	0.765	154.155
280	1.575	494.418	0.753	157.135
270	1.676	378.839	0.728	147.755
260	1.696	415.371	0.712	158.238
250	1.810	345.150	0.686	151.813
240	1.837	419.756	0.669	161.163
230	1.867	430.693	0.654	164.958
220	1.952	400.535	0.628	170.127
210	2.045	320.463	0.607	166.719
200	2.205	287.762	0.575	157.220
190	2.321	263.451	0.550	153.882
180	2.385	447.293	0.526	161.595
170	2.594	328.663	0.488	161.772
160	2.756	317.617	0.466	151.471
150	2.862	207.607	0.443	148.396
140	2.984	212.649	0.421	147.771
130	3.124	247.748	0.399	143.937
120	3.288	238.830	0.376	146.689
110	3.692	235.808	0.343	137.419

Çizelge 4.8. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış $Au/p\text{-TlInS}_2/n\text{-InP}$ PS (D6) yapısı için sıcaklığa bağlı olarak Cheung fonksiyonlarından elde edilen diyot parametreleri

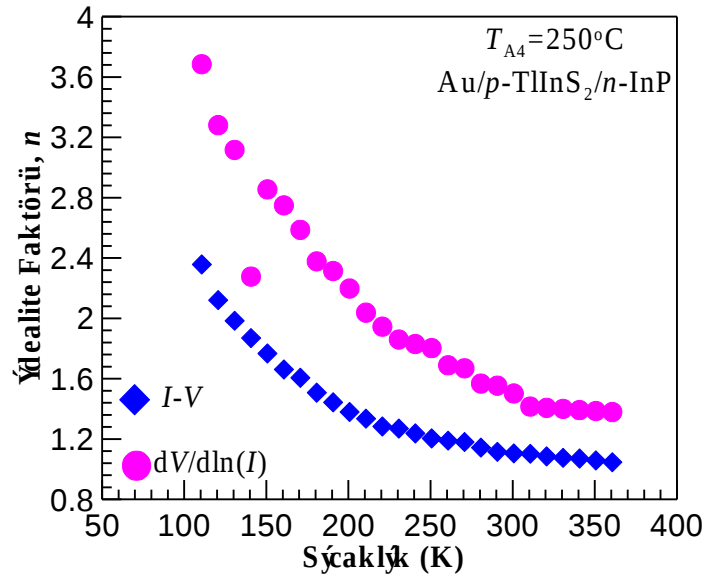
Sıcaklık (K)	$dV/d\ln(I)$		$H(I)-I$	
	n	$R_s (\Omega)$	ϕ_b (eV)	$R_s (\Omega)$
350	1.219	70.032	0.732	81.431
340	1.265	104.823	0.714	113.562
330	1.279	114.225	0.706	121.978
320	1.319	112.752	0.698	120.558
310	1.337	111.138	0.690	118.545
300	1.314	104.099	0.683	114.466
290	1.289	84.354	0.675	96.872
280	1.358	107.946	0.659	115.162
270	1.302	59.088	0.655	70.951
260	1.305	59.634	0.644	73.462
250	1.366	59.679	0.626	66.668
240	1.379	59.158	0.612	67.770
230	1.407	74.752	0.596	82.072
220	1.480	75.033	0.576	76.570
210	1.587	106.972	0.552	104.520
200	1.573	68.586	0.539	68.516
190	1.619	61.283	0.521	61.089
180	1.663	57.746	0.502	58.518
170	1.725	57.215	0.482	57.547
160	1.797	56.650	0.460	56.445
150	1.876	55.120	0.438	56.744
140	1.978	54.796	0.414	55.455
130	2.045	55.397	0.392	61.925
120	2.418	57.110	0.344	55.505
110	2.359	49.260	0.339	56.015
100	2.610	48.254	0.308	55.565
90	2.801	46.899	0.283	55.979
80	3.393	44.614	0.243	46.938



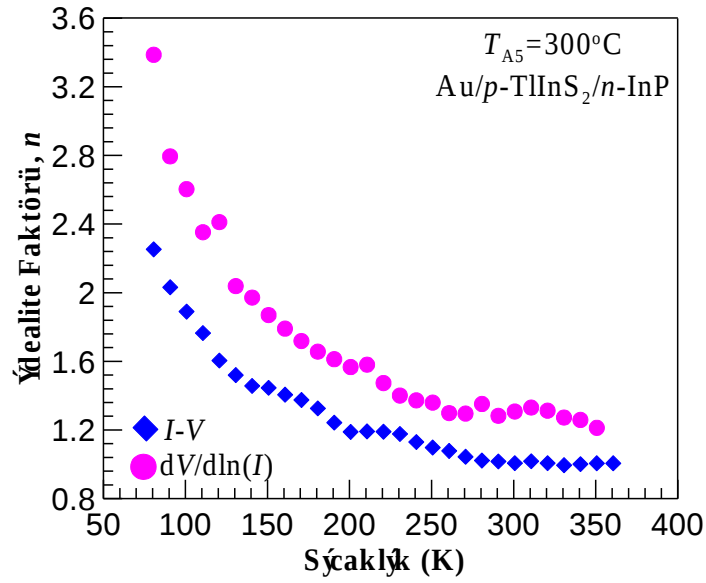
Şekil 4.43. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS (D6) yapısı için idealite faktörlerinin sıcaklıkla değişimi



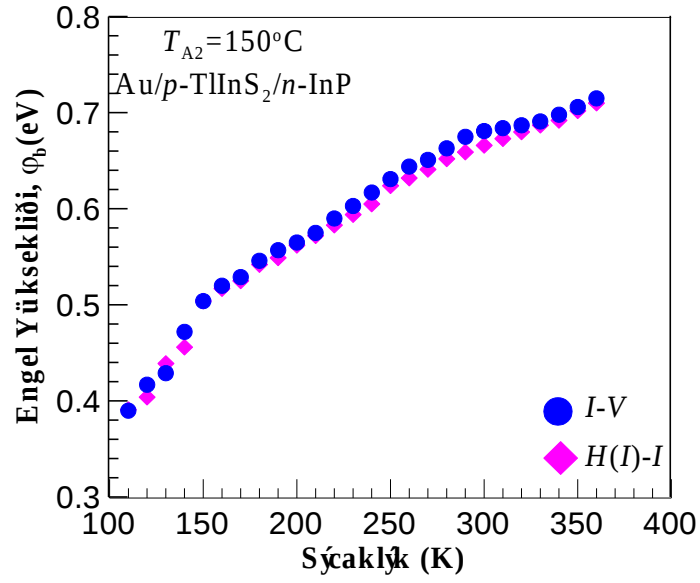
Şekil 4.44. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS (D6) yapısı için idealite faktörlerinin sıcaklıkla değişimi



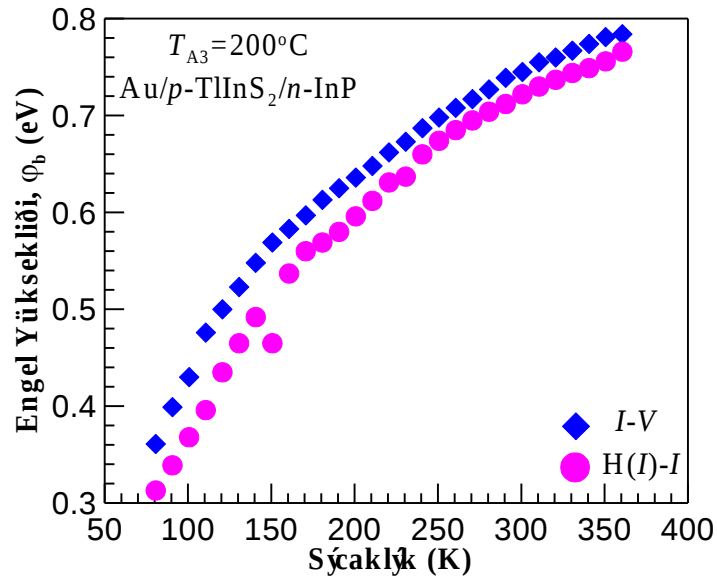
Şekil 4.45. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış $Au/p-TlInS_2/n-InP$ PS (D6) yapısı için idealite faktörlerinin sıcaklıkla değişimi



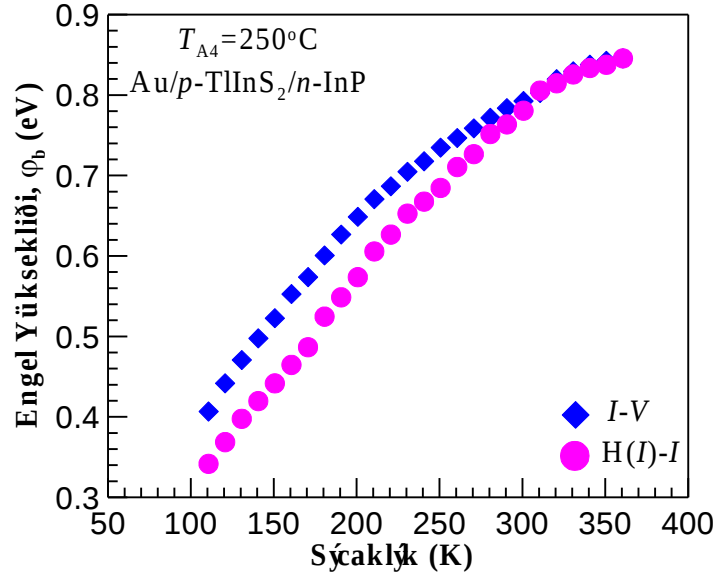
Şekil 4.46. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış $Au/p-TlInS_2/n-InP$ PS (D6) yapısı için idealite faktörlerinin sıcaklıkla değişimi



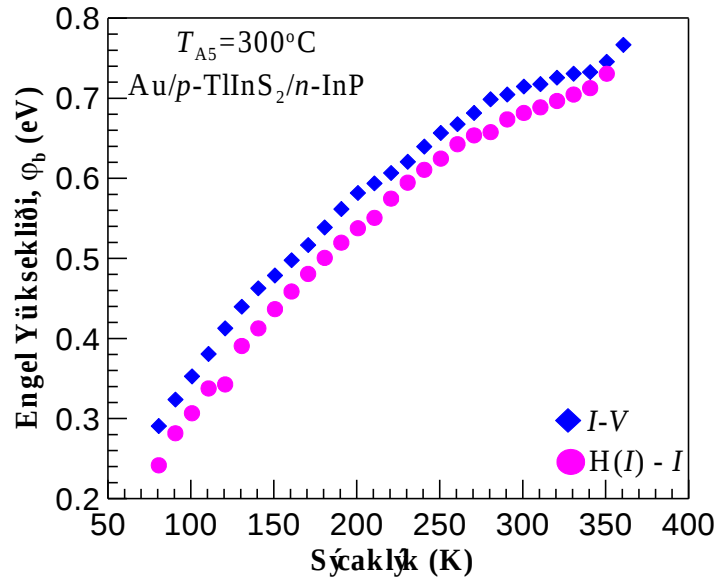
Şekil 4.47. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS (D6) yapısı için EY'nin sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.48. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS (D6) yapısı için EY'nin sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.49. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS (D6) yapısı için EY'nin sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.50. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS (D6) yapısı için EY'nin sıcaklıkla değişimi

4.8. Homojen Olmayan Engel Yüksekliği Etkisi ve Modifiye Richardson Çizimi

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında EY inhomojenitesinin tekli ve/veya çoklu Gauss Dağılım (GD) fonksiyonu kullanılarak tatmin edici bir şekilde açıklandığı

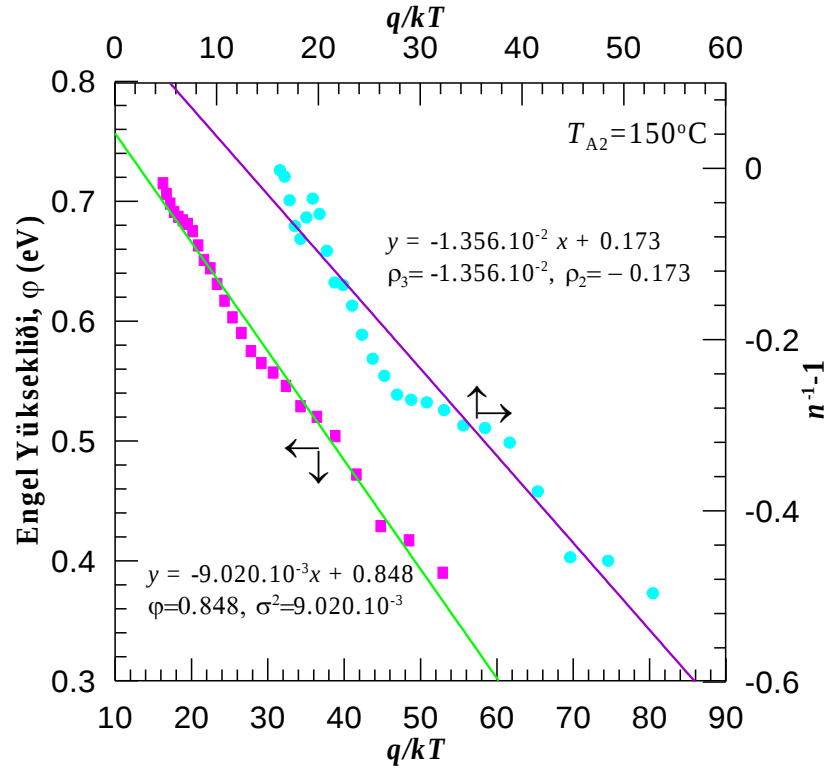
görülmektedir. Özellikle, düşük sıcaklıklarda sıfır beslem EY'deki azalış ve idealite faktöründeki artışın en önemli sebebinin engel inhomojenitesi olduğuna dair literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur (Jiang *et al.* 2001; Werner and Güttler 1991,1993; Zhu *et al.* 2000; Chand 2002; Chand and Kumar 1995, 1996, Gülnahar and Efeoğlu 2009; Abay 2010; Ejderha *et al.* 2010; Soylu *et al.* 2011; Ejderha *et al.* 2012). Düşük sıcaklıklardaki anormal davranışların izahında ortalama EY ($\bar{\varphi}_{b0}$) ve onun standart sapmasının (σ_{s0}^2) uygulama potansiyeline bağlılığının farklı biçimlerinin dikkate alındığı tekli GD modeli (SGDM), Werner and Güttler 1991,1993; Zhu *et al.* 2000; Chand 2002; Chand and Kumar 1995, 1996 araştırmacılar tarafından detaylı olarak ele alınmıştır. Görülen anormal davranışların kaynağını belirlemek üzere elde edilen veriler aşağıdaki basamaklar takip edilerek SGDM dikkate alınarak yeniden değerlendirildi. (2.42) ve (2.45) denklemleri kullanılmak suretiyle her bir sıcaklık için elde edilen φ_{ap} ve n_{ap} değerleri kullanılarak $\varphi_{ap} - q/2kT$ ve $n_{ap} - q/2kT$ çizimleri oluşturuldu. Lineer değişime sahip $\varphi_{ap} - q/2kT$ çizimlerine fit edilen doğruların ordinat eksenini kesim noktaları ve eğimlerinden sırasıyla ortalama EY ($\bar{\varphi}_{b0}$) ve onun standart sapması (σ_{s0}) elde edildi. Benzer şekilde, $n_{ap} - q/2kT$ çizimlerine fit edilen doğruların ordinat eksenini kesim noktaları ve eğimlerinden de sırasıyla ρ_2 ve ρ_3 voltaj katsayıları elde edildi. Şekil 4. 51, 52, 53 ve 54'de Au/p-TlInS₂/n-InP PS (D6) yapısına ait $\varphi_{ap} - q/2kT$ ve $n_{ap} - q/2kT$ çizimlerine yer verilmiştir. Bu çizimlerden, T_{A2} , T_{A3} , T_{A4} ve T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış diyotlara ait ortalama EY ve standart sapma değerleri sırası ile $\bar{\varphi}_{b0} = 0.848$ eV ve $\sigma_{s0} = 0.095$ eV; $\bar{\varphi}_{b0} = 0.885$ eV ve $\sigma_{s0} = 0.088$ eV; $\bar{\varphi}_{b0} = 1.038$ eV ve $\sigma_{s0} = 0.113$ eV; $\bar{\varphi}_{b0} = 0.860$ eV ve $\sigma_{s0} = 0.094$ eV olarak hesap edildi. $\bar{\varphi}_{b0}$ ve σ_{s0} değerleri birbirleri ile kıyaslandığında, standart sapmanın ortalama engel yüksekliğinin $\approx 11\%$ 'i olduğu görülmektedir. Standart sapma engel homojenliğinin bir ölçüsü olduğundan, standart sapma ne kadar düşük olursa homojen engel yüksekliğine o kadar çok yaklaşılr. σ_{s0} değerlerinin $\bar{\varphi}_{b0}$ 'ye nazaran küçük olması, ara yüzeyde homojen olmayan durumu ifade eder. Bu homojen olmayan dağılım ve potansiyel

dalgalanmaları düşük sıcaklık akım-voltaj karakteristiklerine etki eder. Bu etki, özellikle Şekil 4.31, 32,33, 34'te verilen Richardson eğrilerindeki lineer olmayan davranıştan sorumludur (Song *et al.* 1986; Zhu *et al.* 1999).

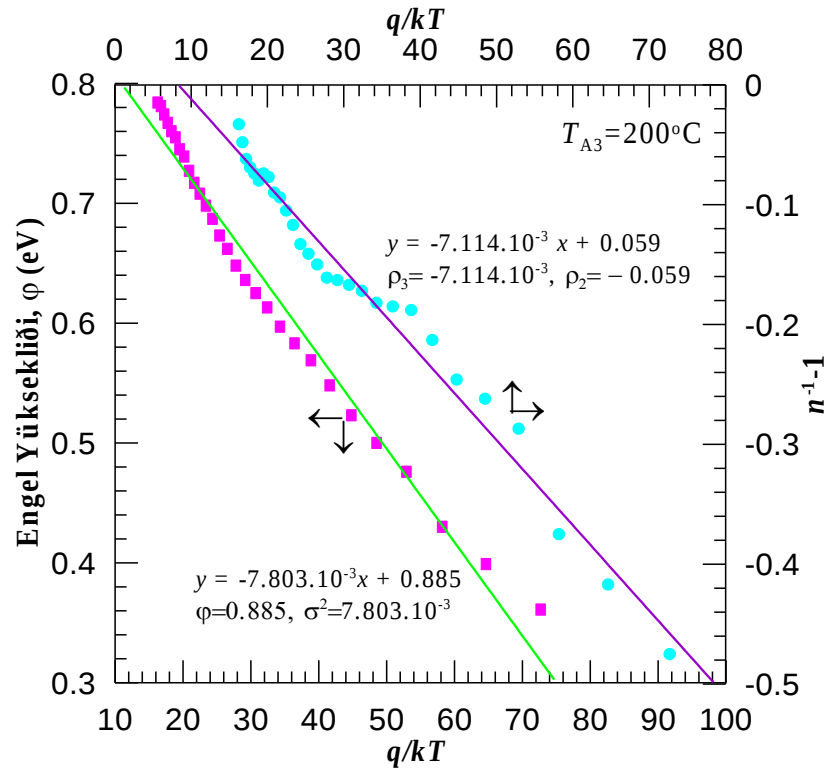
Diğer taraftan, $n_{ap} - q/2kT$ çizimlerinden T_{A2} , T_{A3} , T_{A4} ve T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış yapılara ait voltaj katsayıları için sırasıyla $\rho_2 = -0.173$ ve $\rho_3 = -1.356 \times 10^{-2}$ eV; $\rho_2 = -0.059$ ve $\rho_3 = -7.114 \times 10^{-3}$ eV; $\rho_2 = -0.181$ ve $\rho_3 = -1.534 \times 10^{-2}$ eV; $\rho_2 = -0.157$ ve $\rho_3 = -1.09 \times 10^{-2}$ eV değerleri elde edildi. $n_{ap} - q/2kT$ çizimlerinin incelenen sıcaklık aralığındaki lineer değişim, idealite faktörünün sıcaklıkla değişimine Gauss dağılımlı Schottky engelindeki voltaj deformasyonunun sebep olduğunu gösterir.

(2.45) denklemi dikkate alındığında azalan sıcaklıkla birlikte idealite faktörünün artışıdaki baskın rolün ρ_3 voltaj katsayısının negatifliğinden kaynaklandığı söylenebilir. Aynı zamanda ρ_2 katsayısının da negatif oluşu, uygulama gerilimi arttıkça engel yüksekliğinin ve dolayısıyla onun standart sapmasının azaldığını belirtir. Bu sonuçlar, uygulama voltajının engel yüksekliğindeki dalgalanmaları homojenize ettiğini (uygulama voltajı ne kadar artarsa engel yüksekliğindeki dalgalanma da o kadar daralır) belirtir. Bu durum, uygulama voltajı artışıyla etkin engelin maksimumunun yarıiletken gövde içine doğru kaydığı ve böylece engelin homojen bir dağılıma sahip olduğu şeklinde açıklanabilir. Şekil 4.31, 4.32, 4.33, 4.34 ile verilen geleneksel Richardson çizimlerinde, özellikle düşük sıcaklık bölgesinde, lineerlikten sapma yani bükülmelerin mevcut olduğu görülmektedir. Homojen olmayan engel etkisinden dolayı geleneksel Richardson çiziminde görülen bu bükülmeler modifiye edilmiş Richardson grafiği çizilerek giderilebilir. Bunun için SGDM göre verilen (2.46) eşitliği kullanılabilir.

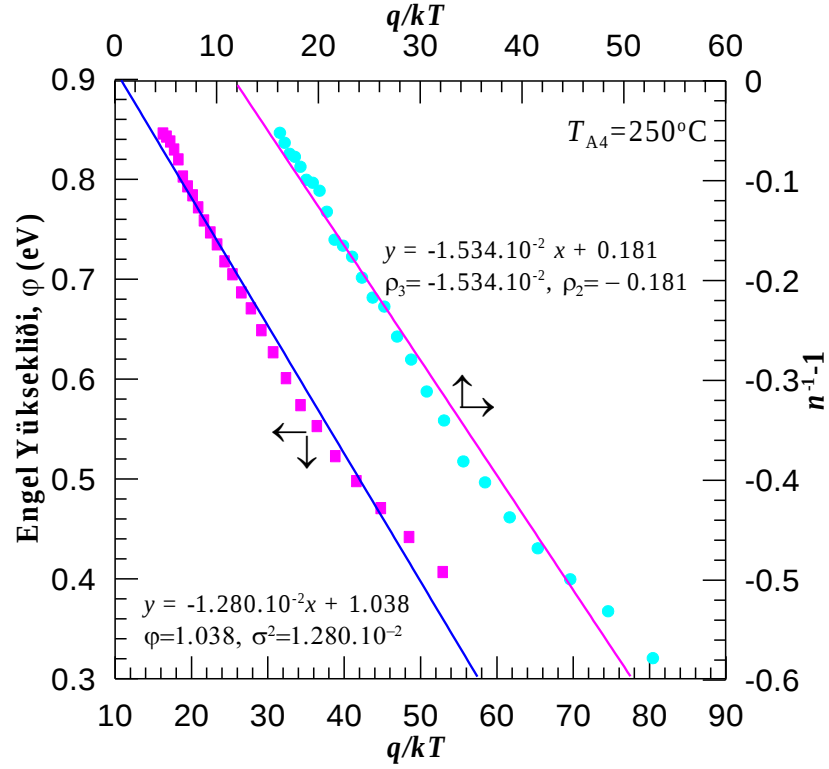
Şekil 4.55, 56, 57 ve 58'de EY'nin SGDM'ne göre, T_{A2} , T_{A3} , T_{A4} ve T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS (D6) yapılarına ait modifiye edilmiş Richardson çizimlerine $(\ln(I_0/T^2) - q^2\sigma^2/2(kT)^2) - 1000/T$ yer verilmiştir. (2.46) ifadesi gereğince bu çizimlerin eğimleri ve ordinat eksenini kesim noktaları sırasıyla aktivasyon enerjisi ve Richardson sabiti değerlerini veren lineer değişim sergilemelidir.



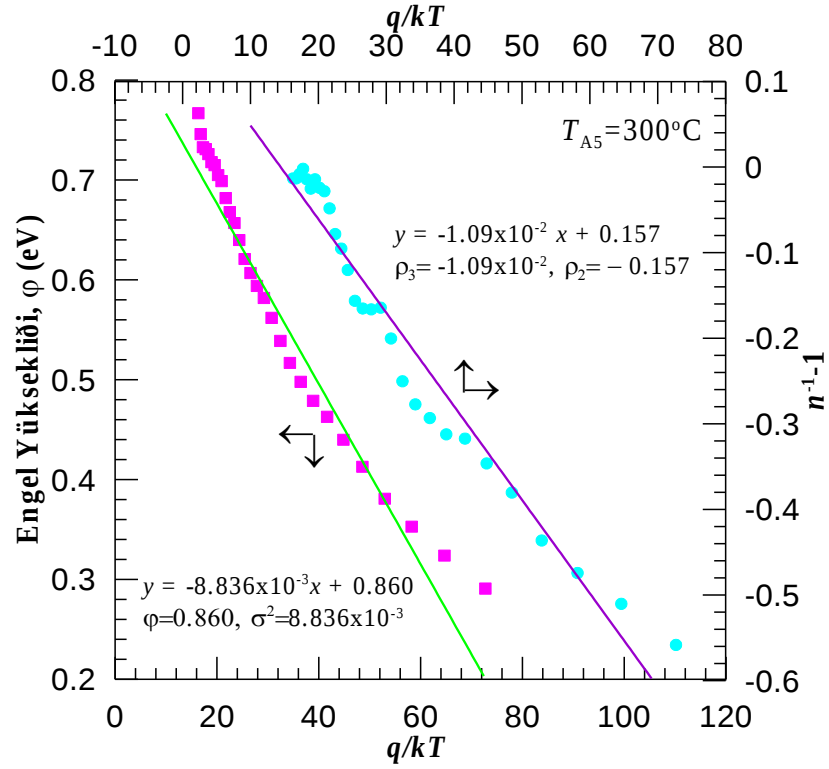
Şekil 4.51. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS (D6) yapısı için SGDM göre φ_{ap} - ve n_{ap} - q/kT çizimi



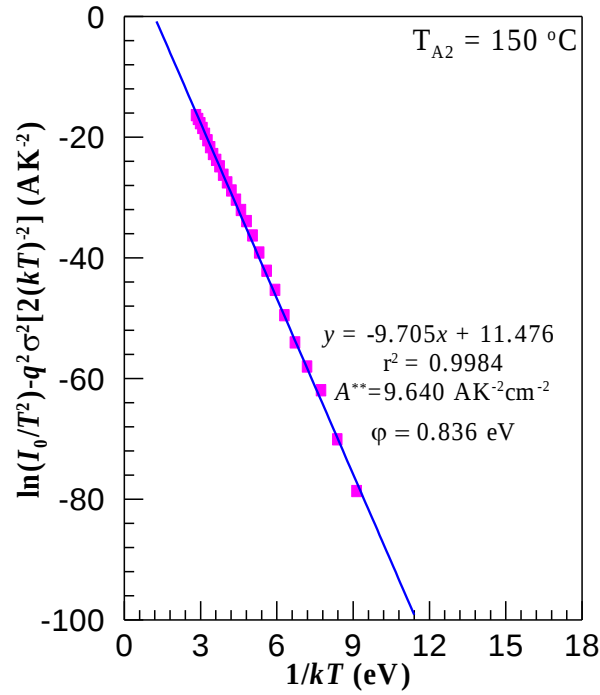
Şekil 4.52. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS (D6) yapısı için SGDM göre φ_{ap} - ve n_{ap} - q/kT çizimi



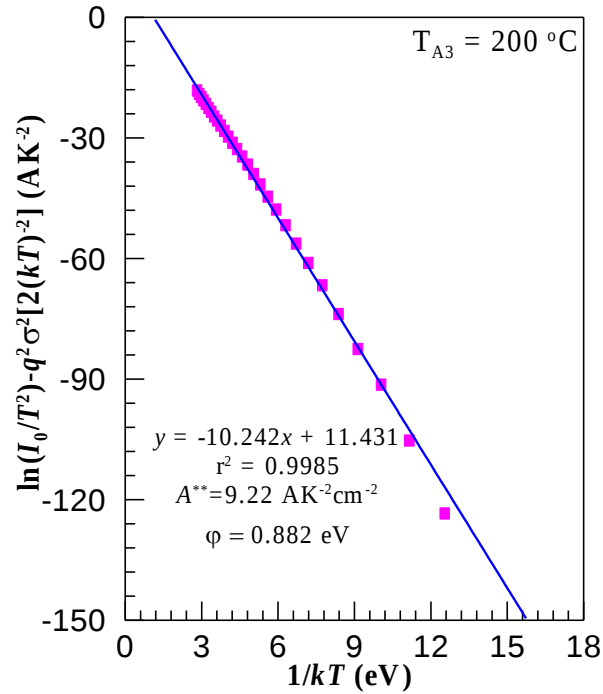
Şekil 4.53. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS (D6) yapısı için SGDM göre ϕ_{ap} - ve n_{ap} - q/kT çizimi



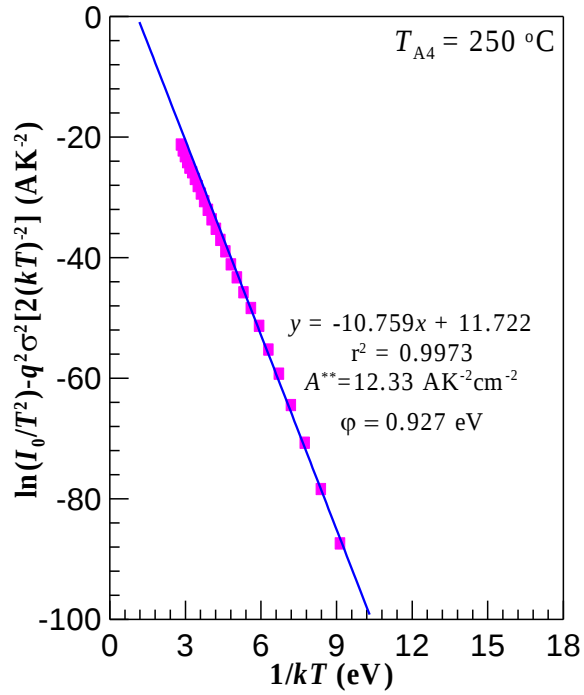
Şekil 4.54. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS (D6) yapısı için SGDM göre ϕ_{ap} - ve n_{ap} - q/kT çizimi



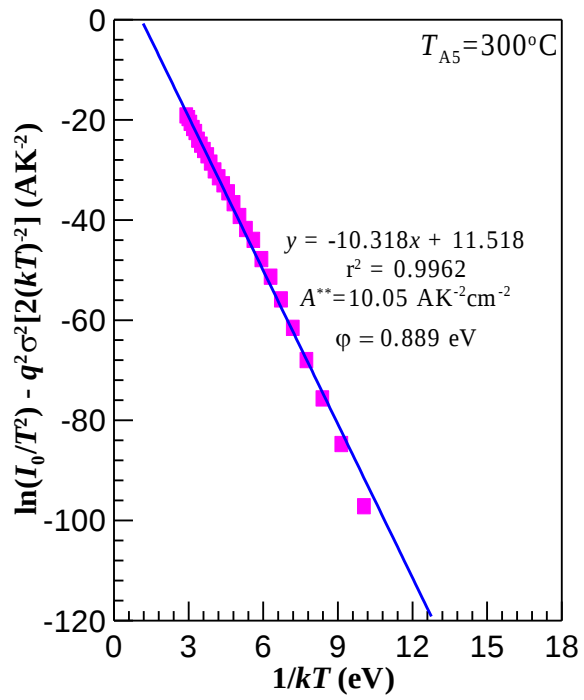
Şekil 4.55. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış Au/*p*-TlInS₂/*n*-InP PS (D6) yapısı için SGDM göre $[\ln(I_0/T^2) - q^2 \sigma^2 / 2(kT)^2] - 1000/T$ çizimi



Şekil 4.56. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/*p*-TlInS₂/*n*-InP PS (D6) yapısı için SGDM göre $[\ln(I_0/T^2) - q^2 \sigma^2 / 2(kT)^2] - 1000/T$ çizimi



Şekil 4.57. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS (D6) yapısı için SGDM göre $[\ln(I_0/T^2) - q^2 \sigma^2 / 2(kT)^2] - 1000/T$ çizimi

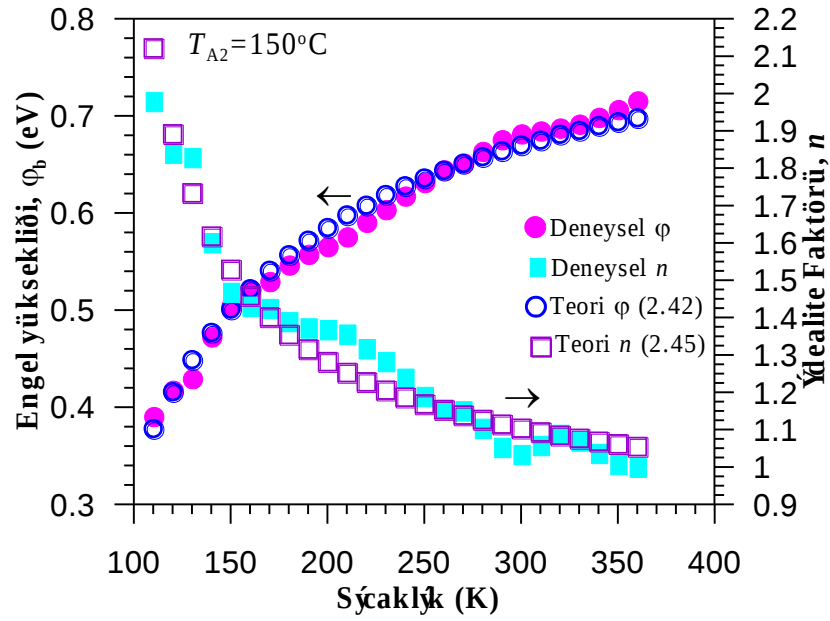


Şekil 4.58. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS (D6) yapısı için SGDM göre $[\ln(I_0/T^2) - q^2 \sigma^2 / 2(kT)^2] - 1000/T$ çizimi

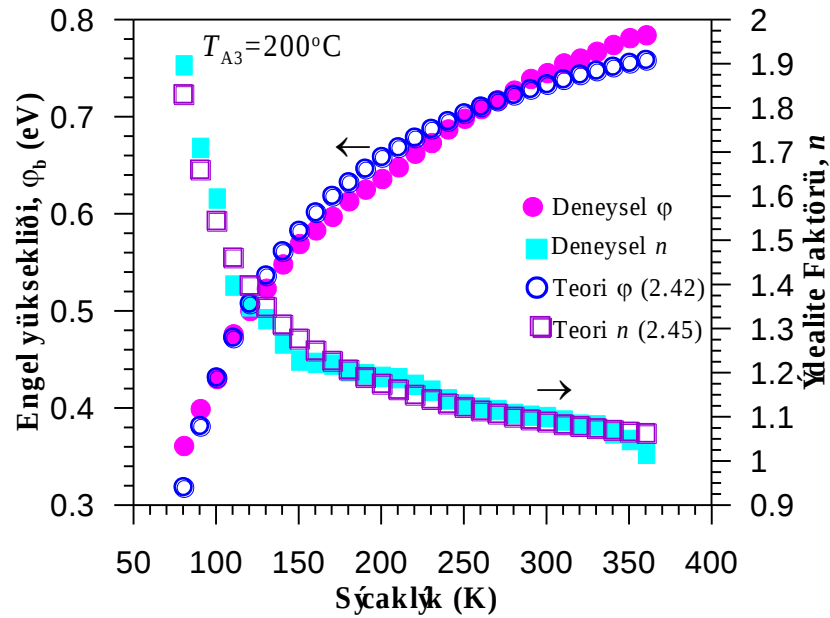
Bu çizimlerden, T_{A2} , T_{A3} , T_{A4} ve T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS (D6) yapılarına ait aktivasyon enerjisi ve Richardson sabiti (A^{**}) değerleri sırasıyla 0.836eV; 9.64 AK⁻²cm⁻², 0.882eV; 9.22 AK⁻²cm⁻², 0.927 eV; 12.33AK⁻²cm⁻², 0.889 eV; 10.05 AK⁻²cm⁻² olarak elde edildi. Her bir tavlama işlemi için elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri Şekil 4.51, 52, 53 ve 54’de verilen $\phi_{ap} - q/2kT$ çiziminden elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri (0.848eV, 0.885 eV, 1.038eV ve 0.860 eV) ile karşılıklı olarak hemen hemen uyum içerisindedir. Aynı şekilde, elde edilen A^{**} değerlerinin de n-InP için bilinen teorik Richardson sabiti A^* (=9.40 AK⁻²cm⁻²) değeri ile hemen hemen uyumlu olduğu görülebilir.

T_{A2-5} tavlama işlemi uygulanmış yapılara ait $\phi_{ap} - q/2kT$ çizimlerinden (Şekil 4.51-54) elde edilen fit parametreleri (ϕ_0 ve σ_0) (2.42) eşitliğinde yerine yazılarak her bir yapıya ait sıcaklığa bağlı teorik EY değerleri elde edilebilir. Benzer şekilde, $n_{ap} - q/2kT$ çizimlerinden elde edilen voltaj katsayıları (ρ_2 ve ρ_3) da (2.45) eşitliğinde yerine yazılarak her bir yapıya ait teorik idealite faktörü değerleri de elde edilebilir. Şekil 4.59-62’deki içi boş sembollersıcaklığa bağlı teorik olarak hesaplanmış ϕ_{ap} ve n_{ap} değişimlerini temsil etmektedir. Bu çizimlerden görüleceği üzere, ilgilenilen sıcaklık aralığında EY’nin SGDM’ne göre teorik olarak hesaplanmış ϕ_{ap} ve n_{ap} parametrelerinin deneysel değerlerle uyumu çok iyi değildir. Hatta Şekil 4.55-58’de verilen $[\ln(I_0/T^2) - q^2\sigma^2/2(kT)^2] - 1000/T$ modifiye Richardson çizimlerinde belirli sıcaklığın altında ve üstünde olmak üzere lineer iki bağımsız bölgenin mevcut olduğu görülmektedir.

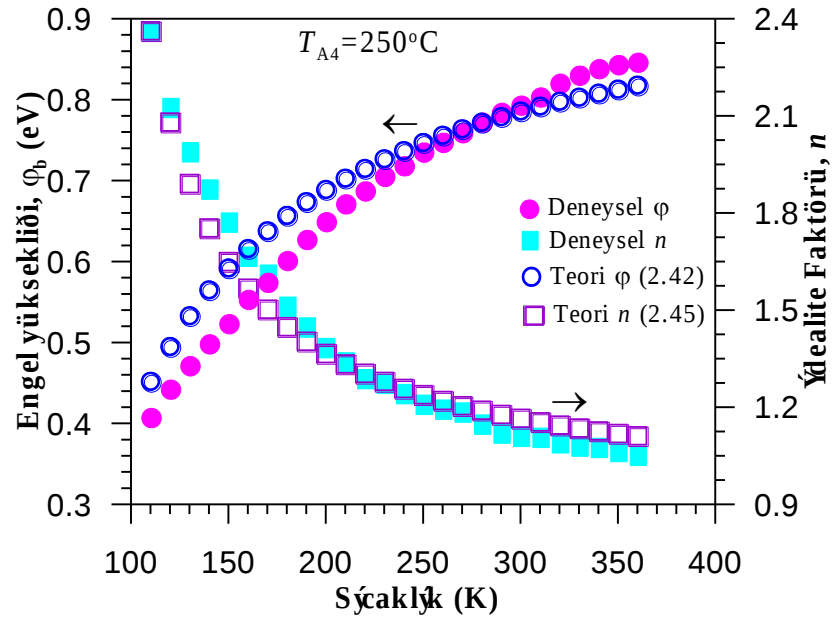
Bu yüzden, EY’nin ikili GDM (DGDM) dikkate alınarak T_{A3} , T_{A4} ve T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapıları için sıcaklığa bağlı incelemeler tekrar ele alınmalıdır. Bu durum da, (2.41) eşitliği şu şekilde tekrar yazılabilir (Jiang *et al.* 2001; Huang and Lu 2005; Gülnahar and Efeoğlu 2009; Cimilliet *al.* 2010; Abayet *al.* 2006, Abay 2010):



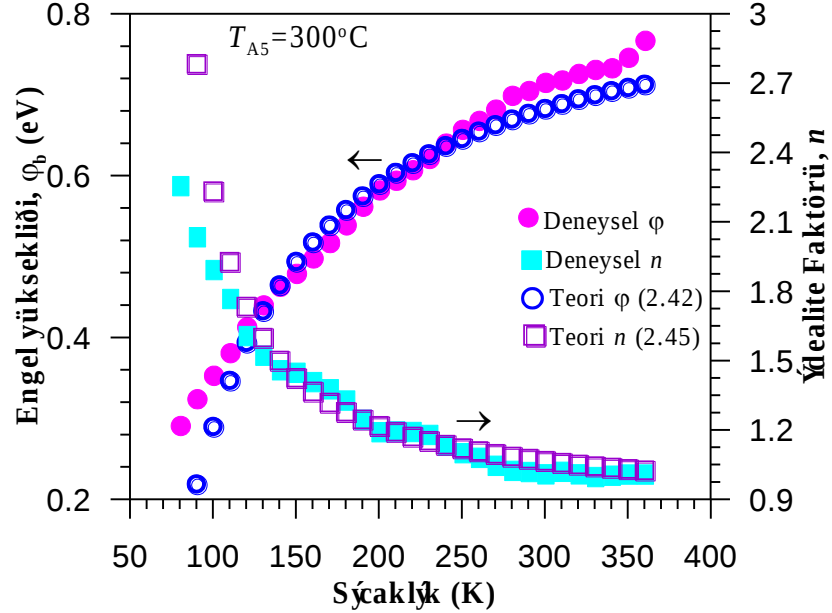
Şekil 4.59. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS (D6) yapısı için deneysel ve SGDM göre teorik olarak hesaplanmış idealite faktörü ve EY'nin sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.60. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP (D6) yapısı için deneysel ve SGDM göre teorik olarak hesaplanmış idealite faktörü ve EY'nin sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.61. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP (D6) yapısı için deneysel ve SGDM göre teorik olarak hesaplanmış idealite faktörü ve EY'nin sıcaklıkla değişimi



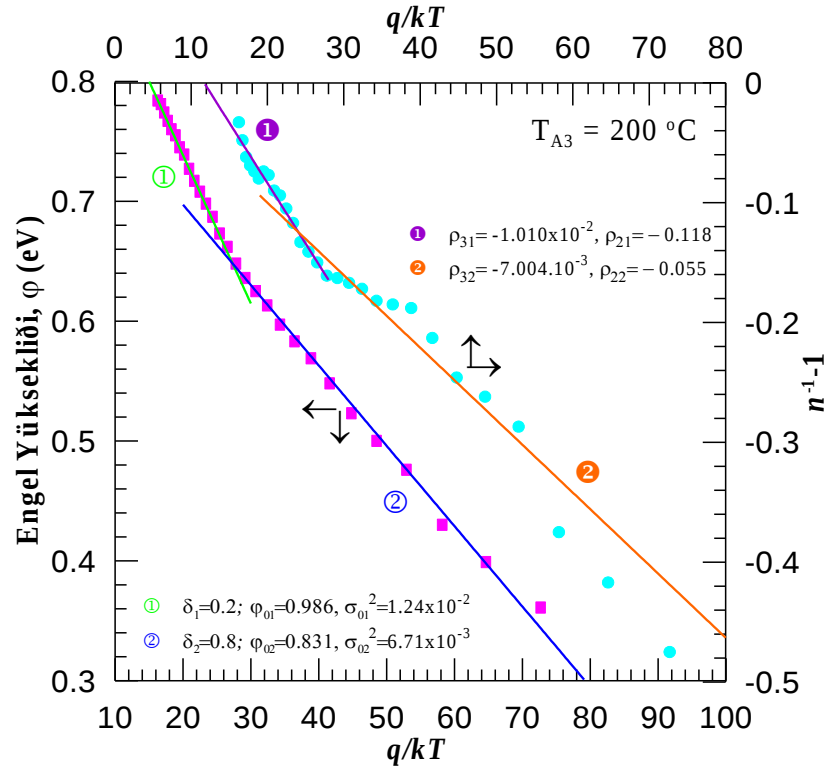
Şekil 4.62. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS (D6) yapısı için deneysel ve SGDM göre teorik olarak hesaplanmış idealite faktörü ve EY'nin sıcaklıkla değişimi

$$\varphi_{ap} = \frac{kT}{q} \ln \left[\delta_1 \exp \left(\frac{q\bar{\varphi}_{01}}{kT} - \frac{1}{2} \left(\frac{q\sigma_{01}}{kT} \right)^2 \right) + \delta_2 \exp \left(\frac{q\bar{\varphi}_{02}}{kT} - \frac{1}{2} \left(\frac{q\sigma_{02}}{kT} \right)^2 \right) \right]. \quad (4.8)$$

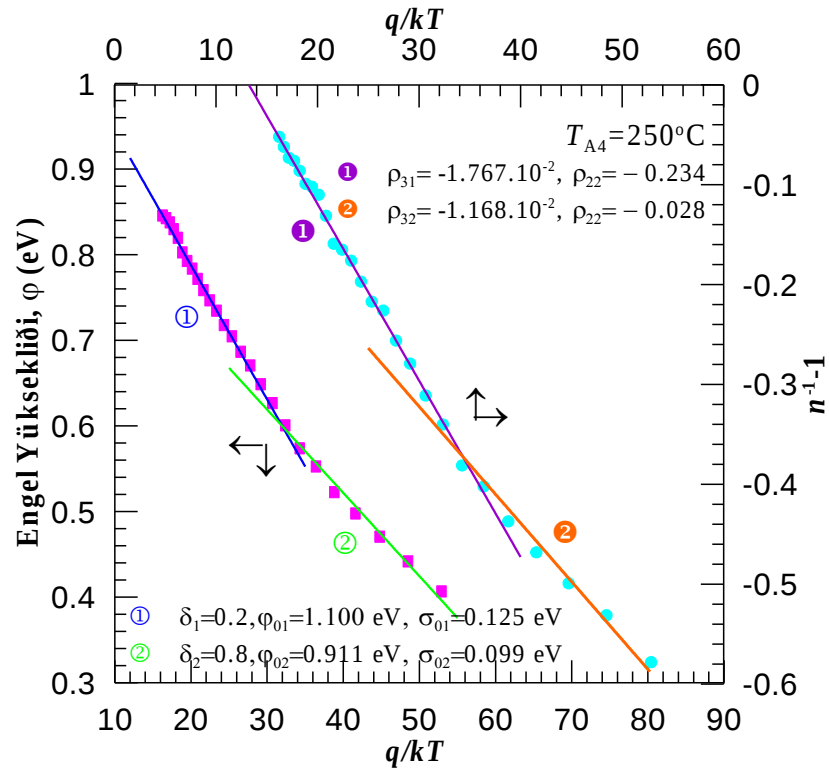
Eğer idealite faktörü $n_{ap} - q/2kT$ çizimi de görünür EY'ne benzer şekilde ikili bir değişim gösteriyorsa, aynı şekilde DGDM kullanılarak idealite faktörü için de aşağıdaki eşitlik kullanılabilir (Abay *et al.* 2006; Abay 2010):

$$\frac{1}{n_{ap}(V, T)} - 1 = \frac{kT}{qV} \ln \left[\exp \left\{ \frac{q}{kT} \left(\frac{q\rho_{31}V}{2kT} - \rho_{21}V \right) \right\} + \exp \left\{ \frac{q}{kT} \left(\frac{q\rho_{32}V}{2kT} - \rho_{22}V \right) \right\} \right]. \quad (4.9)$$

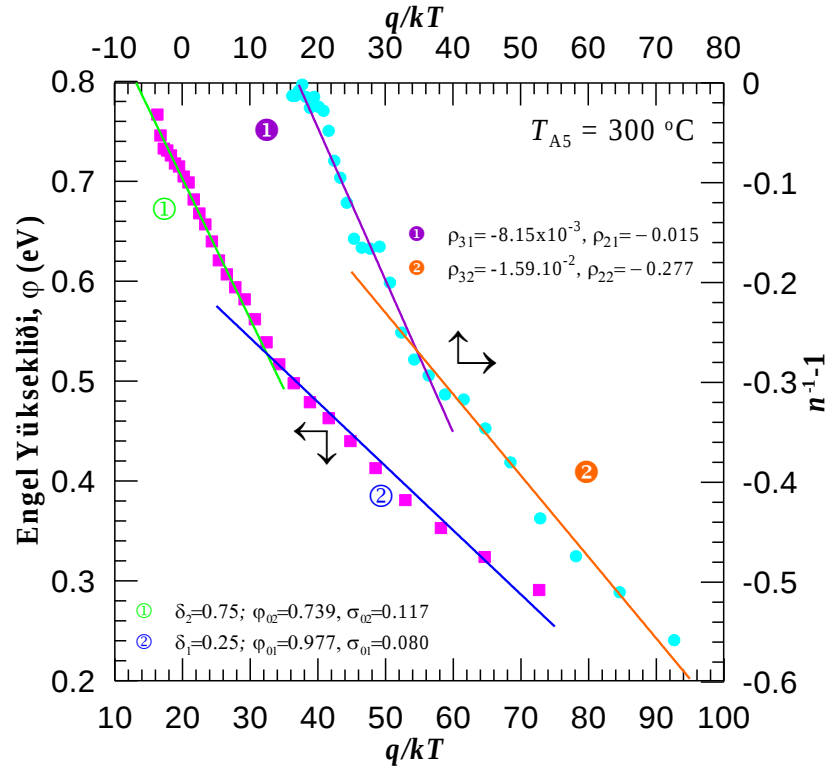
EY'nin DGDM göz önünde bulundurularak oluşturulmuş $\varphi_{ap} - q/2kT$ ve $n_{ap} - q/2kT$ çizimlerine Şekil 4.63, 64 ve 65'de yer verilmiştir. Bu çizimlerden görüldüğü üzere φ_{ap} ve n_{ap} değişimleri belli bir sıcaklık değerinin altında ve üstünde iki farklı eğime sahiptirler. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış yapıya ait $\varphi_{ap} - q/2kT$ çiziminden 360-240 ve 240-80 K sıcaklık aralığındaki bölgelere en küçük kareler yöntemi kullanılarak yapılan lineer fitlerin eğim ve kesim noktalarından belirlenen ortalama EY ve onların standart sapmaları sırasıyla $\bar{\varphi}_{b01} = 0.986$ eV; $\sigma_{s01} = 0.111$ eV ve $\bar{\varphi}_{b02} = 0.831$ eV; $\sigma_{s02} = 0.082$ eV olarak belirlendi. Benzer işlemler neticesinde T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış yapıya ait fit parametreleri (360-200 ve 200-110 K aralığında) sırasıyla $\bar{\varphi}_{b01} = 1.100$ eV; $\sigma_{s01} = 0.125$ eV ve $\bar{\varphi}_{b02} = 0.911$ eV; $\sigma_{s02} = 0.099$ eV olarak, T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış yapıya ait fit parametreleri ise (360-200 ve 200-80 K aralığında) sırasıyla $\bar{\varphi}_{b01} = 0.977$ eV; $\sigma_{s01} = 0.117$ eV ve $\bar{\varphi}_{b02} = 0.739$ eV; $\sigma_{s02} = 0.080$ eV olarak belirlendi. $\bar{\varphi}_{b0}$ ve σ_{s0} değerleri birbirleri ile kıyaslandığında, standart sapmanın ortalama EY'nin $\approx$ %9.40-12.0'si civarında olduğu görülmektedir. Standart sapma engel homojenliğinin bir ölçüsü olduğundan, standart sapma ne kadar düşük olursa homojen engel yüksekliğine



Şekil 4.63. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS (D6) yapısı için DGDM göre φ_{ap} - ve n_{ap} - q/kT çizimi



Şekil 4.64. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS (D6) yapısı için DGDM göre φ_{ap} - ve n_{ap} - q/kT çizimi



Şekil 4.65. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS (D6) yapısı için DGDM göre φ_{ap} - ve $n_{\text{ap}} - q/kT$ çizimi

o kadar çok yaklaşılır. σ_{s0} değerlerinin $\bar{\varphi}_{b0}$ 'ye nazaran küçük olması, ara yüzeyde homojen olmayan durumu ifade eder.

Diğer taraftan, Şekil 4.63'de verilen T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış yapıya ait $n_{\text{ap}} - q/2kT$ çiziminden 360-240 ve 240-80 K sıcaklık aralığındaki bölgelere en küçük kareler yöntemi kullanılarak yapılan lineer fitlerin eğim ve kesim noktalarından belirlenen voltaj (gerilim) katsayıları sırasıyla $\rho_{21} = -0.118$; $\rho_{31} = -1.010 \times 10^{-2}$ eV ve $\rho_{22} = -0.055$; $\rho_{32} = -7.001 \times 10^{-3}$ eV büyüklüğündedir. Benzer işlemler neticesinde T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış yapıya ait voltaj katsayıları (360-200 ve 200-110 K aralığında) sırasıyla $\rho_{21} = -0.234$; $\rho_{31} = -1.767 \times 10^{-2}$ eV ve $\rho_{22} = -0.028$; $\rho_{32} = -1.168 \times 10^{-2}$ eV olarak, T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış yapıya ait voltaj katsayıları ise (360-200 ve 200-80 K aralığında) sırasıyla $\rho_{21} = -0.277$;

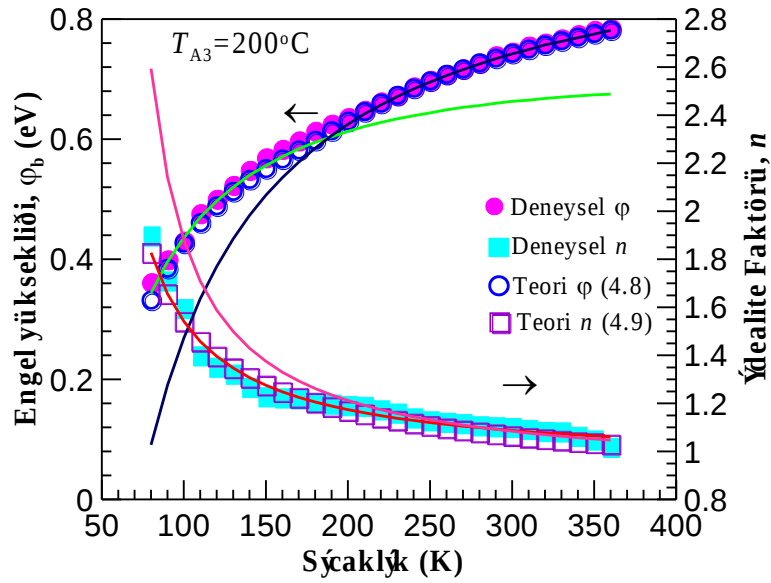
$\rho_{31} = -1.592 \times 10^{-2} \text{ eV}$ ve $\rho_{22} = -0.015$; $\rho_{32} = -8.149 \times 10^{-3} \text{ eV}$ olarak belirlendi.

$n_{ap} - q/2kT$ çizimlerinin incelenen sıcaklık aralığındaki lineer davranışı, idealite faktörünün sıcaklıkla değişimine Gauss dağılımlı Schottky engelindeki voltaj deformasyonunun sebep olduğunu gösterir.

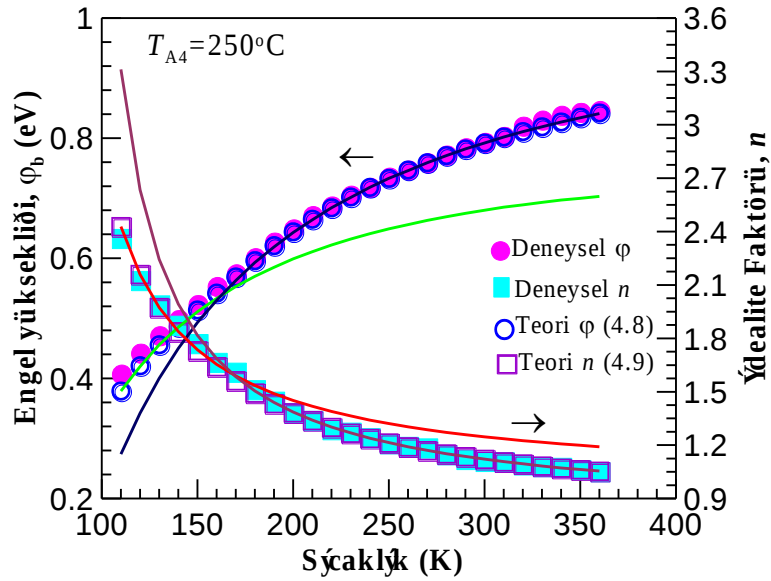
Böylelikle, T_{A3}, T_{A4} ve T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış yapılara ait $\varphi_{ap} - q/2kT$ çizimlerinden elde edilen fit parametreleri ($\varphi_{01}, \sigma_{01}, \varphi_{02}, \sigma_{02}$) ve δ_1 ve $\delta_2 (=1 - \delta_1)$ GD ağırlık katsayıları (4.8) eşitliğinde yerine yazılarak her bir yapıya ait sıcaklığa bağlı teorik EY değerleri elde edilebilir. Benzer şekilde, T_{A3}, T_{A4} ve T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış yapılara ait $n_{ap} - q/2kT$ çizimlerinden elde edilen voltaj katsayıları ($\rho_{21}, \rho_{22}, \rho_{31}$ ve ρ_{32}) (4.9) eşitliğinde yerine yazılarak her bir yapıya ait teorik idealite faktörü değerleri elde edilebilir. Şekil 4.66-68'deki sürekli çizgiler, iki farklı bölge için sıcaklığa bağlı teorik olarak hesaplanmış φ_{ap} ve n_{ap} değişimlerini, içi boş semboller ise toplam değişimleri temsil etmektedir. Bu çizimlerden görüleceği üzere, ilgilenilen sıcaklık aralığında teorik olarak hesaplanmış φ_{ap} ve n_{ap} parametreleri deneysel değerlerle mükemmele yakın bir uyum içerisinde.

(4.9) denklemi dikkate alındığında azalan sıcaklıkla birlikte idealite faktörünün artışıdaki baskın rolün ρ_3 voltaj katsayısının negatifliğinden kaynaklandığı söylenebilir. Aynı zamanda ρ_2 katsayısının da negatif oluşu, uygulama gerilimi arttıkça EY'nin ve dolayısıyla onun standart sapmasının azaldığını belirtir. Bu sonuçlar, uygulama geriliminin EY'deki dalgalanmaları homojenize ettiğini (uygulama voltajı ne kadar artarsa engel yüksekliğindeki dalgalanma da o kadar daralır) belirtir. Bu durum, uygulama gerilimi artışıyla etkin engelin maksimumunun yarıiletken gövde içine doğru kaydığı ve böylece engelin homojen bir dağılıma sahip olduğu şeklinde açıklanabilir. Şekil 4.66, 4.67 ve 4.68'de idealite faktörü ve EY'nin sıcaklıkla değişimleri verilmiştir. Çizimlerde içi boş sembollerle gösterilen değişimler EY'nin DGDM'ne göre (4.8) ve (4.9) denklemleri kullanılarak elde edilen teorik değerlerini temsil etmektedir. Deneysel değerler ile DGDM kullanılarak elde edilen değerler birbiri ile oldukça uyum

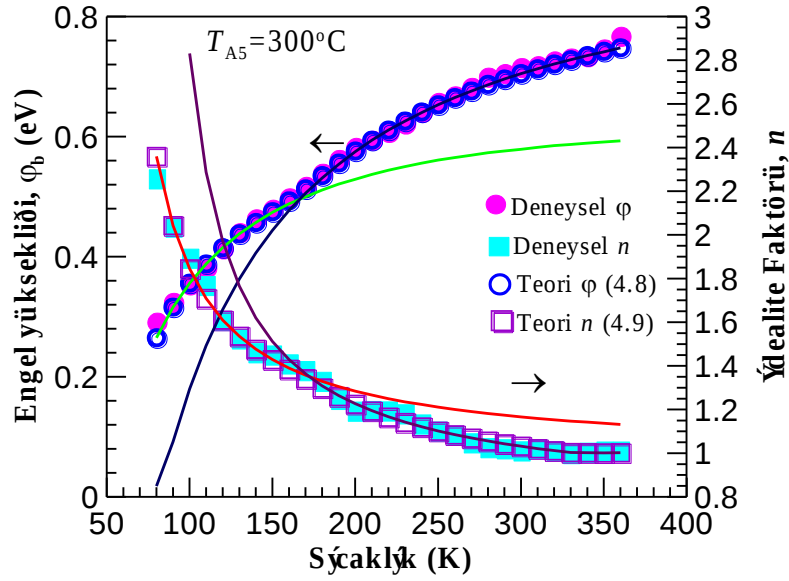
içerisindedirler. Böylece, incelenen $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS yapısının karakterizasyonu için kullanılan DGDM'nin engel inhomojenliği kavramını uygun bir şekilde açıkladığını söyleyebiliriz.



Şekil 4.66. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS (D6) yapısı için deneysel ve DGDM göre teorik olarak hesaplanmış idealite faktörü ve EY'nin sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.67. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS (D6) yapısı için deneysel ve DGDM göre teorik olarak hesaplanmış idealite faktörü ve EY'nin sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.68. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP (D6) yapısı için deneysel ve DGDM göre teorik olarak hesaplanmış idealite faktörü ve EY'nin sıcaklıkla değişimi

Yukarıda bahsedildiği gibi homojen olmayan engelden ötürü $\ln(I_0/T^2) - 1000/T$ geleneksel Richardson çizimi de çoğu zaman düşük sıcaklıklarda lineerlikten sapma gösterir. Bu sapma nedeniyle EY'nin DGDM'ne göre (2.41) ve (2.42) eşitlikleri birleştirilerek modifiye Richardson ifadesi için,

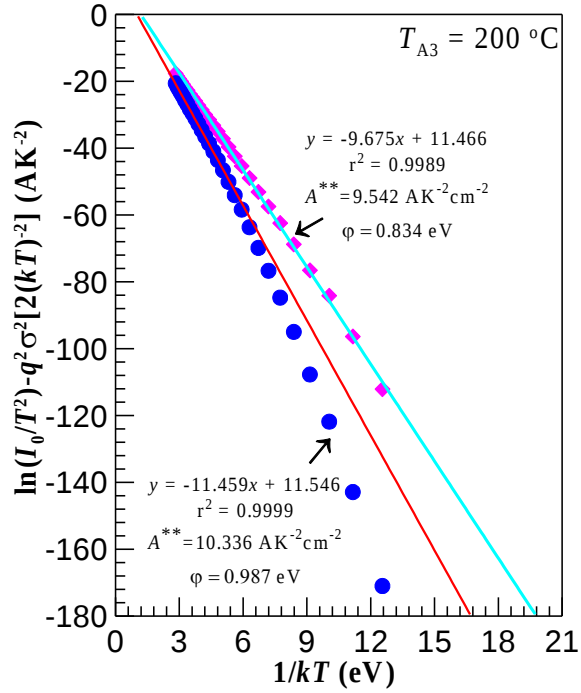
$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) = \ln A^* + \ln \sum_{i=1}^N \delta_i \exp\left[-\frac{q\phi_{b0i}}{kT} + \frac{1}{2}\left(\frac{q\sigma_{0i}}{kT}\right)^2\right] \quad (4.10)$$

eşitliği elde edilir. EY'nin DGDM için her bir sıcaklık bölgesi için elde edilen $[\ln(I_0/T^2) - q^2\sigma^2/2(kT)^2] - 1000/T$ değişiminin fitinin eğiminden sıfır beslem ortalama EY ϕ_0 , kesim noktasından ise modifiye Richardson sabiti A^{**} değeri elde edilir.

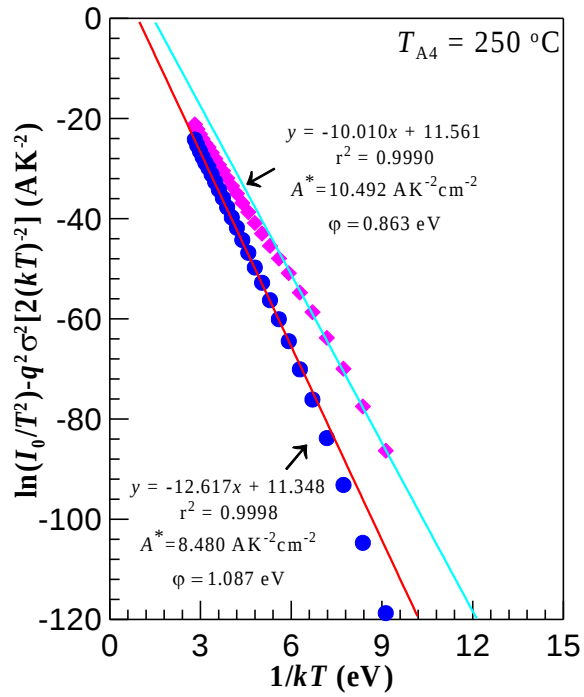
Şekil 4.31, 4.32, 4.33, 4.34 ile verilen geleneksel Richardson çizimlerinde özellikle düşük sıcaklık bölgesinde bükülme meydana geldiği gözlenmiştir. Homojen olmayan engel etkisinden dolayı geleneksel Richardson çiziminde görülen bu bükülme modifiye

edilmiş Richardson grafiği çizilerek giderilebilir. Bunun için DGDM göre verilen (4.10) eşitliği kullanılabilir:

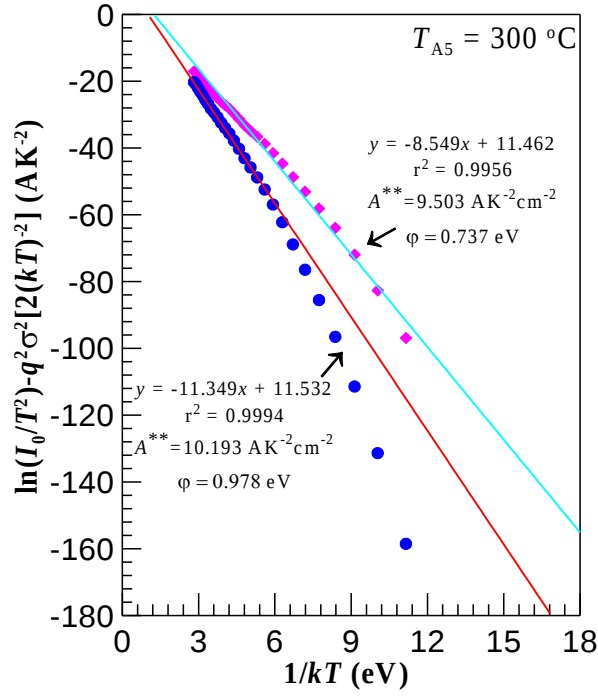
Şekil 4.69, 4.70, 4.71’de EY’nin DGDM göre T_{A3} , T_{A4} ve T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS (D6) yapısı için sırasıyla (360-240; 240-80 K), (360-200; 200-110 K) ve (360-200; 200-80 K) sıcaklık bölgelerinde modifiyeRichardson çizimlerine $([\ln(I_0/T^2) - q^2\sigma^2/2(kT)^2] - 1000/T)$ yer verilmiştir. Bu çizimler, ilgili sıcaklık bölgelerinde lineer değişim sergilemektedirler. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış yapıya ait modifiyeRichardson çiziminde 360-240 ve 240-80 K sıcaklık aralığındaki bölgelere en küçük kareler yöntemi kullanılarak yapılan lineer fitlerin eğim ve kesim noktalarından belirlenen aktivasyon enerjisi ve A^{**} Richardson sabiti değerleri sırasıyla 0.987, 0.834 eV ve 10.336, 9.542 $\text{AK}^{-2}\text{cm}^{-2}$ olarak belirlendi. Benzer işlemler neticesinde T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış yapı için aktivasyon enerjisi ve A^{**} Richardson sabiti değerleri (360-200 ve 200-110 K aralığında) sırasıyla 1.087, 0.863 eV ve 8.48, 10.49 $\text{AK}^{-2}\text{cm}^{-2}$ olarak; T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış yapı için ise (360-200 ve 200-80 K aralığında) sırasıyla 0.987, 0.737 eV ve 10.19, 9.50 $\text{AK}^{-2}\text{cm}^{-2}$ olarak belirlendi. Her bir tavlama işlemi için elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri Şekil 4.63-65’de verilen $\phi_{ap} - q/2kT$ çizimlerinden elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri (0.986-0.831 eV, 1.100-0.911 eV ve 0.977-0.739 eV) ile karşılıklı olarak uyum içerisindedir. Diğer taraftan, elde edilen A^{**} değerlerinin de n-InP için bilinen etkin Richardson sabiti A^* ($=9.40 \text{ AK}^{-2}\text{cm}^{-2}$) değeri ile mükemmel sayılabilecek bir uyuma sahiptir.



Şekil 4.69. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS (D6) yapısı için $[\ln(I_0/T^2) - q^2\sigma^2/2(kT)^2] - 1000/T$ çizimi



Şekil 4.70. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS (D6) yapısı için $[\ln(I_0/T^2) - q^2\sigma^2/2(kT)^2] - 1000/T$ çizimi



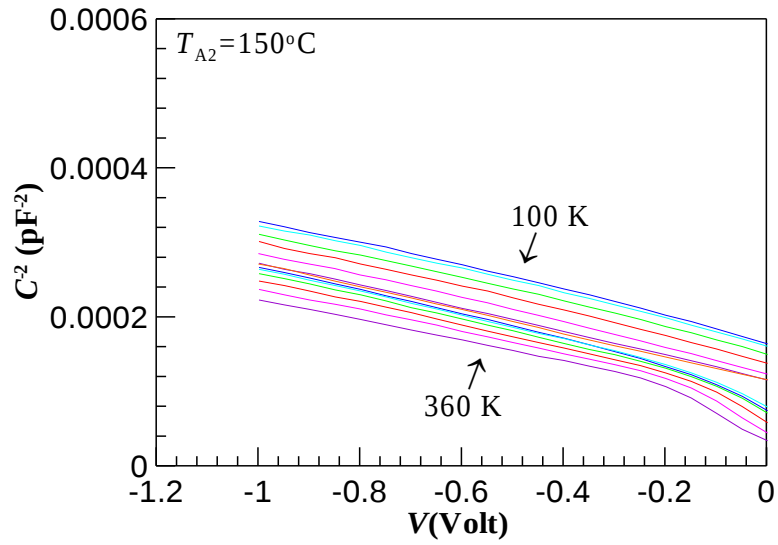
Şekil 4.71. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS (D6) yapısı için $[\ln(I_0/T^2) - q^2 \sigma^2 / 2(kT)^2] - 1000/T$ çizimi

4.9. Ters Beslem Kapasite-Gerilim ($C-V$) Karakteristiklerinden Sıcaklığa Bağlı Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi

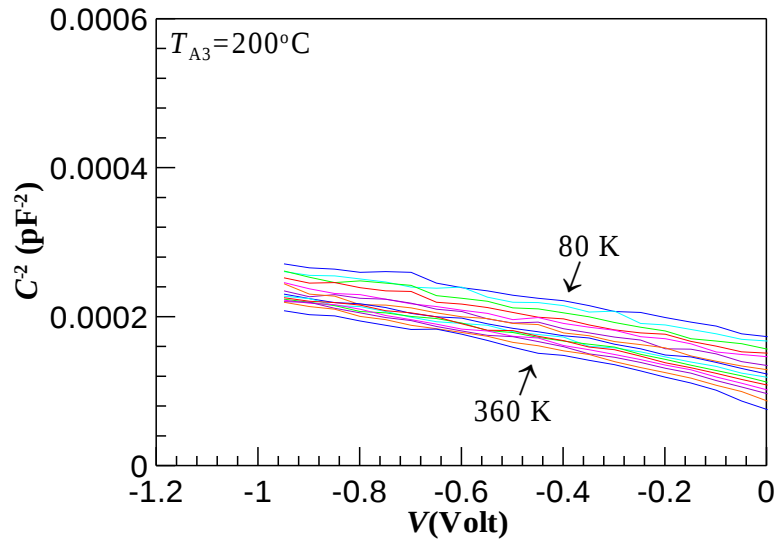
T_{A2-5} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS yapılarının ters beslem $C-V$ karakterizasyonu 5 MHz uygulama frekansında ve 10 mV osilasyon geriliminde 20 K sıcaklık adımları ile -2.00-0.00 V aralığında yapıldı.

$C^{-2} - V$ değişimleri Şekil 4. 72, 73, 74 ve 75’de verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi azalan sıcaklıkla kapasite değerleri azalmaktadır. $C^{-2} - V$ çizimleri incelenen gerilim aralığında bütün sıcaklıklar için hemen hemen lineer bir değişime sahiptirler. Her bir sıcaklık için ekstrapole edilmiş $C^{-2} - V$ çizimlerinin voltaj eksenini kesim noktası ve eğimlerinden sırasıyla V_d ve N_d değerleri elde edildi. Bu değerler (4.4) ve (4.5) denkleminde yerine konularak $\phi_{b(C-V)}$ ve $\phi_{b(C-V)}^d$ EY değerleri hesaplandı. Au/p-

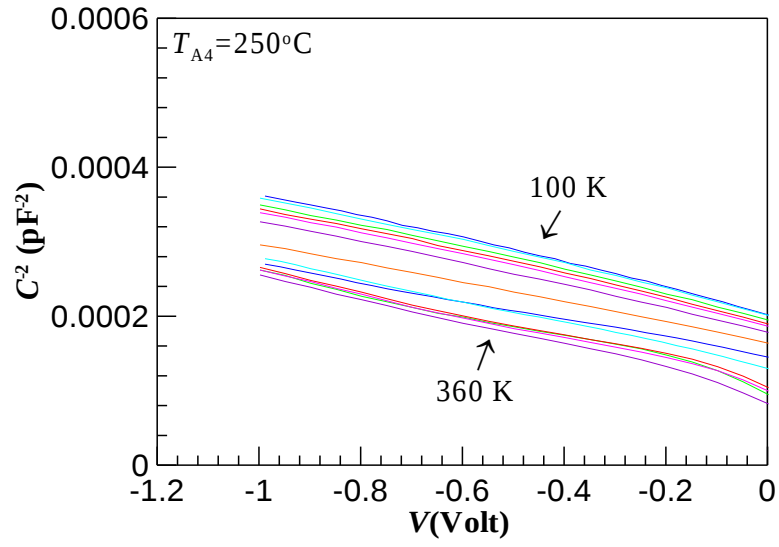
TlInS₂/n-InP PS yapısı için C-V karakterizasyonu ile elde edilen diyot parametreleri $\phi_{b(C-V)}$, $\phi_{b(C-V)}^d$, E_f , V_d , N_c ve N_d değerleri Çizelge 4.9, 4.10, 4.11 ve 4.12’de verilmiştir.



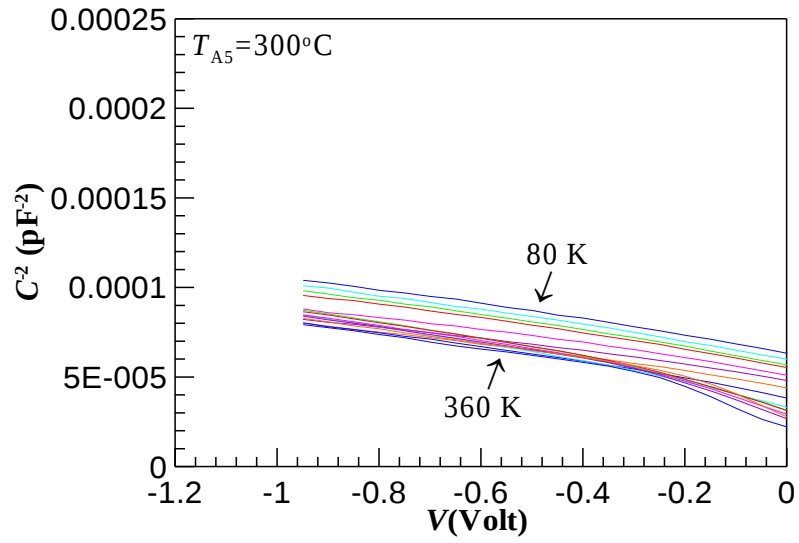
Şekil 4.72. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapısının sıcaklığa bağlı C^2 -V çizimleri



Şekil 4.73. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapısının sıcaklığa bağlı C^2 -V çizimleri



Şekil 4.74. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapısının sıcaklığa bağlı C^2 - V çizimleri



Şekil 4.75. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapısının sıcaklığa bağlı C^2 - V çizimleri

Çizelge 4.9. T_{A2} tavlama işlemi uygulanmış $Au/p-TlInS_2/n-InP$ PS yapısının sıcaklığa bağlı C-V karakteristiklerinden elde edilen diyot parametreleri

Sıcaklık (K)	C-V					
	E_f (eV)	V_d (V)	$\phi_{b(C-V)}$ (eV)	$\phi_{b(C-V)}^d$ (eV)	$N_d(\times 10^{15} \text{cm}^{-3})$	$N_c(\times 10^{17} \text{cm}^{-3})$
360	0.132	0.559	0.763	0.762	10.080	7.186
340	0.124	0.599	0.753	0.731	9.444	6.595
320	0.116	0.613	0.756	0.717	9.095	6.022
300	0.107	0.605	0.738	0.707	8.691	5.467
280	0.097	0.635	0.756	0.696	0.672	4.929
260	0.088	0.620	0.73	0.647	8.500	4.411
240	0.072	1.356	1.448	1.186	12.260	3.912
220	0.069	0.759	0.847	0.664	9.099	3.433
200	0.061	0.781	0.859	0.649	8.704	2.976
180	0.052	0.889	0.957	0.707	8.808	2.541
160	0.044	0.983	1.041	0.744	8.935	2.129
140	0.036	1.037	1.085	0.696	8.826	1.743
120	0.029	1.050	1.089	0.609	8.738	1.383
100	0.021	1.122	1.152	0.555	8.781	1.052

Çizelge 4.10. T_{A3} tavlama işlemi uygulanmış $Au/p-TlInS_2/n-InP$ PS yapısının sıcaklığa bağlı C-V karakteristiklerinden elde edilen diyot parametreleri

Sıcaklık (K)	C-V					
	E_f (eV)	V_d (V)	$\phi_{b(C-V)}$ (eV)	$\phi_{b(C-V)}^d$ (eV)	$N_d(\times 10^{15} \text{cm}^{-3})$	$N_c(\times 10^{17} \text{cm}^{-3})$
360	0.128	0.779	0.939	0.924	1.144	7.186
340	0.118	0.896	1.043	0.988	1.188	6.595
320	0.110	0.819	0.957	0.892	1.109	6.022
300	0.100	0.880	1.006	0.924	1.137	5.467
280	0.092	0.866	0.982	0.897	1.086	4.929
260	0.082	0.921	1.026	0.925	1.121	4.411
240	0.073	0.971	1.065	0.944	1.141	3.912
220	0.066	0.942	1.027	0.887	1.071	3.433
200	0.057	0.967	1.041	0.885	1.064	2.976
180	0.051	0.879	0.946	0.796	0.928	2.541
160	0.040	1.220	1.273	1.049	1.193	2.129
140	0.033	1.235	1.28	1.018	1.169	1.743
120	0.026	1.287	1.323	0.987	1.166	1.383
100	0.019	1.367	1.395	0.884	1.170	1.052
80	0.014	1.268	1.289	0.688	1.040	0.754

Çizelge 4.11. T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapısının sıcaklığa bağlı C-V karakteristiklerinden elde edilen diyot parametreleri

Sıcaklık (K)	C-V					
	$E_f(\text{eV})$	$V_d(\text{V})$	$\phi_{b(C-V)}(\text{eV})$	$\phi_{b(C-V)}^d(\text{eV})$	$N_d(\times 10^{15} \text{cm}^{-3})$	$N_c(\times 10^{17} \text{cm}^{-3})$
360	0.136	0.625	0.791	0.760	9.056	7.186
340	0.125	0.718	0.873	0.821	9.288	6.595
320	0.115	0.748	0.891	0.828	9.314	6.022
300	0.106	0.711	0.843	0.771	9.186	5.467
280	0.093	0.928	1.045	0.924	10.310	4.929
260	0.084	1.032	1.138	0.969	10.580	4.411
240	0.077	1.104	1.202	0.985	9.511	3.912
220	0.069	1.166	1.254	0.991	9.168	3.433
200	0.060	1.257	1.333	0.983	9.328	2.976
180	0.050	1.394	1.459	0.986	9.922	2.541
160	0.042	1.428	1.484	0.912	9.910	2.129
140	0.035	1.457	1.504	0.824	9.786	1.743
120	0.028	1.438	1.476	0.714	9.589	1.383
100	0.021	1.505	1.534	0.625	9.583	1.052

Çizelge 4.12. T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapısının sıcaklığa bağlı C-V karakteristiklerinden elde edilen diyot parametreleri

Sıcaklık (K)	C-V					
	$E_f(\text{eV})$	$V_d(\text{V})$	$\phi_{b(C-V)}(\text{eV})$	$\phi_{b(C-V)}^d(\text{eV})$	$N_d(\times 10^{15} \text{cm}^{-3})$	$N_c(\times 10^{17} \text{cm}^{-3})$
360	0.168	0.873	1.001	0.991	3.158	7.186
340	0.157	0.866	0.985	0.979	3.065	6.595
320	0.146	0.869	0.979	0.968	3.015	6.022
300	0.135	0.842	0.944	0.933	2.902	5.467
280	0.124	0.868	0.96	0.936	2.926	4.929
260	0.112	0.868	0.951	0.884	2.970	4.411
240	0.101	0.807	0.881	0.785	2.967	3.912
220	0.090	0.864	0.928	0.787	3.058	3.433
200	0.081	0.861	0.919	0.779	2.759	2.976
180	0.070	0.959	1.008	0.769	2.870	2.541
160	0.060	0.980	1.023	0.736	2.710	2.129
140	0.051	0.967	1.003	0.696	2.556	1.743
120	0.042	0.999	1.027	0.648	2.485	1.383
100	0.033	0.997	1.019	0.567	2.402	1.052
80	0.023	0.996	1.01	0.471	2.567	0.754

5. SONUÇ

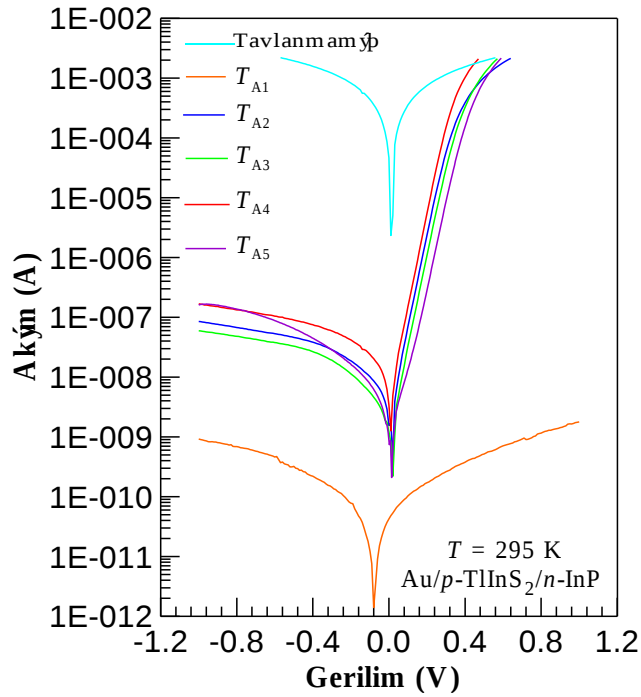
n-InP Schottky diyotlar yüksek hız ve güç yoğunluğu gerektiren elektronik ve opto-elektronik devre elemanlarının üretiminde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, metal/*n*-InP kontakların düşük engel yüksekliği ve yüksek sızıntı akımı sergilemeleri *n*-InP yarıiletkeninin bu alanlardaki kullanımını sınırlamaktadır. Metal/*n*-InP kontakların bu eksikliklerinin giderilmesi amacıyla birçok araştırmacı tarafından çok sayıda teknik uygulamaya konmuş ve bazılarında başarı sağlanmıştır. Küçük engel yüksekliği, büyük ters beslem sızıntı akımı ve oluşturulan devre elemanlarının kararlılıktan yoksun oluşu gibi problemlerin üstesinden gelmek amacıyla metal-yarıiletken arasında ince bir arayüzey tabakasının kasıtlı olarak oluşturulması Metal/*n*-InP yapılar üzerinde iyileştirici rol oynadığı bilinmektedir.

Bu çalışma, *n*-tipi InP'nin devre elamanı olarak kullanımını sınırlandıran problemlerin iyileştirilmesi amacıyla Au/*p*-TlInS₂/*n*-InP PS yapıların fabrikasyonu ve elektriksel karakterizasyonu üzerinedir. Au/*p*-TlInS₂/*n*-InP PS yapılarının imali için InPact-Sumitomo Electric şirketinden satın alınan, S katkılı ($n=1.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) 500 μm kalınlıklı (100) yönelimli *n*-tipi InP kristali kullanıldı. 2 inç çaplı yongadan kesilen yaklaşık 16.0x8.0 mm boyutlu numune gerekli kimyasal işlemler uygulanarak temizlendi. Omik kontak, numunenin mat yüzeyine Au:Ge metalizasyonu ve 400°C'de 3 dakika azot gazı akışı altında tavlama işlemi ile oluşturuldu. PS kontak imaline geçmeden önce omik kontağı tamamlanmış yonga ortadan ikiye bölünerek yaklaşık 8.0x8.0 mm boyutlarında altlıklar elde edildi. Bu altlıklardan biri üzerinde PS diyot imalatı için *n*-InP'tan ters tipte (*p*-tipi) TlInS₂ üçlü yarıiletken bileşigibiriktirildi. Referans Au/*n*-InP ve Au/*p*-TlInS₂/*n*-InP PS yapılarının imali için omik kontak işlemi tamamlanmış referans ve *p*-TlInS₂ film biriktirilmiş altlıklar üzerinde Au metalizasyonu ile 0.6 mm çapında Schottky (Doğrultucu) nokta kontaklar elde edildi.

Tavlamanmamış (referans) ve 100, 150, 200, 250 ve 300°C'de kümülatif tavlama işlemine tabi tutulmuş Au/*p*-TlInS₂/*n*-InP PS yapılarının elektriksel karakterizasyonu için oda sıcaklığında ve düşük sıcaklıklarda sıcaklığa bağlı *I*-*V* ve *C*-*V* ölçümleri

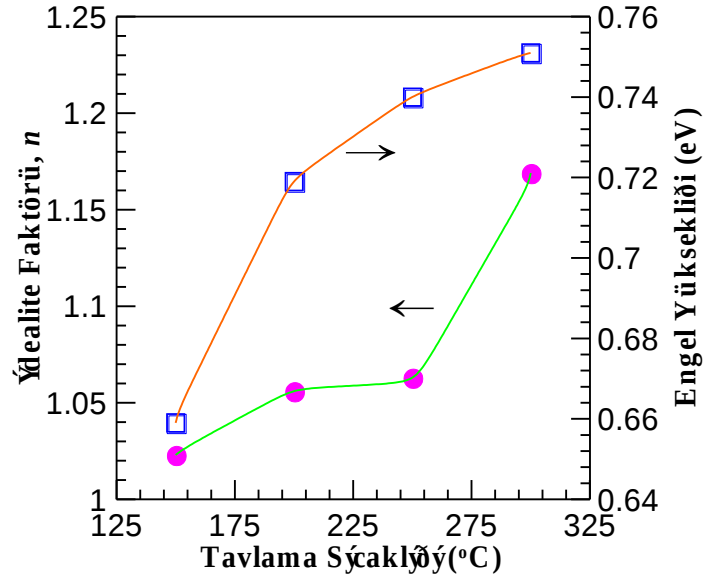
alındı. Tavlanmamış, T_{A1-5} tavlama işlemi uygulanmış $Au/p-TlInS_2/n-InP$ PS yapılarının oda sıcaklığında alınan $I-V$ karakteristiklerinin yarı-logaritmik çizimleri Şekil 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6'da verilmiştir. Şekil 4.1'den görüldüğü üzere tavlanmamış $Au/p-TlInS_2/n-InP$ yapılarının tamamı omik davranışa sahiptir. Bu yüzden, geleneksel $TlInS_2$ ara yüzeyli MY yapısının PS yapısına dönüşümünü sağlayacak ısı işlem basamakları uygulandı. $T_{A1}=100^\circ C$ tavlama işlemi ardından kaydedilen $I-V$ karakteristiklerinin hâlâ omik davranış sergilediği gözlemlendi (Şekil 4.2). Bunun üzerine $Au/p-TlInS_2/n-InP$ PS yapısını oluşturmak gayesiyle daha yüksek tavlama sıcaklığı/süresi basamakları uygulanarak kümülatif tavlama işlemi icra edildi. Tavlandıktan sonra N_2 gazı akışı altında oda sıcaklığına düşünceye kadar bekletilen $Au/p-TlInS_2/n-InP$ PS yapılarının $I-V$ ve $C-V$ ölçümleri ertesi günü oda sıcaklığında alındı. $T_{A2}=150^\circ C$ tavlama işlemi ardından $I-V$ karakteristiklerinin omik görünümünden uzaklaşarak doğrultucu davranışa geçtiği ve sızıntı akımında belli bir oranda azalma olduğu gözlemlendi. $Au/p-TlInS_2/n-InP$ PS yapılarından seçilmiş (D6) yapısının farklı sıcaklıklarda tavlama işlemi ardından kaydedilmiş $I-V$ karakteristiklerinden sızıntı akımının her bir tavlama işlemi ardından belli bir miktar azaldığı/arttığı, bununla birlikte ideal diyot davranışına yaklaştığı görülmektedir (Şekil 5.1).

Oda sıcaklığındaki $I-V$ karakteristiklerinden geleneksel TE yöntemiyle ((2.25) ve (2.26) eşitlikleri yardımıyla) ve Cheung yöntemiyle ((2.53) ve (2.55) eşitlikleri yardımıyla) elde edilen EY ve n idealite faktörleri diyottan diyota farklı değerlere sahiplerdir. EY ve n idealite faktörlerinin karşılıklı çizimlerinden (Şekil 4.16, 4.17 ve 4.18) homojen EY'leri $\phi_{hom}=0.776$, 0.780 ve 0.789 eV olarak elde edildi. ϕ_{hom} değerlerinin hem diyot sayısına göre istatistiksel dağılım yöntemiyle elde edilen EY hem de $C-V$ ölçümlerinden elde edilen ortalama EY değerleri ile uyumluluğu literatürde verilen yanal inhomojen EY yaklaşımı ile açıklandı (Tung 2001; Huang and Fang 2006). Song *et al.* (1986), EY'deki yanal inhomojeniteyi ara yüzey yüklerine ve ara yüzey tabaka kalınlığının düzgün olmayışına atfetmişlerdir (Werner and Gütler 1991; Chand and Kumar 1997; Zhu *et al.* 2000; Doğan 2006).

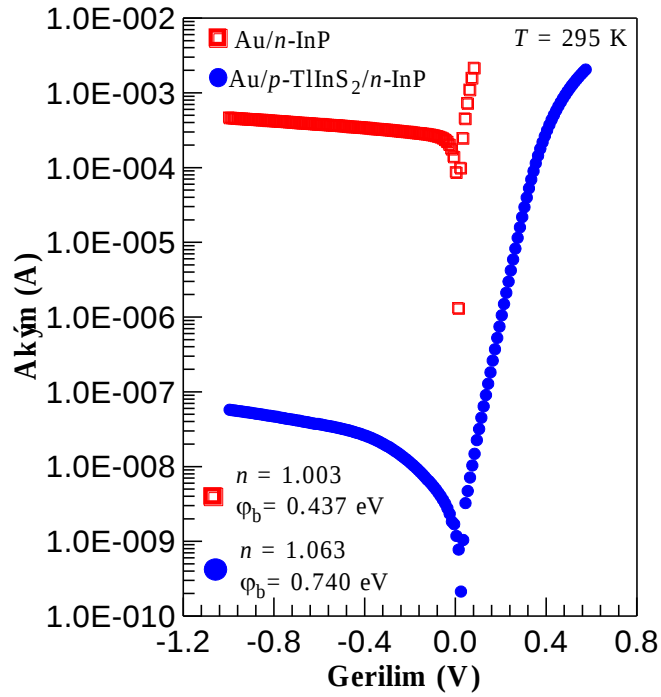


Şekil 5.1. Tavlammamış, T_{A1} , T_{A2} , T_{A3} , T_A ve T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS diyotlarından birinin (D6) oda sıcaklığındaki $I - V$ karakteristikleri

Şekil 5.2’de T_{A2-5} tavlama işlemi uygulanmış tipik Au/p-TlInS₂/n-InP PS diyotlarından birinin oda sıcaklığındaki EY ve n idealite faktörünün tavlama sıcaklığına bağlı değişimi verilmiştir. Bu çizimden görüldüğü üzere, artan tavlama sıcaklığı ile Au/p-TlInS₂/n-InPPS yapısının oda sıcaklığındaki idealite faktörü değerleri 1.023’den 1.169 değerine, EY değerleri de 0.659 eV’dan 0.751 eV’ta ulaşmıştır. $T_{A4}=250^{\circ}\text{C}$ tavlama sıcaklığına kadar 0.740 eV’luk EY değeri ile Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapısının ideal diyot sınırları içerisinde kaldığı ($n=1.063$), daha yüksek tavlama sıcaklıklarında idealite faktörünün ciddi oranda arttığı ve diyotun ideallikten oldukça uzaklaştığı gözlemlendi. Bu durumda Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapısı için $T_{A4}=250^{\circ}\text{C}$ işlemi optimum ısı işlem basamağı olarak kabul edilebilir (Şekil 5.3). Bu çizimden görüleceği üzere Au/n-InP yapısına kıyasla imal edilen Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapısının sıfırlı akımı yaklaşık 4 mertebe daha küçük, buna karşın EY (ideal diyot sınırları içerisinde) $\sim 0.300\text{eV}$ kadar daha büyüktür. 2010 yılında Soylu *et al.* tarafından yapılan benzer bir çalışmada Au/Pyronine-B/MD n-InP SEY’lerin 100°C ve 250°C ’deki tavlama işlemleri ardından idealite faktörü ve EY değerlerinin sırasıyla 1.041; 0.600 eV’dan 1.253 ve 0.571 eV’a değiştiği rapor edilmiştir.



Şekil 5.2. T_{A1-5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS diyotlarından birinin oda sıcaklığındaki EY ve n idealite faktörünün tavlama sıcaklığına bağlı değişimi



Şekil 5.3. Referans Au/n-InP ve T_{A4} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS diyotlarından birinin (D6) oda sıcaklığındaki $I - V$ karakteristikleri

Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapısının C-V karakteristikleri oda sıcaklığında, 5 MHz'lik çalışma frekasında incelendi. $T_{A3}=200$, $T_{A4}=250$ ve $T_{A5}=300^{\circ}\text{C}$ tavlama işlemi

uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS yapılarına ait $C^{-2} - V$ değişimleri Şekil 4.19-4.21’de verilmiştir. Farklı tavlama işlemi uygulanan $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InPPS}$ yapıları için elde edilen diyot parametreleri $\phi_{b(C-V)}^d$, E_f , N_d , N_c ve V_d değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.22’de (D6) diyotu için verilen tipik $C^{-2} - V$ çiziminin lineere yakın bir değişime sahip oluşu, diyotun keskin bir engel kenarına sahip olduğunu belirtir. Diğer taraftan, ölçüm frekansında ara yüzey hallerinin uygulanan AC sinyali takip etmediği ve bu hallerin kapasiteye katkısının ihmal edilecek derecede küçük olduğu anlamına gelir. Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’den görüldüğü gibi, $C - V$ ölçümlerinden elde edilen EY değerleri $I - V$ ölçümlerinden elde edilen EY değerlerinden daha büyüktür. Bu durum, MY arasında oluşturulan ara yüzey tabakasının kalınlığına, ara yüzey hallerinin dağılımına ve yoğunluğuna atfedilebileceği gibi ölçüm tekniklerinin doğasının farklılığından da kaynaklanabilir.

Şekil 4.23, 4.25, 4.27 ve 4.29’da T_{A2} , T_{A3} , T_{A4} ve T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış $\text{Au/p-TlInS}_2/\text{n-InP}$ PS yapılarından seçilmiş D6 diyotuna ait 360-80 K aralığında yarı-logaritmik $I - V$ çizimleri verilmiştir. Klasik TE teorisi göz önünde bulundurularak her bir sıcaklık için doğru beslem yarı logaritmik $I - V$ çizimlerinin lineer kısımlarına fit edilen doğrunun eğim ve kesim noktalarından elde edilen $dV/d(\ln I)$ ve I_0 doyma akım değerleri ve gerekli fiziksel sabitler kullanılarak hesaplanan n idealite faktörü ve EY değerleri Çizelge 4.3’te verilmiştir. Aynı zamanda, Çizelge 4.3’deki veriler kullanılarak hazırlanan $n - T$ ve $\phi_{b0} - T$ değişimleri Şekil 4.24, 4.26, 4.28 ve 4.30’da verilmiştir. Bu çizimlerden görüldüğü üzere, artan sıcaklıkla EY değerleri artarken n idealite faktörü değerleri azalmaktadır.

Yukarıda bahsedilen rutin analiz yöntemi yanında, sıcaklığa bağlı $I - V$ karakteristiklerinin analizinde geleneksel Richardson çizimlerinin ($\ln(I_0 / T^2)$ vs. $1/kT$ ve/veya $\ln(I_0 / T^2)$ vs. $1/nkT$) kullanımı Richardson sabiti ve aktivasyon enerjisinin tayininde çoğu zaman akla yatkın ve güvenilir sonuçlar vermemesine rağmen sıcaklığa bağlı analizlere başlangıç teşkil etmek üzere geleneksel Richardson çizimleri kullanıldı. Geleneksel Richardson çizimlerinde lineer değişime sahip kısımlara yapılan lineer fitlerin eğim ve

ordinat eksenini kesim noktalarından elde edilen aktivasyon enerjisi ve A^* Richardson sabiti değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir. Elde edilen bu değerler, teorik Richardson sabiti (n -InP yarıiletkenindeki elektronlar için $A^* = 9.4 \text{ AK}^{-2}\text{cm}^{-2}$) ve beklenen aktivasyon enerjisi değerleri ile uyumlu olmayıp, bu değerlerden oldukça farklıdır. A^* değerinin beklenenden farklı oluşu, engelin homojen olmayışı ve/veya gerçek etkin kütle değerinin hesaplamalarda kullanılan teorik değerden farklı olmasıyla açıklanabilir (Horwáth 1996). Düşük sıcaklıklarda EY'nin azalması ve Richardson eğrisinin lineerlikten sapması; imaj kuvvet etkileri, potansiyel engeli boyunca tünelleme akımı etkisi, düşük voltajlarda görülen uzay yükü bölgesindeki rekombinasyon ve ara yüzeye yakın yük dağılımındaki dalgalanmalardan kaynaklanabilir (Newman *et al.* 1986; Werner and Güttler 1991; Chand and Kumar 1995, 1996; Zhu *et al.* 2000).

Artan sıcaklıkla EY'nin artması, n idealite faktörünün azalması ve Richardson çizimlerindeki lineer olmayan davranışın açıklanmasında evvela imaj kuvvet düşme etkisi göz önünde bulunduruldu. T_{A2} , T_{A3} , T_{A4} ve T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/ p -TlInS₂/ n -InP yapıları için (360 K ve 80 K sıcaklıkları için) (2.36) eşitliği kullanılarak hesaplanan imaj kuvvet düşmesi ($\Delta\phi_{\text{imf}}$) değerleri 0.012-0.024 eV aralığında yer almaktadır. Bununla birlikte, aynı sıcaklık değerleri için görünür EY değerleri arasındaki fark $\sim 0,400$ eV civarındadır. İncelenen sıcaklık aralığında imaj kuvveti nedeniyle EY'deki düşme miktarının gözlenen düşüş yanında çok küçük ve hemen hemen sabit oluşu EY'deki aşırı azalmanın tek başına $\Delta\phi_{\text{imf}}$ 'den kaynaklanamayacağını belirtir.

Aynı şekilde, azalan ölçüm sıcaklığıyla n idealite faktöründeki artışa imaj kuvvet etkisinin katkısı (2.37) eşitliği ile anlaşılabilir: T_{A2} , T_{A3} , T_{A4} ve T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/ p -TlInS₂/ n -InP yapıları için (110 K; 80 K; 110 K; 80 K sıcaklıklarında) sırasıyla $n_{\text{imf}} = 1.010$; $n_{\text{imf}} = 1.006$; $n_{\text{imf}} = 1.010$ ve $n_{\text{imf}} = 1.008$ 'dir. Bununla birlikte, hesaplanan n_{imf} değerleri aynı sıcaklıklardaki I - V çizimlerinden elde edilen $n=1.842$, 1.899, 2.128 ve 2.259 değerleri ile kıyaslandığında düşük sıcaklıklarda n değerlerindeki farkın çok çok büyük olduğu görülmektedir. Böylece, incelenen

sıcaklık bölgesinde imaj kuvveti nedeniyle idealite faktöründeki artışın hemen hemen sabit olduğu ve dolayısıyla n deki aşırı artmanın tek başına bu etkiden kaynaklanamayacağı söylenebilir.

$I - V$ karakteristiklerinin doğru beslem tarafıninkullanıldığı Cheung fonksiyonları ((2.28) ve (2.31)) ile idealite faktörü (n), seri direnç (R_s) ve EY (ϕ_b) değerleri tayin edildi. Her bir tavlama işlemi ardından Cheung fonksiyonları yardımıyla belirlenen Schottky diyot parametreleri n , R_s ve ϕ_b değerleri Çizelge 4.4, 4.5, 4.6'da verilmiştir. Diğer taraftan, Au/p-TlInS₂/n-InPPS yapılarının T_{A2} , T_{A3} , T_{A4} ve T_{A5} tavlamalarından sonra (D6) diyotunun sıcaklığa bağlı $dV/d(\ln I) - I$ ve $H(I) - I$ değişimlrisırası ile Şekil 4.35-38 ve Şekil 4.39-42'de verilmiştir. Ayrıca, Au/p-TlInS₂/n-InPPS diyotlarının $I - V$ ve Cheung fonksiyonları ile elde edilen idealite faktörü ve EY değerlerinin sıcaklıkla değişimleri Şekil 4.43-46, ve Şekil 4.47-50'de verilmiştir. Şekil 4.43-46 ve Şekil 4.47-50'den görüldüğü üzere Cheung fonksiyonlarından elde edilen n , R_s ve ϕ_b değerlerinin sıcaklıkla değişimi, deneysel $I - V$ karakteristiklerinin (2.27) ifadesi ile verilen TE denklemi ile fit edilmesi neticesinde elde edilenlerle benzer trendesahiplerdir. Bu benzerlik değişik değerlendirme metotları arasındaki uyumu ve bu metotların uygulanabilirliğini belirtmektedir.

T_{A2-5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InPPS yapılarının ters belsem $C-V$ karakterizasyonu 5 MHz uygulama frekansında ve 10 mV osilasyon geriliminde 20 K sıcaklık adımlarıyla -1.00-0.00 V aralığında alındı. Bu yapılara ait $C^{-2} - V$ değişimleri Şekil 4.72, 4.73, 4.74 ve 4.75'de verilmiştir. Bu çizimlerden görüldüğü gibi artansıcaklıkla kapasite değerleri artmaktadır. Yapılara ait $C^{-2} - V$ değişimleri incelenen gerilim ve sıcaklık aralığında hemen hemen lineer bir değişime sahiplerdir. Au/p-TlInS₂/n-InPPS yapısı için $C-V$ karakterizasyonu ile elde edilen diyot parametreleri ($\phi_{b(C-V)}$, $\phi_{b(C-V)}^d$, E_f , V_d , N_c ve N_d) Çizelge 4.9-12'de verilmiştir. Bu çizelgelerden görüleceği üzere rastgele bir dağılım sergileyen $\phi_{b(C-V)}$ değerleri sıcaklığa bağlı belli

bir trende sahip değillerdir. Ancak n idealite faktörü kullanılarak düzeltilmiş $\phi_{b(C-V)}^d$ değerleri I - V karakterizasyonundan elde edilen ϕ_b EY değerleri ile benzer trende (artan sıcaklıkla artan) sahiplerdir. Bununla birlikte, incelenen sıcaklık aralıklarında $\phi_{b(C-V)}^d$ değerleri ϕ_b EY değerlerinden belli bir miktar daha büyüktür. Bu duruma yüzey tabakasının inhomojenliği ve ölçüm tekniklerinin doğasının farklı oluşundan kaynaklanır.

Sıcaklığa bağlı EY ve n idealite faktöründeki anormal davranışın kaynağını belirlemek üzere, elde edilen parametrelerin sıcaklığa bağımlılığı EY'nin SGDM dikkate alınarak değerlendirildi. (2.42) ve (2.45) denklemleri kullanılmak suretiyle her bir sıcaklık için elde edilen ϕ_{ap} ve n_{ap} değerleri kullanılarak $\phi_{ap} - q/2kT$ ve $n_{ap} - q/2kT$ çizimleri oluşturuldu. $\phi_{ap} - q/2kT$ çizimlerinden, T_{A2} , T_{A3} , T_{A4} ve T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış diyotlara ait ortalama EY ve onların standart sapma değerleri Çizelge 5.1'de verilmiştir. Çizelgedeki $\bar{\phi}_{b0}$ ve σ_{s0} değerleri birbirleri ile kıyaslandığında, standart sapmanın ortalama EY'nin $\approx \%11$ 'i olduğu görülmektedir. Standart sapma, engel homojenliğinin bir ölçüsü olarak kabul gördüğünden standart sapma ne kadar düşük olursa homojen EY'ne o kadar çok yaklaşırlar. σ_{s0} değerlerinin $\bar{\phi}_{b0}$ 'ye nazaran küçük olması, ara yüzeyde homojen olmayan durumu ifade eder. Bu homojen olmayan dağılım ve potansiyel dalgalanmaları aygıtın düşük sıcaklık I - V karakteristiklerine etki eder. Bu etki, özellikle Şekil 4.31-34'te verilen Richardson eğrilerindeki lineer olmayan davranıştan sorumludur (Song *et al.* 1986; Zhu *et al.* 1999).

Diğer taraftan, $n_{ap} - q/2kT$ çizimlerinden elde edilen voltaj katsayı değerleri Çizelge 5.2'de verilmiştir. $n_{ap} - q/2kT$ çizimlerinin incelenen sıcaklık aralığındaki lineer davranışı, idealite faktörünün sıcaklıkla değişimine Gauss dağılımlı engeldeki voltaj deformasyonunun sebep olduğunu gösterir. (2.45) denklemi dikkate alındığında azalan sıcaklıkla birlikte idealite faktörünün artışıdaki baskın rolün ρ_3 voltaj katsayısının negatifliğinden kaynaklandığı söylenebilir. Aynı zamanda ρ_2 katsayısının da negatif

oluşu, uygulama gerilimi arttıkça engel yüksekliğinin ve dolayısıyla onun standart sapmasının azalacağını belirtir. Diğer bir deyişle, artan uygulama voltajı etkin engelin maksimumunu yarıiletken gövde içine doğru kaydıracağından EY'deki dalgalanmaları homojenize ederek engelinde homojen bir dağılıma sahip olmasını sağlar.

Çizelge 5.1. Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapıları için $(\phi_{ap} - q/2kT)$ çizimlerinden elde edilen ortalama EY ve onların standart sapma değerleri

Au/p-TlInS ₂ /n-InP		Tavlama Sıcaklığı (K)	T_{A2}	T_{A3}	T_{A4}	T_{A5}
	$\phi_{ap} - q/2kT$	σ_{s0} (eV)	0.095	0.088	0.113	0.094
		$\bar{\phi}_{b0}$ (eV)	0.848	0.885	1.038	0.860

Çizelge 5.2. Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapıları için $(n_{ap} - q/2kT)$ çizimlerinden elde edilen voltaj katsayı değerleri

Au/p-TlInS ₂ /n-InP		Tavlama Sıcaklığı (K)	T_{A2}	T_{A3}	T_{A4}	T_{A5}
	$n_{ap} - q/2kT$	ρ_2 (eV)	-0.173	-0.059	-0.181	-0.157
		ρ_3 ($\times 10^{-2}$) (eV)	-1.356	-0.711	-1.534	-1.090

Homojen olmayan engel etkisinden dolayı geleneksel Richardson çizimlerinde (Şekil 4.31-34) görülen bükülme modifiye Richardson çizimi $([\ln(I_0/T^2) - q^2\sigma^2/2(kT)^2] - 1000/T)$ maharetiyle giderildi. Bunun için N tane Gaussian dağılıma sahip EY'libir MY yapı için türetilmiş Modifiye Richardson ifadesi kullanıldı:

$$\ln\left(\frac{J_0}{T^2}\right) = \ln A^* + \ln \sum_{i=1}^N \delta_i \exp\left[-\frac{q\bar{\Phi}_{b0i}}{kT} + \frac{1}{2}\left(\frac{q\sigma_{0i}}{kT}\right)^2\right]. \quad (5.1)$$

EY'nintekli Gaussian dağılımı (SGD) durumunda ($N=1$ için) görünür EY ve görünür idealite faktörü değerleri

$$\varphi_{ap} = \bar{\varphi}_0 - \frac{q\sigma_0^2}{2kT} \quad (5.2)$$

$$\frac{1}{n_{ap}(V, T)} - 1 = \frac{q\rho_3}{2kT} - \rho_2 \quad (5.3)$$

ifadeleri kullanılarak hesaplandı. Şekil 4.55-58’de EY’nin SGDM kullanılarak elde edilen T_{A2} , T_{A3} , T_{A4} ve T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapıları için modifiye edilmiş Richardson çizimlerine yer verilmiştir. Bu çizimlerden T_{A2} , T_{A3} , T_{A4} ve T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapılarına ait aktivasyon enerjisi ve modifiye Richardson sabiti (A^{**}) değerleri, Çizelge 5.3’te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapıları için ($[\ln(I_0/T^2) - q^2\sigma^2/2(kT)^2] - 1000/T$) çizimlerinden elde edilen aktivasyon enerjisi (φ_b) ve Richardson sabiti (A^{**}) değerleri

Au/p-TlInS ₂ /n-InP	Tavlama Sıcaklığı (K)	T_{A2}	T_{A3}	T_{A4}	T_{A5}
	A^{**} (AK ⁻² cm ⁻²)	9.640	9.220	12.330	10.050
	φ_b (eV)	0.836	0.882	0.927	0.889

Her bir tavlama işlemi için elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri Şekil 4.51-54’de verilen $\varphi_{ap} - q/2kT$ çiziminden elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri ile (0.848 eV, 0.885 eV, 1.038 eV ve 0.860 eV) karşılıklı olarak hemen hemen uyum içerisindedir. Aynı şekilde, elde edilen A^{**} değerlerinin de n-InP için bilinen teorik Richardson sabiti A^* ($=9.400 \text{ AK}^{-2}\text{cm}^{-2}$) değeri ile oldukça uyumlu olduğu söylenebilir.

Bununla birlikte, T_{A3} , T_{A4} ve T_{A5} tavlama işlemi uygulanmış Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapıları için deneysel idealite faktörü ve EY verileri ile SGDM’ne göre teorik olarak hesaplanmış idealite faktörü ve EY eğrileri (Şekil 4.63-65) arasındaki uyum çok iyi değildir. Hatta $[\ln(I_0/T^2) - q^2\sigma^2/2(kT)^2] - 1000/T$ modifiye Richardson çizimlerinde

belirli sıcaklığın altında ve üstünde olmak üzere lineer iki bölgenin mevcut olduğu görülmektedir. Bu yüzden EY'nin DGDM dikkate alınarak sıcaklığa bağlı incelemeler tekrarlandı. Bu durumda (5.2) ve (5.3) ifadeleri yerine

$$\varphi_{ap} = \frac{kT}{q} \ln \left[\delta_1 \exp \left(\frac{q\bar{\varphi}_{01}}{kT} - \frac{1}{2} \left(\frac{q\sigma_{01}}{kT} \right)^2 \right) + \delta_2 \exp \left(\frac{q\bar{\varphi}_{02}}{kT} - \frac{1}{2} \left(\frac{q\sigma_{02}}{kT} \right)^2 \right) \right] \quad (5.4)$$

$$\frac{1}{n_{ap}(V, T)} - 1 = \frac{kT}{qV} \ln \left[\exp \left\{ \frac{q}{kT} \left(\frac{q\rho_{31}V}{2kT} - \rho_{21}V \right) \right\} + \exp \left\{ \frac{q}{kT} \left(\frac{q\rho_{32}V}{2kT} - \rho_{22}V \right) \right\} \right] \quad (5.5)$$

ifadeleri kullanıldı. T_{A3-5} tavlama işlemi uygulanmış yapılara ait $\varphi_{ap} - q/2kT$ çizimlerinde (Şekil 4.63-65) belirli sıcaklık bölgelerine en küçük kareler yöntemi kullanılarak yapılan lineer fitlerin eğim ve kesim noktalarından belirlenen ortalama EY ve onların standart sapmaları Çizelge 5.4'de verilmiştir. $\bar{\varphi}_{b0}$ ve σ_{s0} değerleri karşılıklı olarak birbirleri ile kıyaslandığında standart sapmaların ortalama EY değerlerinin $\approx\%$ 9.40-12.0'si gibi değerlere sahiptir. Bu durum, engel inhomojenitesinin varlığını belirtir. Diğer taraftan, T_{A3-5} tavlama işlemi uygulanmış yapılara ait $n_{ap} - q/2kT$ çizimlerinde (Şekil 4.63-65) belirli sıcaklık bölgelerine en küçük kareler yöntemi kullanılarak yapılan lineer fitlerin eğim ve kesim noktalarından belirlenen voltaj katsayıları da Çizelge 5.4'de yer verilmiştir. $n_{ap} - q/2kT$ çizimlerinin incelenen sıcaklık aralığındaki ikili lineer davranışı, idealite faktörünün sıcaklıkla değişimine Gauss dağılımlı Schottky engelindeki voltaj deformasyonunun sebep olduğunu belirtir.

(5.5) ifadesi dikkate alındığında azalan sıcaklıkla birlikte idealite faktörünün artışıdaki baskın rolün p_3 voltaj katsayısının negatif olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Aynı zamanda p_2 katsayısının da negatif oluşu, uygulama gerilimi arttıkça engel yüksekliğinin ve dolayısıyla onun standart sapmasının azalmasına yol açar.

Çizelge 5.4. Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapıları için ($n_{ap} - q/2kT$) çizimlerinden elde edilen voltaj katsayısı ve ($\varphi_{ap} - q/2kT$) çizimlerinden elde edilen ortalama EY ve onların standart sapma değerleri

Au/p-TlInS ₂ /n-InP		Tavlama Sıcaklığı (K)	T_{A3}		T_{A4}		T_{A5}	
		Sıcaklık Aralığı (K)	360-240	240-80	360-200	200-110	360-200	200-80
	$\varphi_{ap} - q/2kT$	$\sigma_{s01}, \sigma_{s01}$ (eV)	0.111	0.082	0.125	0.099	0.117	0.080
		$\bar{\varphi}_{b01}, \bar{\varphi}_{b02}$ (eV)	0.986	0.831	1.100	0.911	0.977	0.739
	$n_{ap} - q/2kT$	ρ_{21}, ρ_{22} (eV)	-0.118	-0.055	-0.234	-0.028	-0.277	-0.015
		ρ_{31}, ρ_{32} (x10 ⁻³) (eV)	-10.10	-7.001	-17.67	-11.68	-15.92	-8.149

Bu sonuçlar, uygulama voltajının engel yüksekliğindeki dalgalanmaları homojenize ettiğini ve uygulama voltajı artışıyla etkin engelin maksimumunun yarıiletken gövde içine doğru kaydığını ve böylece engelin homojen bir dağılıma sahip olduğunu belirtir. Şekil 4.66-68’de idealite faktörü ve EY’nin sıcaklıkla değişimleri verilmiştir. Çizimlerdeki katı çizgiler ilgili ikili sıcaklık aralıklarındaki uygun fitleri, içi boş kare ve içi boş daireler ise tüm sıcaklık aralığında DGDM’ne göre (5.4) ve (5.5) denklemleri kullanılarak hesaplanan teorik değişimlerin toplamını temsil etmektedir. Bu çizimlerden görüldüğü gibi deneysel n ve EY değerleri ile DGDM kullanılarak elde edilen teorik n ve EY değerleri birbiri ile mükemmel yakın bir uyum içerisindedirler. Böylece, EY’nin DGDM’nin Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapısında gözlenen engel inhomojenliği kavramını başarılı bir şekilde açıkladığını söyleyebiliriz.

EY’nin DGDM göz önünde bulundurularak türetilmiş modifiye Richardson çizimlerinde, $[\ln(I_0/T^2) - q^2\sigma^2/2(kT)^2] - 1000/T$, (Şekil 4.69-71) belirli sıcaklık bölgelerine en küçük kareler yöntemi kullanılarak yapılan lineer fitlerin eğim ve kesim noktalarından belirlenen aktivasyon enerjisi ve A^{**} modifiye Richardson sabiti değerleri Çizelge 5.5’de verilmiştir. Her bir tavlama işlemi sonrası elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri, Şekil 4.63-65’de verilen $\varphi_{ap} - q/2kT$ çizimlerinden elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri ile (0.986-0.831 eV, 1.100-0.911 eV ve 0.977-0.739 eV) karşılıklı olarak uyum içerisindedir. Aynı şekilde, elde edilen A^{**} değerlerinin de n-InP için bilinen etkin Richardson sabiti A^* (=9.40 AK⁻²cm⁻²) değeri ile uyum içerisindedir.

Çizelge 5.5. Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapıları için $([\ln(I_0/T^2) - q^2\sigma^2/2(kT)^2] - 1000/T)$ çizimlerinden elde edilen aktivasyon enerjisi (ϕ_b) ve Richardson sabiti (A^{**}) değerleri

Au/p-TlInS ₂ /n-InP	$[\ln(I_0/T^2) - q^2\sigma^2/2(kT)^2] - 1000/T$	Tavlama Sıcaklığı (K)	T_{A3}		T_{A4}		T_{A5}	
		Sıcaklık Aralığı (K)	360-240	240-80	360-200	200-110	360-200	200-80
		A^{**} (AK ⁻² cm ⁻²)	10.336	9.542	8.480	10.492	10.193	9.503
		ϕ_b (eV)	0.987	0.834	1.087	0.863	0.987	0.737

İlgilenilen sıcaklık aralığında C-V karakteristiklerinden elde edilen (Çizelge 4.9-4.12) EY değerleri, geleneksel I-V karakteristiklerinden (Çizelge 4.3) ve Cheung fonksiyonlarından (Çizelge 4.4-4.7) elde edilen EY değerlerinden %20 civarında daha büyüktür. Farklı teknikler ile elde edilen EY'lerinin farklılığının derin kirlilik seviyeleri, imaj kuvvet düşmesi, kenar sızıntı akımları vb. etkilere kaynaklandığına dair literatürde çeşitli tartışmalar vardır. (Vander Ziel 1968; Sze 1981; Rhoderick and Williams 1988; Tung 1992).

Sonuç olarak, bu çalışmadan-InP'nin devre elemanı olarak kullanımını sınırlandıran problemlerin iyileştirilmesi amacıyla n-InP ile zıt tipli p-TlInS₂ üçlü yarıiletken bileşiği kullanılarak Au/p-TlInS₂/n-InP PS yapıları oluşturuldu. Au ve n-InP arayüzeyinde kararlı p-TlInS₂ inversiyon tabakası oluşturmak amacıyla ardışık tavlama işlemleri uygulandı. Bu sayede Metal/n-InP yapılarındaki düşük EY problemi elimine edilerek ideal diyot sınırları içerisinde EY'nin ~ 0.300 eV kadar artırılacağı gösterildi. Karakteristik diyot parametrelerinin sıcaklığa bağlı değişimlerinin tatmin edici açıklaması, diyot akımının çoklu Gaussian dağılıma sahip engelden TE yoluyla sağlandığını öngören teoriyle yapıldı.

KAYNAKLAR

- Abay, B., Çankaya, G., Güder, H. S., Efeoğlu, H. and Yoğurtçu, Y. K., 2003. Barrier characteristics of Cd/*p*-GaTe Schottky diodes based on *I-V-T* measurements. *Semicond Sci. Technol.* 18, 75-81.
- Abay, B., Soylu, M. and Yoğurtçu, Y. K., 2006. Sixth International Conference of the Balkan Physics Union (BPU-6) İstanbul, Turkey 693-693.
- Abay, B., 2009. Barrier Characteristics of Biopolymer Based Organic/Inorganic Hybrid Au/chitosan/MD *n*-InP structures, 5. Nanobilim ve Nanoteknoloji Konferansı (Nanotr5), 229, Anadolu Üniversitesi-Eskişehir (Poster bildirisi).
- Abay, B., 2010. Measurement and modelling of the characteristic parameters for silver Schottky contacts on layered *p*-GaSe compound in a wide temperature range. *Journal of Alloys and Compounds*, 506, 51-56.
- Ahaitouf, A., Bath A., Losson, E. and Abarkan, E., 1998. Stability of sulfur-treated *n*-InP Schottky structures, studied by current-voltage measurement. *Materials Science and Engineering B52*, 208-215.
- Akkılıç, K., Aydın, M. E. and Türüt, A., 2004. The effect of series resistance on the relationship between barrier heights and ideality factors of inhomogeneous schottky barrier diodes. *Physica Scripta.* 70, 364-367.
- Asubay, S., Güllü, Ö. and Türüt, A., 2008. Determination of the laterally homogeneous barrier height of thermally annealed and unannealed Au/*p*-InP/Zn-Au Schottky barrier diodes. *Applied Surface Science*, 254 (11), 3558-3561.
- Benamara, Z., Akal, B., Talbi, A., Gruzza, B. and Bideux, L., 2002. Electrical parameters evolution of Au/InP (100) and Au/InSb/InP (100) systems with restructuring conditions. *Materials Science and Engineering C* 21, 287-290.
- Chand, S. and Kumar, J., 1995., Current-voltage characteristics and barrier parameters of Pd₂Si/*p*-Si (111) Schottky diodes in a wide temperature range. *Semicond. Sci. Technol.* 10, 1680-1688.
- Chand, S. and Kumar J., 1996. On the existence of a distribution of barrier heights in Si/Si Schottky diodes. *J. Appl. Phys.* 80 (1), 288-298.
- Chand, S. and Kumar, J., 1996., Current transport in Pd₂ /*n*-Si (100) Schottky barrier diodes at low temperatures. *J. Appl. Phys. A* 63, 171-17.
- Chand, S. and Kumar, J., 1997. Effect of barrier height distribution on the behavior of a Schottky diode. *J. Appl. Physics*, 82 (10), 5005-5010.
- Chand, S. and Kumar, J., 1997. Electron transport and barrier inhomogeneities in palladium silicide Schottky diodes. *J. Appl. Phys. A*, 65, 497-503.
- Chand, S. and Kumar, J., 1997. Simulation and analysis of the *I-V* characteristics of a Schottky diode containing barrier inhomogeneities. *Semicond. Sci. Technol.*, 12, 899-906.
- Chand, S., 2002. An accurate approach for analysing a inhomogeneous Schottky diode with a Gaussian ditribution of barrier heights. *Semiconductor Science and Technology* 17 (7), L36-L40.
- Cheung, S. K. and Cheung, N. W., 1986. Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage (*I-V*) characteristics. *Appl. Phys. Lett.* 49, 85-87.

- Chin, V. W. L., Gren, M. A. and Storey, J. W. V., 1990. Correlation between current-voltage and capacitance-voltage Schottky barrier height on (100) and (110) GaAs an (110) InP surface. *J. Appl. Phys.* 68, 3470.
- Christou, A. and Anderson, W. T. Jr., 1979. Material reactions and barrier height variations in sintered Al-InP Schottky diodes, *Solid-State Electron* 22, 857-863.
- Cimilli, F.E., Sağlam M., Efeoğlu, H. and Türüt, A., 2009. Temperature-dependent current-voltage characteristics of the Au/*n*-InP diodes with inhomogeneous Schottky barrier height, *Physica B* 404, 1558-1562.
- Çaldıran, Z., Deniz, A.R., Aydoğan, Ş., Ekinci, D. and Yeşildağ, A., 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, 45–54.
- Çaldıran, Z., Deniz, A.R., Aydoğan, Ş., Ekinci, D., Çoşkun, F.M. and Yeşildağ, A., 2014. *I-V-T* (current-voltage-temperature) characteristics of the Au/Anthraquinone/*p*-Si/Al junction device. *Journal of Alloys and Compounds* 584, 652–657.
- Doğan, H., 2006. Isıl olarak tavllanmış Ni/*n*-GaAs/In Schottky diyotların karakteristiklerinin engel inhomojenlik modeline göre belirlenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Doğan, H., Yıldırım, N., Türüt, A., Biber, M., Ayyıldız, E., Nuhoglu, Ç., 2006. Determination of the characteristic parameters of Sn/*n*-GaAs/Au-Ge Schottky diodes by a barrier height inhomogeneity model. *Semicond. Sci. Technol.*, 21, 822-828.
- Ejderha K., Yıldırım N., Türüt A. and Abay B., 2010. Influence of interface states on the temperature dependence and current-voltage characteristics of Ni/*p*-InP Schottky diodes, *Superlattices and Microstructures* 47, 241-252.
- Ejderha K., Yıldırım N., Türüt A. and Abay B., 2012. Temperature-dependent *I – V* characteristics in thermally annealed Co/*p*-InP contacts, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 57:10102.
- Geib, K.M., Goodnick, S.M., Lin, D.Y., Gann, R.G., Wilmsen, C.W. and Wagen, J.F., 1984. Influence of interfacial structures on the electronic properties of SiO₂/InP MISFET's. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2, 516.
- Gülnahar, M., Efeoğlu, H., 2009. Double barrier nature of Au/*p*-GaTe Schottky contact: Linearization of Richardson plot. *Solid State Electronics*. 53 (9), 972-978.
- Gümüş, A., 2006. MBE CrNiCo/*n*-GaAs Schottky Diyotlarında Termal Tavlamanın Elektriksel Karakteristiklere Etkileri, *Erc. Üniv. Fen Bilimleri Ens. Dergisi*, 22, s. 97-102.
- Hernandez, M. P., Alonso, and C. F. Pena, J. L., 2001. Barrier height determination in homogeneous non ideal Schottky contacts. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 34 1157.
- Horwath, Zs. J., 1996. Comment on analysis of *I-V* measurements on CrSi₂-Si Schottky structures in a wide temperature, *Solid-St. Electron*, 39, 176.
- Huang, S. and Fang, L., 2006. Investigation on the barrier height and inhomogeneity of nickel silicide Schottky. *Applied Surface Science*, 252 (12) , 4027-4032.
- Iyer, R., Changh, R.R., Lille, D., 1988. Sulfur as a surface passivation for InP. *Appl. Phys. Lett.* 53, 134.
- Iyer, R. and Lille D., 1991. Role of poly sulfides in the passivation of the InP surface. *Appl. Phys. Lett.* 59, 437.

- Jiang Y.L., Ru G.P., Lu F., Qu X.P., Li B.Z., W., Li, Li A.Z., Chin. Phys. Lett. 19 (2002) Technol. 12 (1997) 907. 553.
- Jeng, M.-J., Wang, H.-T., Chang, L.-B., Cheng, Y.-C., Lee, C.-M. and Lin, R.-M., 1999. Barrier Height Enhancement of Ni/*n*-type InP Schottky Contact using a Thin Praseodymium Inter layer, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 38 pp. L1382 - L1384.
- Jones, F. E., Wood, B. P., Myers, J. A., Hafer, C. D. and Lonergan, M. C., 1999. Current transport and the role of barrier inhomogeneities at the high barrier *n*-InP/poly (pyrrole) interface. J. Appl. Phys. 86 (11), 6431-6441.
- Lechuga, L.M., Calle, A., Golmayo, D., Tejedor, O. and Briones, F., 1991. A new hydrogen Pt/ GaAs Schottky diode, J. Electro chem. Soc. 138.
- Lechuga, L.M., Calle, A., Golmayo, D., Tejedor, O. and Briones, F., 1991. A new hydrogen Pt/ GaAs Schottky barrier diodes, J. Appl. Phys. 70, 3348 - 3354.
- Lechuga, L.M., Calle, A., Golmayo, D., Tejedor, O. and Briones, F., 1992, Different catalytic metals (Pt, Pd and Ir) for GaAs Schottky barrier sensors, Sens. Actuators B 7, 614 - 618.
- Maeda, F., Watanabe, Y. and Oshima, M., 1993. Surface chemical bonding of (NH₄)₂S_x treated InP (001). Appl. Phys. Lett. 62, (3) 297-299.
- Mikailov, F.A., Rameev, B.Z., Kulibekov, A.M., Şentürk, E. ve Aktaş, B., 2003. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 258-259, 419-422.
- Mitchell, C.E.J., Hill, I.G., Mc Lean, A.B., Lu Z.H., 1996. Sulfur passivated InP (100): surface gaps and electron counting. Applied Surface Sci. 104/105 434-440.
- Mönch, W., 1995. Semiconductor Surfaces and Interfaces, Springer Series on Surfaces Science, 26 (Springer, Berlin), 2nd. edn.
- Müller, D., Poltmann, F. E. and Hanh, H., Naturforsch, Z., 1974. B 29, 117.
- Neamen, D. A., 1992. Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles.
- Newman, N., Schilfgaarde, M. V., Kendelwicz, T., Williams, M. D. and Spicer, W. E., 1986. Electrical study of Schottky barriers on atomically clean GaAs (110) surfaces. Phys. Rev. B 33, 1146.
- Ohdomari, I. and Tu, K.N., 1980. Parallel silicide contacts. J. Appl. Phys., 51, 3735-3739.
- Oigawa, H., Fan, J. F., Nannichi, Y., Sugahara, H. and Oshima, M., 1991. Universal Passivation Effect of (NH₄)₂S_x Treatment on the Surface of III-V Compound Semiconductors. Jpn. J. Appl. Phys. 30 (3)A, L322-L325.
- Oswald, J., 1992. On the barrier height inhomogeneities at poly crystalline metal semiconductor contacts. Solid-St. Electron, 35 (11), 1629-1632.
- Ranuaraz, J. C., Ortiz-Conde A. and Garcia, Sanchez, F. J., 2000. A new method to extract diode parameters under the presence of parasitic series and shunt resistance. Microelectron Reliab. 40, 355.
- Rhoderick, E. H. and Williams, R. H., 1988. Metal-Semiconductor Contacts 2nd ed. (Clarendon Press: Oxford).
- Shi, Z. Q. and Anderson, W. A., 1991, Solid-St. Electron., 34, 285.
- Song, Y.P., Van Meirhaeghe, R.L., Laflère, W.H. and Cardon, F., 1986. On the difference in apparent barrier height as obtained from capacitance-voltage and current-voltage-temperature measurements on Al/*p*-InP Schottky barriers. Solid-St. Electron. 29, 633-638.

- Soylu, M., 2007, Au/*n*-InP ve Au/Pyronine-B/*n*-InP Schottky Yapıların Sıcaklığa Bağlı Elektriksel Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Ata. Üni. Fen Bilimleri Enst., Erzurum.
- Soylu M. and Abay, M., 2009. Barrier characteristics of gold Schottky contacts on moderately doped *n*-InP based on temperature dependent *I*-*V* and *C*-*V* measurements. *Microelectronic Engineering* 86, 88-95.
- Soylu, M., Abay, B. and Onganer, Y., 2010. The effects of annealing on Au/pyronine-B/MD *n*-InP Schottky structure. *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 71, 1398–1403.
- Soylu M., Abay B. and Onganer Y., 2011. Electrical characteristics of Au/Pyronine-B/moderately doped *n*-type InP Schottky structures in a wide temperature range, *Journal of Alloys and Compounds* 509, 5105–5111.
- Sze, SM., 1981. *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd ed. NewYork: Wiley, p. 270±82.
- Talazac, L., Barbarin, F., Varenne, C., Mazet, L., Pellier, S. and Soulier, C., 2002. *Sensors and Actuators B* 83, 149 – 159.
- Talazac, L., Barbarin, F., Varenne, C. and Mazet, L., 2004. *IEEE J. Sensors* 4, 45.
- Temirci, C., Bati, B., Sağlam, M., and Türüt, A., 2001. High-barrier height Sn/*p*-Si Schottky diodes with interfacial layer by anodization proces. *Appl. Surface Sc.* 172, 1-7.
- Tung, R., 1992. Electron transport at metal-semiconductor interfaces: General theory. *Phys. Rev. B*, 45 (23), 13509-13523.
- Tung, R., 2001. Formation of an electric dipole at metal-semiconductor interfaces. *Physical review B*, 64(20), 1-15.
- Tung, R.T., 2001. Recent advances in Schottky barrier concepts. *Metarials Science and Engineering, R* 35, 1-138.
- Varenne, C., Brunet, A., Pauly, A. and Lauron, B., 2008. Influence of electrical characteristics on the sensitivity of *p*-InP-based pseudo-Schottky diodes for NO₂ monitoring in atmosphere, *Sensors and Actuators, B*, 134, 597-603.
- Varenne, C., Brunet, A., Pauly, A. and Lauron, B., 2009. A comparative study of Schottky barrier height enhancement by realized pseudo-Schottky diodes on *p*-InP, *Physica B* 404, 1082–1086.
- Werner, J. H. and Güttler, H. H., 1991. Barrier inhomogeneities at Schottky contacts. *J. Appl. Phys.*, 69 (3), 1522-1533.
- Werner, J. H. and Güttler, H. H., 1993. Temperature dependence of the Schottky barrier heights on silicon. *J. Appl. Phys.*, 73 (3), 1315.
- Williams, R. H., Montgomery V., Varmo R. R. And Mckinley, A., 1977. The influence of interfacial layers on nature of gold contacts to Si and InP, *J. Phys. D10*, L253-L256.
- Wittmer, M., 1990. Current transport in high-barrier IrSi/Si Schottky diodes. *Phys. Rev. B* 42, 5249-5259.
- Yamagishi, H. 1986. Schottky Contacts on *n*-InP Surface Treated by Plasma-Induced Oxygen Radicals. *Jpn. J. Appl. Phys.* 25 (11) 1691-1696.
- Yıldırım, N., 2009. Saçtırma Yöntemiyle Hazırlanan Ni/*n*-GaAs Schottky Engel Diyotların Karakteristik Parametrelerinin Tavlama ve Numune Sıcaklığına Bağlı Değişimleri. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

- Zhu, S., Detavernier, C., Van Meirhaeghe, R. L., Detavernier, G. P. Ru, Li B. Z. and Cardon F., 1999. A BEEM study of the temperature dependence of the barrier height distribution in PtSi/*n*-Si Schottky diodes. Solid-State Commun. 112, 611.
- Zhu, S., Detavernier C., Van Meirhaeghe R. L., Cardon. F., Ru Guo-Ping, Qu Xin-Ping and Li Bing-Zong, 2000. Electrical characteristics of CoSi₂/*n*-Si (100) Schottky barrier contacts formed by solid state reaction. Solid-State Electron 44, 1807-1818.
- Ziel, A., 1968. Solid State Physical Electronics. Prentice-Hall International Inc., Minnesota, 108-144.

ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Erzurum’da doğdu. İlk, Orta ve Lise Öğrenimini Erzurum’da tamamladı. 2001 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü’nde Lisans öğrenimine başladı. 2005 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tezsiz Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2007 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı Katıhal Fiziği Bilim Dalı’nda Doktora öğrenimine başladı.