

**Mo/n-Si SCHOTTKY YAPILARINDA ENGEL
YÜKSEKLİĞİ DAĞILIMININ ISIL İŞLEM İLE
DEĞİŞİMİ**

Hakan ERTAŞ

**Yüksek Lisans Tezi
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU**

2013

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mo/n-Si SCHOTTKY YAPILARINDA ENGEL YÜKSEKLİĞİ
DAĞILIMININ ISIL İŞLEM İLE DEĞİŞİMİ**

Hakan ERTAŞ

ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ERZURUM
2013**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

Mo/n-Si SCHOTTKY YAPILARINDA ENGEL YÜKSEKLİĞİ DAĞILIMININ
ISIL İŞLEM İLE DEĞİŞİMİ

Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU danışmanlığında, Hakan ERTAŞ tarafından hazırlanan bu çalışma 26.../03.../2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak ~~oybirliği/oy çokluğu~~ (.../...) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU

İmza : 

Üye : Prof. Dr. Bahattin ABAY

İmza : 

Üye : Yrd. Doç. Dr. Emin Argun ORAL

İmza : 

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum



Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU
Enstitü Müdürü

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

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Mo/n – Si SCHOTTKY YAPILARINDA ENGEL YÜKSEKLİĞİ DAĞILIMININ ISIL İŞLEM İLE DEĞİŞİMİ

Hakan ERTAŞ

Atatürk Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU

Metal yarıiletken kontakların doğrultucu özelliğinin bir asrı aşkın kullanımı ve 20. yy ın ortalarında akım iletim mekanizmasının modellenmesi ile bu yapılarının elektronikteki kullanımı yaygınlaşmıştır. Fabrikasyonun basitliği bu yaygınlaşmada en önemli etkenlerden biridir. Teorinin öngördüğü basit akım-gerilim ilişkisine karşın deneysel gözlemler bu ilişkinin ideallikten saptığını göstermektedir. Burada önerilen model yalnızca ideal durum için geçerlidir. Paralel prosesten sonra farklı engel yüksekliklerinin elde edilmesi Schottky modelinin yeniden güncellenmesini gerektirmiştir. Bu çalışmada RF sputter tekniği ile n-Si üzerinde $m \times n$ boyutlu matris formunda oluşturulan Schottky diyotların I-V ölçümleri yapılarak engel yüksekliği ve idealite faktörlerinin dağılımları analiz edildi. Termiyonik model ve Cheung yöntemi ile yapılan analizlerde proses sonrası ortalama engel yüksekliği 0,63 ve 0,62 eV elde edilirken dağılım aralığı (FWHM) 17 ve 4,2 meV olarak elde edildi. TE modele göre en iyi dağılım homojenliği 300°C’de ısıl işleme tabi tutulmuş numunede 0,64 eV engel yüksekliği ve 3,6 meV dağılım aralığı ile elde edildi.

2013, 76 sayfa

Anahtar Kelimeler: Mo-Si Kontak, Schottky Engel, Diyot, Gauss Dağılımı, Sputter

ABSTRACT

MS Thesis

BARRIER HEIGHT DISTRIBUTION DEPENDENCE TOOF $Mo/n - Si$ SCHOTTKY STRUCTURES ANNEALING TEMPERATURE

Hakan ERTAŞ

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electric and Electronic Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU

Rectification behaviors of metal semiconductor junctions are known property over one century. The model which explain the current voltage relation in this structures are proposed in the mid of last century and after that wide application in electronics appeared in industry. Instead of simplicity of current voltage relation, experimental data do not support the proposed model where we know the proposed model is only valid in case of ideal conditions. The experimental data after parallel process required updating the classical Schottky model for real world. In this study Schottky diodes with mxn matrix form fabricated using RF sputter technique and barrier height and ideality factor distributions are analyzed. The application of thermionic model and Cheung method to as processed Mo/n-Si structures, barrier heights 0,63 and 0,62 eV and FWHM calculated as 17 and 4,2 meV, respectively. The best distribution according to TE model is obtained after annealing at 300°C where barrier height was 0,64 eV and FWHM 3,6 meV.

2013, 76 pages

Keywords: Mo-Si contact, Schottky barrier, diode, Gauss distribution, Sputter

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum bu alıŐma Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakóltesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde gerçekleştirilmiştir. Lisansüstü eğitimim süresince değerli bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen, her zaman ve her konuda bana yol gösteren çok değerli hocam Sayın Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU'na, destek ve yardımlarından dolayı, Sayın Prof. Dr. Bahattin ABAY ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Emin Argun ORAL olmak üzere Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakóltesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyelerine, tüm yaşamım boyunca her zaman yanımda olan aileme ve yoğun çalışma temposu içerisinde desteğini her zaman hissettiğim ve her zaman yanımda olan eŐime içtenlikle teşekkür ederim.

Hakan ERTAŞ

Mart, 2013

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı.....	3
1.2. Kaynak Özetleri.....	3
1.2.1. Literatürde Schottky.....	3
1.2.2. Schottky diyotların akım-gerilim karakteristikleri.....	4
1.2.3. Mo-Si kontakların ters akım-gerilim analiz çalışmaları.....	5
1.2.4. Schottky kontakların termal özellikleri.....	6
1.2.5. Schottky Kontakların Optik Özellikleri.....	6
2. KURAMSAL TEMELLER.....	8
2.1. Giriş.....	8
2.2. Metal-Yarıiletken Kontaklar.....	8
2.2.1. Schottky Eklemleri.....	10
2.2.2. Omik kontak.....	16
2.3. Silicide Tabanlı Eklemler.....	17
2.4. Metal-Yarıiletken Kontaklarla Silicide Tabanlı Kontakların Karşılaştırılması ..	18
2.4.1. Metal-Yarıiletken kontak problemleri.....	18
2.4.2. Silicide tabanlı kontak problemleri.....	19
2.5. Metal-Yarıiletken Kontak Yapılarda Homojenlik.....	21
2.6. Silicide Yapılarda Homojenlik.....	21
2.7. Metalizasyon Yöntemleri.....	22
2.7.1. Termal buharlaştırma.....	22
2.7.2. Kimyasal buhar yağma.....	23
2.7.3. Molekül demet ile yağma.....	24

2.7.4. Metal-Organik kimyasal buhar yığıma.....	25
2.7.5. Darbeli lazer ile yığıma (PLD)	27
2.7.6. Sputter ile yığıma	28
2.8. Yarıiletkenlere Omik Kontak Yapımı	31
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	32
3.1. Silisyum Temizleme İşlemi.....	32
3.2. Omik Kontak Yapımı	32
3.3. Sputter ve Metalizasyon Sistemi	33
3.4. Isıl İşlem	34
3.5. I-V Ölçüm Sistemi ve Haritalama.....	35
3.6. X-Ray Difraksiyonu.....	36
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	38
4.1. XRD Ölçüm Değerleri.....	38
4.2. Akım-Gerilim (I-V) Ölçümleri	40
4.2.1. Isıl işleme tabi tutulmuş numunelerde Gauss dağılımı	47
4.3. İdealite Faktörü.....	59
4.3.1. İdealite faktörünün iki ve üç boyutlu haritalamalarının incelenmesi	59
4.3.2. Engel yüksekliğinin idealite faktörüne göre değişimi	68
5. SONUÇ	73
KAYNAKÇA.....	74
ÖZGEÇMİŞ	77

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A^*	Richardson sabiti
e	Elektronun yükü
$^{\circ}C$	Celcius Derece
E_f	Fermi Enerji Seviyesi
E_{fm}	Metal Fermi Enerji Seviyesi
E_{fs}	Yarıiletken Fermi Enerji Seviyesi
E	Elektrik Alan
C	Kapasite
I	Akım
I_0	Doyum Akımı
X_s	Yarıiletkenin Elektron İlgisi
E_g	Yarıiletkenin Yasak Enerji Aralığı
k	Boltzmann Sabiti
m	Serbest Elektron Kütlesi
m^*	Elektronun Etkin Kütlesi
n	İdealite Faktörü
E_C	İletkenlik Bandının Minimum Enerjisi
E_o	Valans Bandının Maksimum Enerjisi
N_D	Donor Konsantrasyonu
R_s	Seri Direnç
T	Kelvin Biriminde Sıcaklık
nm	Nanometre
w	Uzay Yüğü Bölgesinin Genişliğı
ϕ_m	Metalin İş Fonksiyonu
ϕ_s	Yarıiletkenin İş Fonksiyonu
V	Volt
W	Watt

Kısaltmalar

<i>I – V</i>	Akım-Gerilim
<i>PLD</i>	Darbeli Lazer ile Yığma
<i>TE</i>	Termiyonik Emisyon
<i>MOCVD</i>	Metal-Organik Kimyasal Buhar Yığma
<i>FE</i>	Alan Emisyonu
<i>MBE</i>	Moleküler Demet Yığma
<i>LED</i>	Işıma Yapan Diyot
<i>FWHM</i>	Rezonans Genişliği
<i>MSM</i>	Metal-Yarıiletken-Metal

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Genel bir metal-yarıiletken kontak (MS) yapısı.....	10
Şekil 2.2. Birbirinden izole edilmiş olan metal ve n-tipi yarıiletkenin enerji bant diyagramları	11
Şekil 2.3. Metal/n-tipi Schottky eklemi ve denge durumuna geldikten sonra oluşan enerji bant diyagramı.....	12
Şekil 2.4a. Metal/n-tipi Schottky eklemi ve enerji bant diyagramı	14
Şekil 2.4b. Metal/p-tipi Schottky eklemi ve enerji bant diyagramı.....	15
Şekil 2.5. Omik kontak oluşum mekanizmaları.....	17
Şekil 2.6. Termal Buharlaştırma sistemi bileşenleri.....	23
Şekil 2.7. Molekül Demet Yığılma (MBE) sistemi	25
Şekil 2.8. Tipik bir Metal-Organik Kimyasal Buhar Yığılma (MOCVD) sistemi	26
Şekil 2.9. PLD sistemi ve tek bir lazer darbesi sonrası oluşan buhar paketinin hedeften numuneye doğru yayılması.	27
Şekil 2.10. Sputter işlemi	28
Şekil 3.1 Sputter cihazı	34
Şekil 3.2. Isıl işlem Fırını.....	35
Şekil 3.3. Akım-Gerilim ölçüm ve haritalama sistemi (Atatürk Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Laboratuvarı).....	36
Şekil 3.4 XRD ölçüm sistemi (Atatürk Üniversitesi Yüzey Teknolojileri ve Biyomekanik Laboratuvarı)	37
Şekil 4.1. Referans numunesi ve farklı sıcaklıklarda tavllanmış numuneler için XRDölçümleri	39
Şekil 4.2. Referans numunesi ve farklı sıcaklıklarda tavllanmış numuneler için 300 K'de I-V ölçüm değerleri,.....	42
Şekil 4.3. Tavlama yapılmamış SPT 191 referans numunesine ait doğrudan fit ile haritalama ölçümünden elde edilen Gauss dağılımı.....	43
Şekil 4.4. Referans SPT191 numunesinde I/V haritalama ölçümlerinin standart I-V analizinden elde edilen engel yüksekliği Gauss dağılımı.	44

Şekil 4.5. Referans numunede 12x15 adet I-V ölçümüne ait engel yüksekliğinin Cheung analizi.....	45
Şekil 4.6. Referans numunede 12x15 adet I-V ölçümüne ait engel yüksekliğinin Standart I-V analizi.....	46
Şekil 4.7. 300°C’de tavlama yapılmış SPT192 numunesinde 165 diyotun I/V ölçümlerinin Cheung analizi ile elde edilen engel yüksekliği Gauss dağılımı.	47
Şekil 4.8. 300°C’de tavlama yapılmış SPT192 numunesinde 165 diyodun I/V ölçümlerinin standart I-V analizi ile elde edilen engel yüksekliği Gauss dağılımı.	48
Şekil 4.9. 300°C’de tavllanmış SPT192 numunesinde, 12x15 adet I-V ölçümüne ait engel yüksekliğinin Cheung analizi.	49
Şekil 4.10. 300°C’de tavllanmış SPT192 numunesinde, 12x15 adet I-V ölçümüne ait engel yüksekliğinin Standart I-V analizi.....	50
Şekil 4.11. SPT193 400°C’de tavllanmış numunede I-V ölçümlerinin Cheung analizinden elde edilen engel yüksekliği Gauss dağılımı.....	51
Şekil 4.12. SPT193 400°C’de tavllanmış numunede standart I-V analizinden elde edilen engel yüksekliği Gauss dağılımı.....	52
Şekil 4.13. 400°C’de tavllanmış SPT193 numunesinde, 12x15 adet I-V ölçümüne ait engel yüksekliğinin Cheung analizi.....	53
Şekil 4.14. 400°C’de tavllanmış SPT193 numunesinde, 12x15 adet I-V ölçümüne ait engel yüksekliğinin Standart I-V analizi.....	54
Şekil 4.15. SPT194 500°C’de tavllanmış numunede I-V ölçümlerinin Cheung analizinden elde edilen engel yüksekliği Gauss dağılımı.....	55
Şekil 4.16. SPT194 500°C’de tavllanmış numunede standart I-V analizinden elde edilen engel yüksekliği Gauss dağılımı.....	56
Şekil 4.17. 500°C’de tavllanmış SPT194 numunesinde, 12x15 adet I-V ölçümüne ait engel yüksekliğinin Cheung analizi.....	57
Şekil 4.18. 500°C’de tavllanmış SPT194 numunesinde, 12x15 adet I-V ölçümüne ait engel yüksekliğinin Standart I-V analizi.....	58

Şekil 4.19. Referans SPT191 numunesinde, 12x15 adet I-V ölçümüne ait Cheung analizi ve idealite faktörünün dağılımı.	60
Şekil 4.20. Referans SPT191 numunesinde, 12x15 adet I-V ölçümüne ait engel idealite faktörü haritalanması Standart I-V analizi.	61
Şekil 4.21. 300°C’de ısıtılma tabi tutulmuş SPT192 numunesinde, 12x15 adet I-V ölçümüne ait engel idealite faktörü haritalanması Cheung analizi.	62
Şekil 4.22. 300°C’de ısıtılma tabi tutulmuş SPT192 numunesinde, 12x15 adet I-V ölçümüne ait engel idealite faktörü haritalanması Standart I-Vanalizi. ...	63
Şekil 4.23. 400°C’de ısıtılma tabi tutulmuş SPT193 numunesinde, 12x15 adet I-V ölçümüne ait engel idealite faktörü haritalanması Cheung analizi.	64
Şekil 4.24. 400°C’de ısıtılma tabi tutulmuş SPT193 numunesinde, 12x15 adet I-V ölçümüne ait engel idealite faktörü haritalanması Standart I-V analizi.	65
Şekil 4.25. 500°C’de ısıtılma tabi tutulmuş SPT194 numunesinde, 12x15 adet I-V ölçümüne ait engel idealite faktörü haritalanması Cheung analizi.	66
Şekil 4.26. 500°C’de ısıtılma tabi tutulmuş SPT194 numunesinde, 12x15 adet I-V ölçümüne ait engel idealite faktörü haritalanması Standart I-V analizi.	67
Şekil 4.27. SPT191 Referans numunesinde Cheung yöntemi ile hesaplanan engel yüksekliğinin n ile değişimi.	68
Şekil 4.28. SPT191 Referans numunesinin I-V ölçümlerinin standart analizinden hesaplanan engel yüksekliğinin n ile değişimi.	69
Şekil 4.29. SPT192 300°C’de ısıtılma tabi tutulmuş numunede Cheung yöntemi ile hesaplanan engel yüksekliğinin n ile değişimi.	69
Şekil 4.30. SPT192 300°C’de ısıtılma tabi tutulmuş I-V ölçümlerinin standart analizinden hesaplanan engel yüksekliğinin n ile değişimi.	70
Şekil 4.31. SPT193 400°C’de ısıtılma tabi tutulmuş numunede Cheung yöntemi ile hesaplanan engel yüksekliğinin n ile değişimi.	70
Şekil 4.32. SPT193 400°C’de ısıtılma tabi tutulmuş numunenin I-V ölçümlerinin standart analizinden hesaplanan engel yüksekliğinin n ile değişimi.	71

Şekil 4.33. SPT194 500°C’de ısıtılma tabi tutulmuş Cheung yöntemi ile hesaplanan engel yüksekliğinin n ile değişimi.....	71
Şekil 4.34. SPT194 500°C’de ısıtılma tabi tutulmuş numunenin I-V ölçümlerinin standart analizinden hesaplanan engel yüksekliğinin n ile değişimi.....	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Referans numunesi ve farklı sıcaklıklarda tavllanmış numuneler için XRD ölçüm detayları.....	40
Çizelge 4.2. SPT191 Referans numunesinde Cheung yöntemi ve $\ln(I)-V$ eğiminden hesaplanan engel yüksekliğinin Gauss dağılımına ait parametreler.....	44
Çizelge 4.3. SPT192 300°C’de ısıtılma tabii tutulmuş numunede Cheung yöntemi ve $\ln(I)-V$ eğiminden hesaplanan engel yüksekliğinin Gauss dağılımına ait parametreler.....	48
Çizelge 4.4. SPT193 400°C’de ısıtılma tabii tutulmuş numunede Cheung yöntemi ve $\ln(I)-V$ eğiminden hesaplanan engel yüksekliğinin Gauss dağılımına ait parametreler.....	52
Çizelge 4.5. SPT 194 500°C’de ısıtılma tabii tutulmuş numunede Cheung yöntemi ve $\ln(I)-V$ eğiminden hesaplanan engel yüksekliğinin Gauss dağılımına ait parametreler.....	56

1. GİRİŞ

Yüzyıllık gemişı ile günümüzde önemli yer tutan yarıiletkenler üzerinde yapılan araştırmalar başladığı ilk günden itibaren büyük ilerleme kaydederek günümüz teknolojisinin lokomotifi olmuştur. Kristal büyütme tekniklerindeki kazanımlar ile genişleyen araştırma yelpazesinde; yarıiletkenler temel elektronik uygulamalarına ilaveten algılayıcı sensörlerinde, optik aygıtlarda ve yenilenebilir enerji kaynaklarında olmak üzere geniş kullanım alanına sahip olmuştur.

Metal-yarıiletken yapıların doğrultma özelliği ile ilgili ilk çalışma 1874'de Braun ile başlamıştır. Pickard 1906'da silisyum tabanlı nokta kontak detektör patentini almıştır. Sonraki yıllarda Pierce birbirinden farklı yarıiletkenler üzerine yaptığı farklı metalizasyonlar ile diyotların doğrultma özelliğini açıklamıştır (Rhoderick and Williams 1988).

Schottky *et al.* 1931'de metal yarıiletken kontaklarından geçen akımı kontakta bir potansiyel engelin olduğu fikrini kabul ederek açıklamışlardır. 1938 yılında ise birbirlerinden bağımsız olarak Schottky ve Mott elektronların potansiyel engel üzerinden sürüklenme ve difüzyon şeklinde geçişini öngörmüşlerdir (Rhoderick and Williams 1988).

1938'de Mott potansiyel engelin, metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarının farkından dolayı olduğunu ifade etmiştir. Buna bağlı olarak, elektrik alanın sabit, elektrostatik potansiyelin lineer olarak değişebilmesi için engel bölgesinin yüklü iyonlardan arınmış olması gerektiğini belirtmiştir. Bu fikrin aksine 1939'da Schottky Poisson denklemlerine göre; elektrik alanın lineer, elektrostatik potansiyelin ikinci dereceden artması için engel bölgesinde sabit yoğunluklu serbest yüklerin bulunması gerektiğini öngörmüştür. Engel yüksekliğini belirleyen uzay yükleri hakkında benzer fikirler 1939 ve 1941'de Davydov tarafından da öne sürölmüştür (Rhoderick and Williams 1988).

İkinci dünya savaşı sırasında metal-yarıiletken kontakların anlaşılmasında önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu ilerlemeler yarıiletken fiziğinin gelişmesine önemli katkılar sağlamıştır. Bu dönemdeki en önemli katkı;1921'de geliştirilen Richardson'ın termiyonik emisyon teorisinin 1942'deBethe tarafından metal-yarıiletken doğrultucu kontaklara da uygulanabileceğinin gösterilmesidir. Metal-yarıiletkenler üzerine yapılan araştırmalar 1960'lara gelindiğinde hız kazanmıştır (Rhoderick and Williams 1988).

Schottky engelini görüntü kuvvetinden dolayı azalmasını Sze *et al.* 1964 yılında doğrulayabilmişlerdir. Crowel and Sze (1966) Schottky'nin difüzyon ve Bethe'nin termiyonik emisyon teorisini birleştirerek termiyonik emisyon difüzyon teorisini geliştirmişlerdir.

Padovani and Sumner (1965) azalan sıcaklıkla idealite faktörünün arttığını, engel yüksekliğinin ise azaldığını bulmuşlardır. Bu anormalliğe " T_0 etkisi" veya " T_0 anormalliği"denir. Tung (1991, 1992) teorik olarak, Schmitsdorf *et al.* (1997, 1999) ise deneysel olarak engel yüksekliği ile idealite faktörü arasında lineer bir ilişki olduğunu belirtmişlerdir.

Yarım yüzyılı aşkın bir süredir metal-yarıiletken kontaklar çalışılırken özellikle son 15 yıl engel yüksekliğinin homojensizliği yoğun bir araştırma konusu olmuştur. Örneğin, 1990'lı yıllardan itibaren Tung, Schottky diyotlarının ideal olmayan davranışlarını, potansiyel engelin nanometre ölçeğindeki homojensizliklerinden kaynaklandığını savunmuştur (Tung 1991,1992).

Son yıllarda homojen olmayan engel yüksekliği ile ilgili araştırmalar artış göstermiş ve temel olarak bu homojensizliklerin sebepleri iki farklı yaklaşım ile ortaya konulmuştur.

Bu yaklaşımlardan ilki farklı engel yüksekliklerine sahip küçük yerel bölgelerin birbirlerini etkilemediği kabulüne dayanan paralel iletim modelidir (Ohdomari and Tu 1980).

Özellikle son zamanlarda yaygın olarak kullanılan ikinci yaklaşım ise farklı engel yüksekliklerine sahip küçük alanların birbirleri ile etkileşimini dikkate alan “Pinch-off” modelidir (Tung 1992). Bu model Tung tarafından geliştirilmiş ve Schottky diyotların elektriksel özelliklerini analiz etmede başarıyla kullanılmıştır (Lahnor *et al.* 1995).

1.1. Çalışmanın Amacı

Schottky eklemi genel olarak çoğunluk taşıyıcıların akım iletimini sağladığı yüksek anahtarlama hızı ile yüksek frekans uygulamalarına uygun yüksek performanslı iki terminalli aygıttır. Yüksek frekanslara tepki verme özelliği yanında düşük gürültü değerlerine sahip olmaları gibi özelliklere de sahiptirler. Metal-yarıiletken yapılarda oluşan Schottky kontaklarının performanslarına etki eden en önemli hususlardan birisi ara yüzeyde oluşan engel dağılımıdır. Bu itibarla bu çalışmada metal-yarıiletken kantağın oluşumunda ortaya çıkan Schottky potansiyel engel dağılımı deneysel olarak incelenmiştir. Farklı ısı işlem basamakları sonucu ara yüzeyindeki silicide oluşumu ile engel yüksekliği (ϕ_b) ve idealite faktörünün dağılım parametreleri araştırılmıştır.

1.2. Kaynak Özetleri

1.2.1. Literatürde Schottky

Mo – Si Schottky bariyerleri üzerine yapılan ilk çalışmalardan biri Miyamoto tarafından gerçekleştirilmiştir. Miyamoto (1969) ideal olarak *Mo-Si* Schottky engellerinin elde edilebilirliğini incelemiş ve mevcut yöntemler arasında ideale en yakın sonuçların sputter metodu ile elde edilebileceğini rapor etmiştir. Miyamoto (1977) bir başka çalışmasında ise yine sputter yöntemi ile elde edilen Schottky bariyerlerin *Mo-Si* gibi metal-yarıiletken ara yüzeylerindeki kirlilik oluşumunu kondüktans ölçümü ile incelemiştir.

Silisyum ince film yapılarda etkin omik kontak ve bariyer yüksekliğine ilişkin sorunlar için *Al/a-Si:H/n+c-Si/Al* ile *Al/a-Si:H/n+c-Si/Mo* yapılar çalışılmıştır (Kolodziej and

Pisarkiewicz 1991). Yakimova *et al.* (1998) ise Schottky engel yükseklikleri (*SBHs*) üzerindeki ara yüzey davranışlarını n -tipinde farklı metaller kullanarak incelemiştir. Bu çalışmada metallerin *SBH*'nin metalin iş fonksiyonu ve yarıiletken ara yüzey oluşumundan etkilendiği bir kez daha gösterilmiş ve bu etkinin sputter tekniği ile iyileştirilebileceği gösterilmiştir.

Hamuguchi and Hayamizu (1991) Molibdenin Silisyum içerisine difüzyon mekanizmasını inceleyerek var olan derin seviyelerin kompleks bir Molibden yapısından yada katkılayıcıdan dolayı olmadığını göstermişlerdir. Ayrıca bu çalışmada 1000°C 'de Molibdenin difüzyon katsayısının $2 \times 10^{-10} \text{cm}^2/\text{s}$ olduğu tespit edilmiştir. Chi and Chen (2002) de *Yb* ince filmleri ile *Si* kristali alt tabakaları arasındaki düzensiz yapılaşmış (amorf) ara yüzeylerin oluşumunda baskın difüzyon türlerini belirlemek amacıyla bir çalışma yapmışlar ve bu çalışma neticesinde *Mo*'nin kullanılması sureti ile baskın difüzyon türlerinin belirlenebileceğini tespit etmişlerdir. Benton *et al.* (1999) yaptıkları bir çalışmada Molibdenin Silisyum içerisinde çözünürlüğünün $D = 0.26 * \exp^{[-2.2]eV/kT} \text{cm}^2/\text{s}$ ile ifade edilebileceğini göstererek ve Molibdenin Silisyum içerisindeki çözünürlüğünün kristal hataları ve yüzeyin yakınlığına bağlı olarak kolaylaşacağını vurgulamışlardır.

1.2.2. Schottky diyotların akım-gerilim karakteristikleri

Schottky diyotların başlangıç gerilimi ve potansiyel engel oluşum seviyesi değerinin etkisi, tavlama sıcaklığı ve ölçüm esnasındaki kontak basıncı gibi akım-gerilim karakteristiklerinin belirlenmesi ile ilgili olarak yapılan bir çalışmada Metal-*6H* - *SiC* kontak kullanılarak Schottky bariyerlerin akım-gerilim karakteristik değerleri incelenmiştir. Bu çalışmada *Mo*, *Ni*, *Au* ve *Al* metalleri kullanılarak Schottky yapısı hazırlanmıştır. Farklı metallerin akım-gerilim karakteristiğine olan etkilerinin yanında (0001)*Si* yada (0001)*C* gibi tekli kristal yüzeylerinin etkisi de incelenmiştir (Strelchuk and Rastegaeva 1997). Bu konu üzerine yapılan başka bir çalışmada dielectrophoresis yöntemi ile sentetik yüksek basınçlı elmas parçacıklarının kaplandığı silisyum ve molibdenin kaplanması öncesi ve sonrasında elektrik alan emisyon karakteristikleri

kıyaslanmış ve film kalınlığına bağılı olarak akım-gerilim karakteristiklerinin büyük bir değişim gösterdiği gösterilmiştir (Zhirnov *et al.* 1996).

Bir başka çalışma da $Mo/a - SiNxHy/Mo$ ince film diyotların doğru akım gerilim davranışları farklı $a - SiNxHy$ -plazma-yığma şartları için incelenmiş ve Schottky aygıtlarının doğru akım gerilimini iletmede çok iyi olduğu tespit edilmiştir (Oversluizen *et al.* 1997). Schottky metali olarak Cr, Mo, W ve Pt kullanılan bir başka çalışmada amorf yapıdaki silisyum içerikli Schottky diyotlarının akım-gerilim karakteristikleri sıcaklığa bağılı olarak ele alınmıştır (Vink *et al.* 1992). Schottky kontakların elektriksel karakteristik özelliklerini tespit etmek ve modellemek amacıyla söz konusu kontakların akım-gerilim karakteristiklerinin kullandığı bir başka çalışma da düzgün bir kontak yapısı için, $10 V$ değerinden daha düşük olan ileri ön gerilim de test edilen bir model kullanmıştır. Düzgün olmayan metal-yarıiletken kontaklar için, parametrik hesaplama metodu geliştirilmiş ve kullanmıştır. Deneysel çalışmalar, yaklaşık $6 mm^2$ 'lik bir kontak alanına sahip $n - Si/Mo$ kontaklar üzerinde bulunan Schottky diyot numuneleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Baranov *et al.* 2006).

1.2.3. Mo-Si kontakların ters akım-gerilim analiz çalışmaları

Ters akım-gerilim analizleri ile ilgili olarak yapılan bir çalışmada metal- $GaAs$ kontakları ile Schottky engelinin ters akım-gerilim karakteristikleri ölçülerek diyotlar üzerindeki ters-akım ilişkisinin lineer kısımları elde edilmiştir (Bulyarski and Zhukov 2001). Bu ilişkinin kafes titreşimlerinden kaynaklanan elektron etkileşimiyle ilişkili olduğu yine bu çalışmada belirtilmiştir. Ayrıca $Mo - GaAs:Si$ kontaklarının ters akımları farklı sıcaklıklarda analiz edilerek elde edilen akım-gerilim karakteristiklerinin fonon destekli elektron tünelleme yardımı ile kontrol edilebileceği gösterilmiş ve benzer bir mekanizmanın $Ni - GaAs:Si$ Schottky diyotları içinde ters akım-gerilim ilişkisine yol açtığı vurgulanmıştır (Bulyarski and Zhukov 2001). Ters ön-gerilim işlemi altında $Mo/a - Si:H$ Schottky diyodunda düşük frekanslı kısa devre davranışının gözleendiği deneysel bir çalışma da (Aflatooni *et al.* 1996) artan ters akım ve düşük ön gerilim voltajlarında kısa devrenin arttığı tespit edilmiştir. Buradaki düşük ön gerilim voltajının

$1/f$ ile benzer davranış sergilediği de vurgulanmıştır. Elektriksel yüklenme ve bunun neticesinde ön gerilimden kaynaklanan malzeme değişkenlikleri nedeniyle yüksek ters gerilim değerlerinde $1/f$ değerinden büyük oranlarda sapmalar gözlenmiştir.

1.2.4. Schottky kontakların termal özellikleri

Bu konuda dikkati çeken çalışmalardan birinde amorf yapıdaki silisyum ($a-Si:H$) yüzeylerin termal ve plazma oksidasyon işlemleri öncesinde ve sonrasındaki durumları incelenerek yüzey oksitlerinin kalınlıklarının kullanılan Mo Schottky bariyer yapılarının elektriksel özellikleri ile ilgili olduğu gösterilmiştir (Vink *et al.* 1992). Bir başka çalışmada Ni film içerisine sırasıyla W, Pt, Mo ve Zr gibi ara yüzey metal filmlerinin ilave edilmesiyle $NiSi$ 'un termal stabilitesinin iyileştirilebileceği gözlenmiştir (Huang *et al.* 2007). Sıcaklık değerlerinin $400, 600$ ve $800^\circ C$ olduğu durumlarda hidrojen atmosferi altında termal tavlamaya maruz bırakılan $TiNx(TiBx) - n - Si - n + -Si$, $Au - TiNx(TiBx) - n - Si - n + -Si$ ve $Au - Ti(Mo) - TiNx(TiBx) - n - Si - n + -Si$ Schottky bariyer kontakların ısı kararlılıklarının incelendiği çalışma neticesinde kontaklarda yapısal ve biçimsel değişimlerin varlığı ve buna bağlı olarak ara yer alaşımlarında elektrofiziksel özelliklerin bozulmasının $600^\circ C$ 'de başladığı rapor edilmiştir (Boltovets *et al.* 2003). Biswas *et al.* (2005) ise $Ni:Si$ ve $Mo:Si$ yapılarının karakteristiklerinin, saf silisyum tabakalarının tamamen yok edilmesi yöntemi ile belirlenebileceğini göstermişlerdir. Bu amaçla Ni ile Mo in SiO_2 ile silisyum bileşiklerinin etkileşimi iş fonksiyonu ve termal denge cinsinden ifade edilmiştir.

1.2.5. Schottky Kontakların Optik Özellikleri

Her iki ucunda Schottky bariyerleri olan düz bir metal-yarıiletken-metal yapı, bir optik sinyal işleme sisteminde foto detektörle rekabet edebilmesinden dolayı geniş bir uygulama alanına sahiptir. Yapılan bu çalışmada, sonsuz büyüklükte nötr bir bölgeye sahip olan $Mo/n - tipi Si/Mo$ yapısının düşük frekansta ($100 Hz - 2 MHz$) optik tepkisi üzerine işlem durumlarının etkileri belirtilmiştir. Bu çalışmada optik tepki spektrumunun ön-gerilim şartlarından dolayı kayda değer bir değişiklik gösterdiğini

tespit etmişlerdir (Kobayashi *et al.* 2002). Bir başka çalışmada yine düzlemsel metal-yarıiletken-metal (*MSM*) yapıların *DC* ve/veya *AC* optiksel özelliklere karşı daha duyarlı olmasını sağlamak için birbirleri ile bütünleşmiş Schottky bariyer metal-yarıiletken-metal (*SB – MSM*) yapılar üretilerek incelenmiş ve deneysel olarak düzlemsel molibden n-tipi silisyum molibden (*Mo/n – Si/Mo*) yapılar kullanılarak optik sinyalin elektronik sinyale dönüştürülmesi suretiyle fotoakım geriliminin kontrol edilebilirliği gösterilmiştir (Masui *et al.* 2003). Kitagawa *et al.* (2005) ise *MSM* yapıların optik ışın demeti profillerinin özelliklerini deneysel olarak incelemişler ve mevcut fotoelektrik fonksiyon değerine ilave olarak bu yapıların çıkış fotoelektrik değerlerinin ön-gerilim uygulanmak sureti ile kontrol edilebileceğini göstermişlerdir. Yakın geçmişte yapılan bir çalışmada ise yüzeysel *MSM* optik sensör yapıların deneysel *DC* fotoakım kazanç özellikleri sıcaklığa bağlı, akım-gerilim karakteristiklerindeki değişim, ters ön gerilimli Schottky bağlantısında üretilen fotoakım taşıyıcılarının artışına dayandırılmıştır (Atiwongsangthong and Titiroongruang 2009).

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Giriş

Gerek $p - n$ eklemi gerekse metal-yarıiletken kontaklar elektronik devre uygulamalarında geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Günümüzde ortaya çıkan teknolojik rekabet, daha küçük boyutta, hızlı ve kararlılığı yüksek, güç tüketimi daha düşük cihazların tasarlanmasını zorunlu hale getirmiştir. Bu nedenle yarıiletken teknolojisi istenen özellikleri yüksek oranda sağlama potansiyelini muhafaza etmesinden dolayı araştırmaların ana temasını oluşturmaktadır.

Alternatif akımı (AC) doğru akıma (DC) dönüştürmek için yapılan doğrultma işleminde diyotlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Diyotlar özellikle yüksek frekanslara çıkıldıkça bu frekansa uyumu sınırlı kalmaktadır. Bununla beraber Schottky diyotlar $p - n$ eklemlerine nazaran akımın çoğunluk taşıyıcıları ile sağlanmasından ötürü hız gerektiren uygulamalarda avantajlıdır. Bu özelliklerinin dışında Schottky diyotlar yüksek frekanslarda $p - n$ eklemlerine göre daha düşük gerilimlerde anahtarlama yapabilmelerinden dolayı tümleşik devre uygulamalarına daha uygundur.

2.2. Metal-Yarıiletken Kontaklar

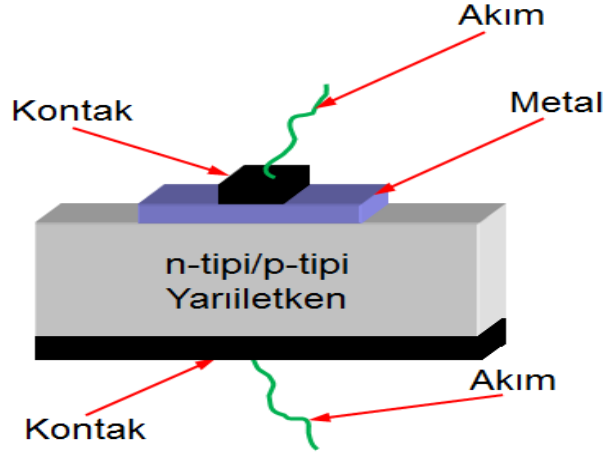
Kontak kelimesi genel olarak yarıiletken üzerinde metalle kaplama veya metalizasyon sonrası oluşan yapı anlamına gelmektedir. Bu kontaklarda metal-yarıiletken geçişi atomik düzeyde gerçekleşmektedir. Metal-yarıiletken kontaklarda metal olarak saf metal veya metal alaşımları kullanılırken yarıiletken olarak uygun iş fonksiyonuna sahip n –tipi ya da p –tipi yarıiletken malzemeler kullanılmaktadır. Şekil 2.1’de genel olarak bir metal-yarıiletken kontak (MS) yapısının şematik resmi gösterilmektedir.

Hemen hemen bütün yarıiletken aygıtlar çalışma ortamları gereği güç ya da sinyali alıp dış devre ile bağlantı sağlayan metal kontaklar üzerinden iletim sağlarlar. Bu nedenle doğrultucu olmayan yarıiletken-metal kontaklar da bu aygıtların bir parçasıdır. Sonuçta bütün elektronik devrelerde bulunan metal-yarıiletkenlerin üretimleri ve performansları büyük önem taşımaktadır. Son yıllardaki gelişmelerin ışığında yüksek hassasiyetlere sahip yarıiletken kaynaklı nano yapıların ve aygıtların üretimi mümkün hale gelmiştir. Bunun aksine, metal-yarıiletken ara yüzeyin anlaşılmasına yönelik kaydedilen gelişmeler sınırlı kalmıştır. Metal-yarıiletken ara yüzey durumu Schottky engel yüksekliğini belirleyen faktördür. Schottky engel yüksekliği ile metal-yarıiletken ara yüzey yapısı arasındaki ilişki için birçok model geliştirilmiş olmakla beraber tam olarak anlaşılması değildir. Bu durum iki önemli nedene dayandırılmıştır: Bu nedenlerden birincisi çok kristallilik ve buna bağlı olarak kristal hatalarının atomik yapılarının herhangi bir metal-yarıiletken yapısında deneysel çalışmayı karmaşık hale getirmesidir. İkinci nedeni ise Schottky engel yüksekliği üzerine yapılan bazı kabuller ile birçok hususun ihmal edilmesidir (Brillson 1993).

Bir metalle bir yarıiletken kontak oluşturursa, metal ve yarıiletken arasında potansiyel engel oluşacak ve bu potansiyel engel yük taşıyıcılarının geçişini belirleyecektir. Sadece taşıyıcıların çok az bir kısmı söz konusu potansiyel engeli bir yönde geçme şansına sahipken diğer yönde geçiş kolaylığı oluşur. Özetle metal-yarıiletken eklemine harici bir gerilim uygulanacak olursa, aşağıdaki iki etkiden biri gerçekleşir:

I. Yarıiletken tarafındaki engel, harici gerilimin polaritesine bağlı olarak artar veya azalır. Bir başka ifade ile yükler potansiyel engelin yarıiletken tarafında daha düşük veya daha yüksek enerjiye sahip olacaktır. Bu durumda engel yüksekliği metal tarafında değişmeyecektir. Bu sonuç Schottky engeli olarak bilinir

II. Metal tarafındaki engel harici gerilimden bağımsız olarak sabit kalır.



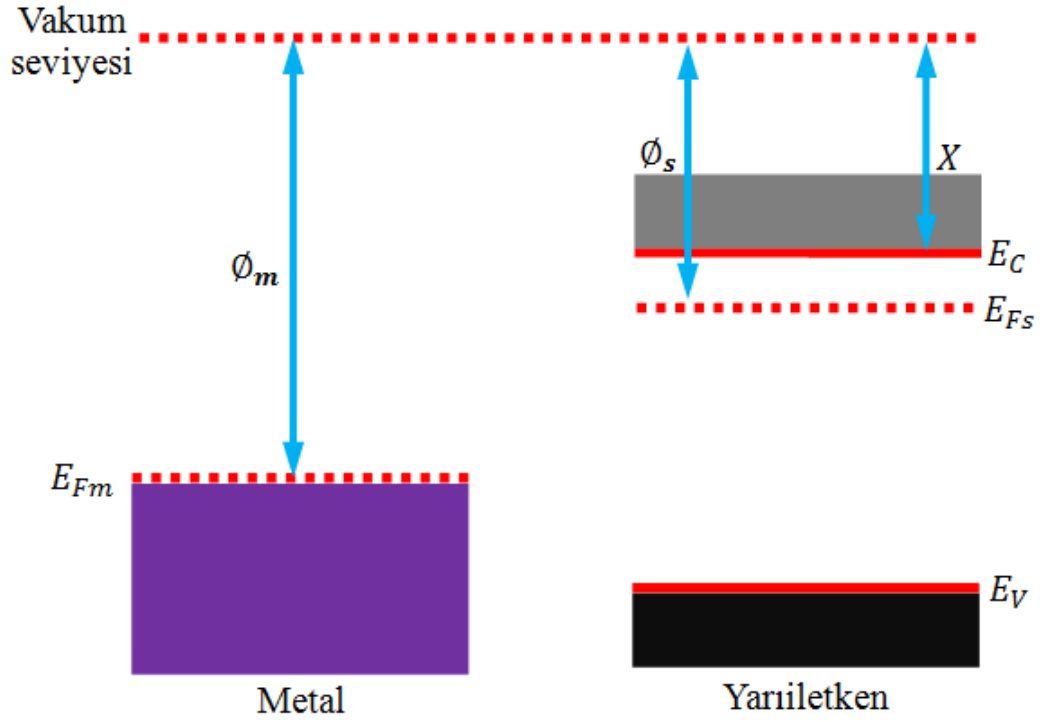
Şekil 2.1. Genel bir metal-yarıiletken kontak (*MS*) yapısı

Genel olarak eklemleriki kategoride sınıflandırılır, bunlar:

- I. Doğrultucu (Schottky veya p-n eklem) eklemler,
- II. Omik eklemler.

2.2.1. Schottky Eklemi

Doğrultucu kantağa sahip yapı üzerinden geçen akımın devreyi tamamlaması için ikinci kontak olarak yarıiletken ile dış devre arasında Omik kontak oluşturulmalıdır. Omik kontaklar Schottky kontakların aksine her iki yönde akım iletim yeteneğine ile Ohm yasasına uyarlar. Şekil 2.2’de birbirinden izole edilmiş metal ve yarıiletkenin enerji bant diyagramları verilmiştir. Şekilde metal ve yarıiletkenin her ikisi için vakum seviyelerinin aynı olmasına karşın Fermi enerji seviyelerinin farklı olduğu görülmektedir. Bu durum tamamen malzemelerin enerji-bant diyagramı ile ilgilidir.



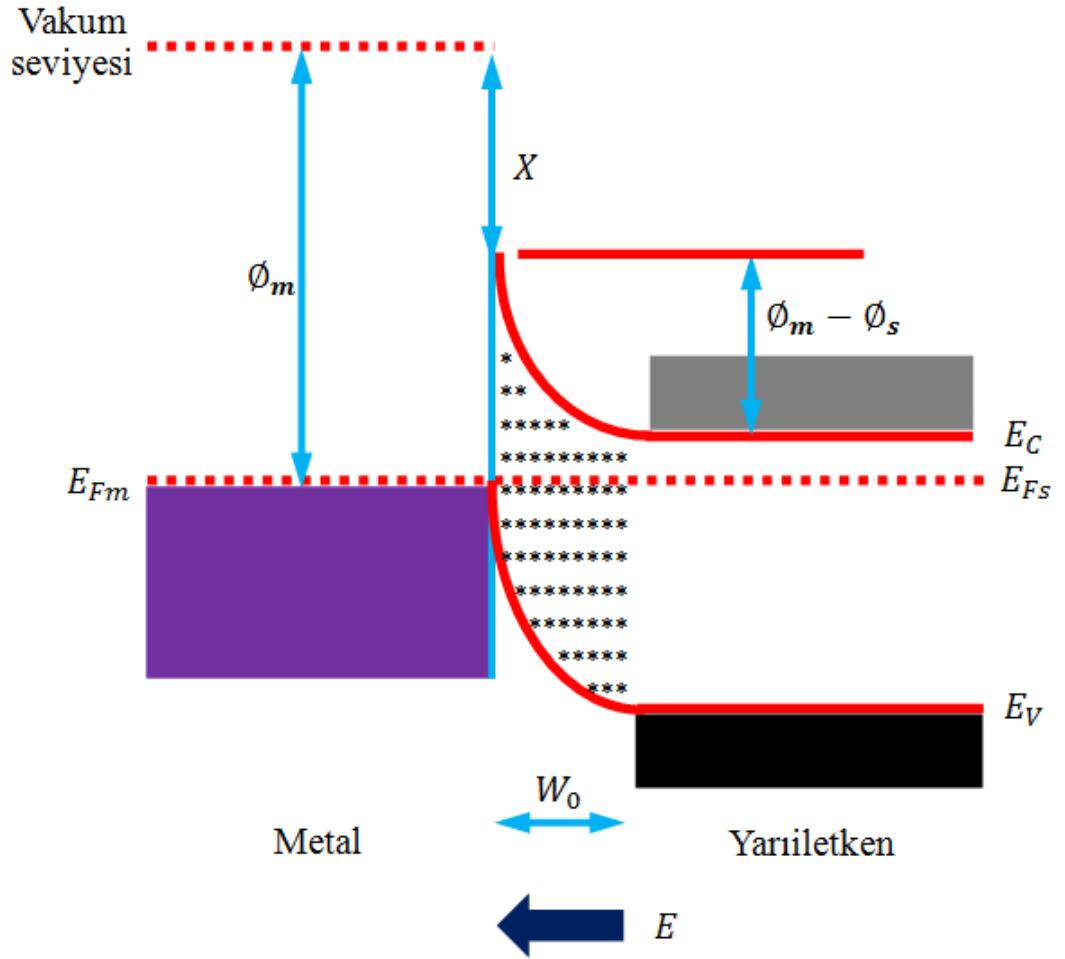
Şekil 2.2. Birbirinden izole edilmiş olan metal ve n –tipi yarıiletkenin enerji bant diyagramları

Metal ile n –tipi yarıiletken kontak haline getirildiğinde yarıiletkenin iş fonksiyonu metalin iş fonksiyonundan küçükse doğrultucu eklem meydana gelir. Denge olan bir sistemde yalnız bir tane Fermi seviyesi olacağından Fermi seviyesi yüksek olandan Fermi seviyesi düşük olana Fermi seviyeleri eşitleninceye kadar yük akışı olur. Burada Fermi seviyelerinin dengede olmasından kasıt yarıiletkenin Fermi seviyesinin metalin Fermi seviyesine inmesidir. Aslında metalin Fermi seviyesi çok az da olsa yükselir fakat bu ihmal edilecek kadar küçük olduğu için sabit kabul edilir. Fermi seviyesindeki azalma miktarı metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarının farkıdır. V_{Dif} difüzyon potansiyelini, ϕ_m metalin iş fonksiyonunu, ϕ_s yarıiletkenin iş fonksiyonunu, X_s elektron ilgisini ve ϕ_B metal tarafındaki potansiyel engel yüksekliğini ifade etmek üzere bu modelde difüzyon potansiyeli ve iş fonksiyonu ile elektron ilgisine bağlı olan metal tarafında meydana gelecek engel yüksekliği sırasıyla aşağıdaki formüllerle ifade edilir:

$$V_{Dif} = (\phi_m - \phi_s) \quad (2.1)$$

$$\phi_B = (\phi_m - X_s) \quad (2.2)$$

Bant bükülmesinin miktarı ve elektronun taşınma yönü metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farka bağlıdır. İki malzeme birbirinden izole edildiği zaman, Şekil 2.2’de gösterildiği gibi ikisinin vakum seviyesi aynıdır. Fakat iki malzeme kontak haline getirildiği zaman, eklemnin iki tarafında da Fermi enerji seviyelerinin pozisyonu eşit oluncaya kadar eklemden yük akışı oluşur.



Şekil 2.3. Metal/n –tipi Schottky eklemi ve denge durumuna geldikten sonra oluşan enerji bant diyagramı.

Vakum seviyesi metalin Fermi enerji seviyesinden ϕ_m kadar; yarıiletkenin Fermi enerji seviyesinden ise ϕ_s kadar yüksektir. Neticede yarıiletkendeki enerji bantları eklemnin iki

tarafındaki Fermi enerji seviyelerini aynı seviyeye getirmek için $\phi_m - \phi_s$ değerine eşit miktarda aşağı kaymalıdır. Şekil 2.3’de görüldüğü gibi sistemin dengeye ulaşabilmesi için yarıiletkenin enerji bandı metalinkine oranla $\phi_m - \phi_s$ değeri kadar aşağı kaymıştır. Bir başka ifade ile Fermi seviyesi yüksek olan yarıiletkenden Fermi seviyesi düşük olan metale doğru sistem dengeye gelene kadar elektron akışı olmuştur. Elektron akışı ile birlikte yarıiletken tarafındaki iletkenlik bandı ile valans bandı Fermi seviyesinin düşme miktarı kadar aşağı doğru inmiştir. Yarıiletken tarafından metal tarafına doğru akan elektronlar geride iyonize olmuş donör atomlarını bırakırlar. Burada bu atomlar hareket edemediği için lokalize yüklerdir. Bu nedenle bu yükler uzay yükü olarak tanımlanır.

Elektron akışı ile birlikte yarıiletken tarafında elektronca fakir bir bölge oluşur. Bu bölge serbest yüklerden arınmış deplasyon bölgesidir. Bu bölge yarıiletkendeki katkı miktarı arttıkça ya da düz besleme durumunda daralır, katkı miktarı azaldıkça ya da ters beslem durumunda ise genişler. Düz beslemde yani metal kısma pozitif yarıiletken kısma negatif gerilim uygulandığında yarıiletken kısımdaki enerji bantları yukarı doğru yükselecek ve akımın artıdan eksiye, elektronların ise eksiden artıya doğru hareket ettikleri düşünülürse elektronlar yarıiletkenden metale doğru geçecektir. Ters beslem durumunda ise metale eksi yarıiletkene artı gerilim uygulandığında yarıiletken kısımdaki enerji bantları aşağı doğru bükülecek ve diyot akımı iletmeyerek kesime gidecektir. Sıfır harici gerilimde ve termal dengede birbirine eşit ve zıt yönde geçen akım I_0 dir.

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{\phi_B}{kT}\right) \quad (2.3)$$

Düz beslemede ise durum ters beslemeden farklı olup aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

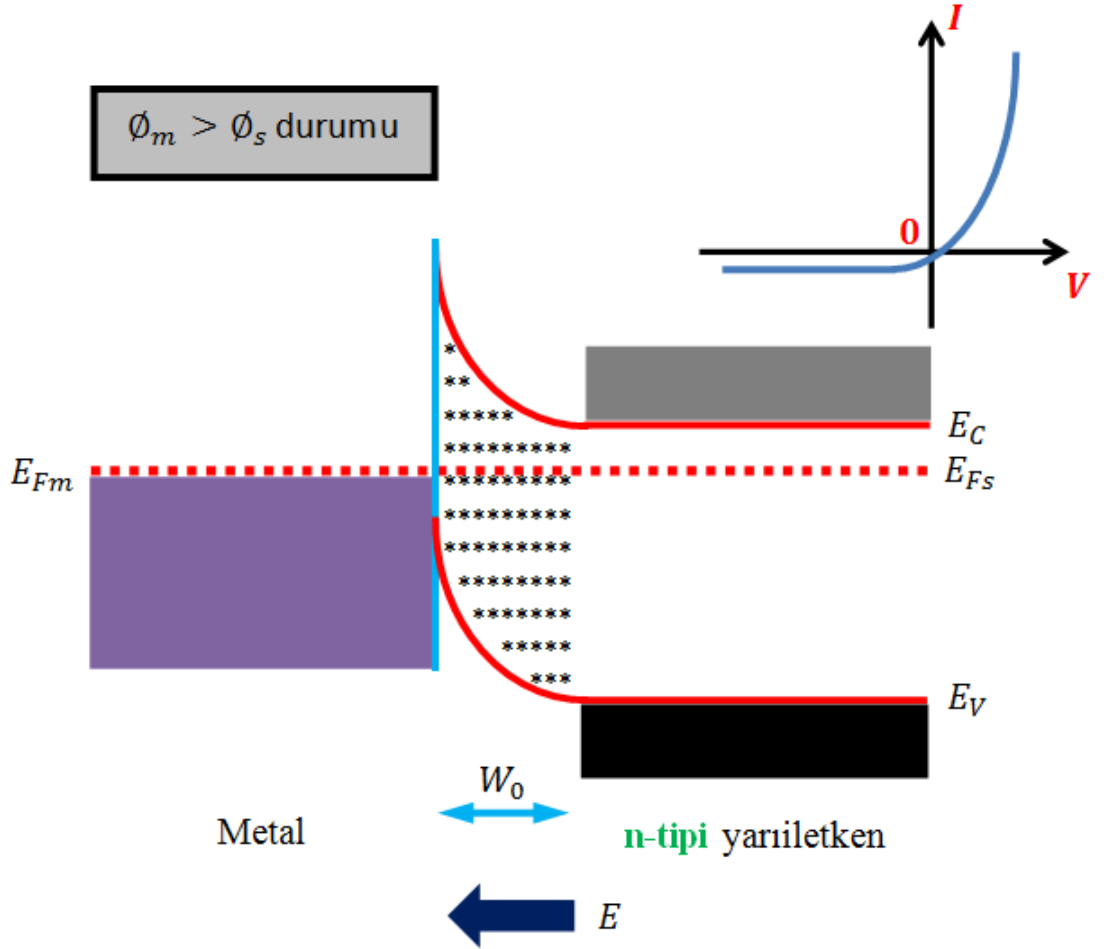
$$I_f = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{\phi_B - V_a}{kT}\right) \quad (2.4)$$

Geçen net akım ifadesi bu durumda her iki yönde akan akımların farkı olup 2.6 denklemleri ile ifade edilir:

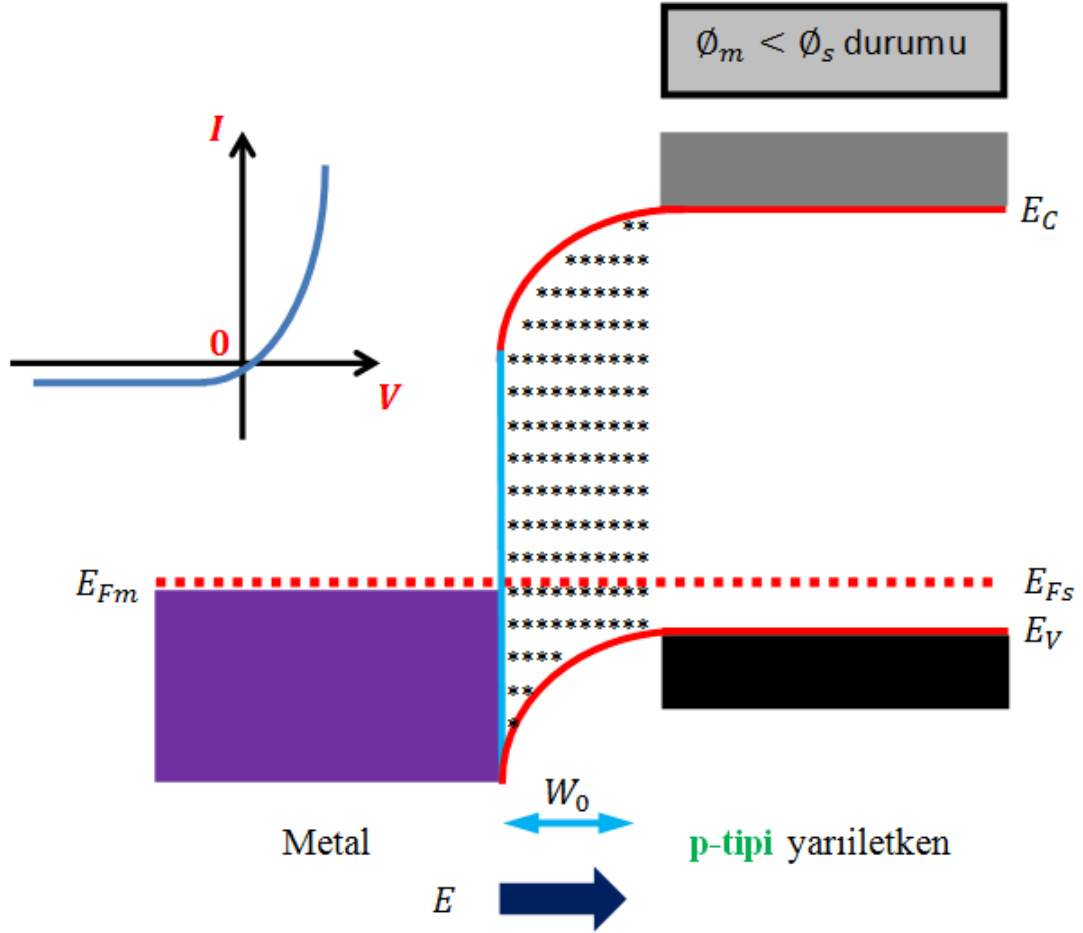
$$I = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{\phi_B}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{V_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

veya

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{V_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.6)$$



Şekil 2.4a. Metal/n –tipi Schottky eklemi ve enerji bant diyagramı.



Şekil 2.4b. Metal/p –tipi Schottky eklemi ve enerji bant diyagramı.

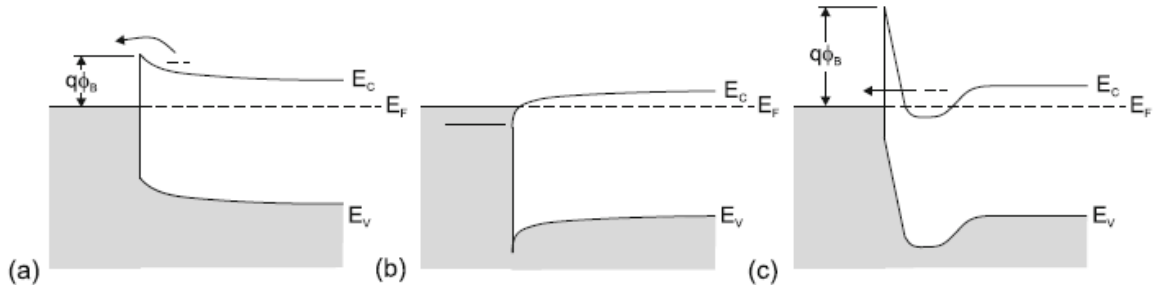
Schottky kontaklarında söz konusu bant enerjisinin kontak öncesi ve sonrası durumu n –tipi ve p –tipi malzemeler için sırasıyla Şekil 2.4a ve 2.4b’de gösterilmiştir. Metal ve yarıiletken kontağı oluşturulduğu zaman, söz konusu şekillerde gösterildiği gibi deplasyon bölgesi eklemın yarıiletken tarafında oluşur. Ara yüzeyde oluşan potansiyel engel eklemın hazırlanış şartları ile de ilgilidir (Brillson 1993; Willardson and Beer 1981).

2.2.2. Omik kontak

Omik kontaklar hemen hemen bütün aygıtlar için gereklidir. Omik kontaklar tipik olarak yarıiletken içine aşırı tiplilik kazandıracak katkılama atomu içeren metalinin metalizasyonu ile elde edilir. Kontak kendisini oluşturan metal-yarıiletken çiftinin genel olarak tektik sıcaklığında oluşturulur. Eğer sıcaklık tektik sıcaklığından daha büyük seçilirse, katkılayıcılar kolaylıkla yarıiletkene difüze olur. Uygun ısıl işlem sonrası metal altında oldukça yüksek oranda katkılanmış bir bölgenin olduğu yarıiletken tabakaya sahip bir bölge elde edilir. Bununla beraber sıvı-faz reaksiyonları nedeniyle oluşan kontak yapıları homojen olmayan yapıya sahip olabilmektedirler (Grundmann 2010).

Omik kontaklar yapılarından dolayı doğrultucu özelliğe sahip olmamakla beraber, gerek metal gerekse yarıiletken için azda olsa kontak direncine sahiptir. Kontak boyunca oluşacak gerilimdeki azalma aktif tabakada oluşacak olan gerilim azalmasından daha düşük olacaktır. Düşük katkılama değerlerinde, taşınım işlemi genel olarak termiyonik emisyon tarafından gerçekleşir. Yüksek katkılama değerlerinde, kontak direnci tünelleme akımı tarafından belirlenir. Kontak direnci katkılamaya bağlı olarak üstel olarak azalır.

Omik kontakların oluşumunda farklı üç mekanizma mevcuttur. Bu mekanizmalar; düşük engel yüksekliği, birikim tabakası ve aşırı katkılama olarak verilir. Söz konusu bu mekanizmalar Şekil 2.5'de şematik olarak gösterilmiştir (Grundmann 2010).



Şekil 2.5. Omik kontak oluşum mekanizmaları

a) düşük engel yüksekliği, b) birikim tabakası, c) aşırı katkılama ve tünelleme (Grundmann 2010)

Omik kontaklar karakteri itibari ile direnç özelliğinde eklem olup uygulanan gerilim V/I oranı sabittir. Normal şartlarda, homojen metaller ve yarıiletkenler yukarıda bahsi geçen eşitliğe uygun davranırlar. Bununla beraber, benzer olmayan iki malzemenin temas yüzeyleri boyunca gerçekleşecek elektrik iletimindeki direnç uygulanan gerilimin bir fonksiyonu olabilir. Elektrik akımının öncelikle metalden temas yüzeyine ve daha sonra da temas yüzeyi boyunca yarıiletkene aktarılması nedeniyle, akım/gerilim (I/V) karakteristikleri ancak metal-yarıiletken temas yüzeyinin gerçek bir omik kontak oluşturması ya da metal hacmi ve yarıiletken ile kıyaslandığında oluşabilecek gerilim azalması ihmal edilebilir düzeyde olması durumlarında lineer özellik gösterecektir (Brillson 1993).

Düşük akım gerektiren uygulamalarda yüksek kontak direnci tolere edebilirler. Aygıtların boyutça küçülmelerine paralel olarak; aynı kontak direncini sergileyebilmeleri için, kontak öz direnci ($\rho_c = R * Alan$) azalmalıdır (Brillson 1993).

2.3. Silicide Tabanlı Eklemler

Kararlı eklem oluşturmada ısı işlem sonrası metal-silisyum ekleminden metalin stokiometrik bileşiği olacak şekilde bir silicide oluşumu teknolojik öneme sahiptir. Metallerin çoğu ve neredeyse geçiş metallerinin tamamı silicide oluştururlar. Silicide yapılar katı-durum reaksiyonu sonucunda oluşmakta olup silicidelerin erime sıcaklıklarının üçte biri ya da yarısı değerindeki sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. Silicidelerin bu şekilde düşük sıcaklıklarda oluşması $Si - Si$ bağlarındaki zayıflamaya

bağlı olarak metalin silisyum içerisine difüzyonunu kolaylaştırır (Rhoderick and Williams 1988).

Silicidelerin büyük bir çoğunluğu metalik iletkenliğe sahiptirler. Bu nedenle; eğer bir metalik silicide metal-silisyum kontağın ısıl işlemi sonucunda oluşmuşsa, silicide-silisyum eklemi metal-yarıiletken kontağı gibi davranmaya başlayacak ve doğrultucu özellik sergileyecektir. Bunun dışında, silicide-silisyum ara yüzeyi silisyumun yüzeyinden difüzyon derinliğine kaymasından, kirlilikten ve düzensizlikten uzak ve kararlı yapıda olacaktır. Bu şekilde oluşturulan kontaklar genel olarak ideale yakındır. Bu kontakların mekanik tutunma özellikleri de çok iyidir. Bu özelliklerinden dolayı, bu kontaklar yarıiletken teknolojisinde oldukça büyük öneme sahiptirler. Silicideler ayrıca sahip oldukları metalik iletkenliklerinden ve metalürjik kararlılıklarından dolayı mikro devre teknolojisinde ara bağlantı malzemesi olarak da kullanılırlar (Rhoderick and Williams 1988).

2.4. Metal-Yarıiletken Kontaklarla Silicide Tabanlı Kontakların Karşılaştırılması

Metal-yarıiletken kontaklarda metal olarak saf metal veya metal alaşımları kullanılırken yarıiletken olarak uygun iş fonksiyonuna sahip n -tipi yada p -tipi yarıiletken malzemeler kullanılmaktadır. Silicide tabanlı kontaklar ise ısıl işlem sonrası metal-silisyum ekleminden metalin stokiyometrik bileşik olan silicide oluşumu temel esastır.

2.4.1. Metal-Yarıiletken kontak problemleri

Hemen hemen bütün metal yarıiletken eklemleri tek yönde yük taşınımı ile akım oluşturma davranışını bir dereceye kadar gösterirler (Şekil 2.1). Yakın zamanda ideale yakın ince film metal-yarıiletken yapıları üretilmiştir ve bu metal-yarıiletken yapılarının elektronik özellikleri incelenmiştir (Brillson 1993). Bununla beraber, metal-yarıiletken kontaklarda özellikle temas yüzeyinin anlaşılmasına yönelik gelişmeler sınırlıdır. Metal-yarıiletken ara yüzey durumu Schottky engel yüksekliğini belirleyen faktördür. Schottky engel yüksekliği ile metal-yarıiletken ara yüzey yapısı arasındaki ilişki

günümüzde birçok modelin oluşumuna konu olmuş; ancak tam olarak çözülmüş değildir. Bunun iki önemli nedeninden birincisi çok kristallilik ve buna bağlı olarak kristal hatalarının metal-yarıiletken yapısında deneysel çalışmayı karmaşık hale getirmesidir. İkinci nedeni ise Schottky engel yüksekliği üzerine yapılan bazı kabuller ile birçok hususun ihmal edilmesidir (Brillson 1993).

Farklı yarıiletken bağlantıların aksine metal-yarıiletken kontaklarının çoğunluğu epitaksiyal değildir. Kontaklar genel olarak katkılanmış yarıiletken üzerine metalizasyonla elde edilirler. Bu nedenle, ara yüzeyde gerçekleşen difüzyon, kimyasal reaksiyonlar ve homojen olmayan katkılama, ve hatta ara yüzeylerin kimyasal oluşumu birçok durumda bilinmemektedir. Birkaç durum hariç, kontak yapılarının atomik düzenlenişi bilinmemektedir. Metal-yarıiletken kontaklarda oluşan diğer bir problemde kontak bölgesi civarında oluşan elektrostatik potansiyelin yüklü malzeme hataları tarafından baskı altına alınma ihtimalidir. Bahsi geçen bu malzeme hatalarının modern ara yüzey yapı analiz metotları kullanılarak nadiren tespit ediliyor olmasından dolayı, kontakların elektriksel özellikleri epitaksiyal tabakanın ideal atomik geometrisinden ziyade malzeme hatalarından etkilenmektedir. Bu durum reaktif özellik taşımayan epitaksiyal sistemler için dahi geçerlidir (Brillson 1993).

2.4.2. Silicide tabanlı kontak problemleri

Pratikte kullanılan silicide tabanlı kontaklarda metalizasyon çoğunlukla buharlaştırma veya sputter metodu ile elde edilmektedir. Buharlaştırma yöntemi ile elde edilen kontakların büyük çoğunluğu yaklaşık 10^{-5} Torr vakum seviyesine inebilen değeri oluşturan difüzyon pompası içeren geleneksel vakum sistemi ile elde edilir. Alüminyum ve altın gibi düşük ergime sıcaklığına sahip metaller genel olarak termal ısıtma ile kolayca buharlaştırılabilirken; molibden ve titanyum gibi yüksek ergime sıcaklığına sahip metaller için elektron demeti veya sputter kullanılır. Genellikle yarıiletken yüzeyi kimyasal yöntemler ile hazırlanır. Bu teknik yüzey hazırlamada kullanılan yöntemle bağlı olarak kalınlığı 10 - 20 Å arasında değişen ince oksit tabakaları oluşturur. Yüzeyler arasında bulunan tabakalar yarıiletkenlerin vakum sistemi içerisine

yerleştirilmesinden önce yüzeye tutunan su molekülü veya oksijenden kaynaklanır (Rhoderick and Williams 1988).

Silicide tabanlı kontaklardaki problemlerden en önemlisi yarıiletken yüzeyinin fabrikasyon işlemleri esnasında oksitlenmesidir. Yarıiletken yüzeyin standart temizlik sonrası oksitten arındırılmasına rağmen, yarıiletkenin vakum odasına taşınması esnasında ve sistemin gerekli vakum seviyesine kavuşmasına kadar hava ile temasından dolayı yüzeyinde doğal oksit tabakası oluşur. Ayrıca uzun süreli düşük basınç periyotları söz konusu olduğunda yarıiletken yüzeyinde oksit tabakasının oluşumu vakum ortamında da devam eder. Son basınç değerine ulaşıldıktan sonra, eğer yüzey iyon aşındırması yöntemi ile vakum sistemi içerisinde hazırlanmış ise düşük basınç periyodundan kaynaklanan oksitlenme önlenemez. Bununla beraber vakum ortamının basıncı 10^{-7} Torr ya da daha iyi bir seviyede tutulmaz ise buharlaşma esnasında hala bir oksit tabakasının oluşumu söz konusu olabilir. Söz konusu bu basınç değerini devam ettirebilmek için çok iyi bir vakum sistemine sahip olmak gerekir. Zira buharlaşma esnasında ortaya çıkan termal radyasyon vakum ortamında gaz desorpsiyonunda artışa sebep olur. Difüzyon pompası kullanımı söz konusu ise karbon tabanlı adsorpsiyon ile ara yüzey tabaka oluşumu gerçekleşebilir. Bu şekilde ara yüzey tabakalarının oluşumunu engellemek için yaygın olarak iyon pompası veya turbo moleküler pompa kullanılır. Söz konusu bu pompalar ile 10^{-7} ile 10^{-8} Torr arasında değişen basınç değerlerini elde etmek mümkündür (Rhoderick and Williams 1988).

Ara yüzey tabakasının minimuma indirilmesinin tek yolu 10^{-10} Torr civarında bir basınç değerine sahip çok yüksek vakum ortamında bulunan yarıiletkenin yüzeyine ince bir film tabakasının buharlaştırılmasıdır. Bu basınç değerinde ortamdaki gaz atomlarının tek bir tabaka teşkil etmeleri için gerekli olan zaman çok uzun olduğundan (yaklaşık 10^7 saniye) ara yüzey tabakasının oluşumu ya da metal filminin saflığını yitirmesi hemen hemen mümkün olmamaktadır. Bununla birlikte her ne kadar bu yöntemle elde edilen kontaklar kimyasal olarak ideale yakın olsalarda, yüzey hazırlama işlemi esnasında yüzeyde meydana gelen mekanik hasarlar nedeniyle fiziksel olarak ideal değildirler. Bunun sonucunda genel olarak kontakların akım/voltaj karakteristiklerinde ideallikten

sapmalar gözlenir. Yüksek vakumda moleküler şü ile kontak oluşum mekanizması oldukça yavaştır, neticede bu yöntemin spesifik uygulamaların dışında endüstriyel açıdan kullanım potansiyeli yoktur (Rhoderick and Williams 1988).

2.5. Metal-Yarıiletken Kontak Yapılarda Homojenlik

Genel olarak metal-yarıiletken kontak yapılarında ara yüzey düz olmayıp atomik seviyede belli bir pürüzlülüğe sahiptir. Ara yüzeydeki bu pürüzlülüğün temel nedenleri metaldeki atomik yapılardan, dislokasyonlar olarak karşımıza çıkan malzeme bozukluklarından ve tane sınırları ile beraber metalin kalınlığında meydana gelen değişimlerden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak metal-yarıiletken ara yüzeyinde mevcut olan bu homojensizlik metal-yarıiletken Schottky kontaklarda akım-gerilim karakteristiklerinin idealite faktörü n 'nin 1 den farklı olmasına ya da başka bir ifade ile akım-gerilim karakteristiğinin ideal olmamasına neden olmaktadır. Dahası, termiyonik emisyon teorisinde gözlenen sapmaların bir sebebi de homojensizliktir (Tung 1991, 1992).

2.6. Silicide Yapılarda Homojenlik

Bilindiği üzere silicide yapıların büyük bir çoğunluğu termal buharlaştırma-sputter veya ısıl işlem ile elde edilirler. Üretim şekline bağlı olarak silicide kontakların yapıları farklılıklar göstermektedir. Bir başka ifade ile silicide yapılardaki homojenliğin üretim şekliyle yakından ilgili olduğunu söyleyebiliriz. Silicide kontakların elde edilmesinde kullanılan termal buharlaştırma ve sputter yöntemleri de ayrıca kendi içlerinde bir takım işlemler içermektedir. Örneğin buharlaştırma öncesinde işlemin uygulanacağı yüzey kimyasal yöntemler ile hazırlanır. Yüzey hazırlama işleminde kullanılan tekniğe bağlı olarak söz konusu yüzeyde farklı kalınlıklarda oksit tabakası oluşacaktır. Bu durum doğal olarak silicide kontak yapısının homojenliğini olumsuz olarak etkiler (Rhoderick and Williams 1988).

Termal buharlaştırma yönteminin bu olumsuz etkisinden dolayı birçok bilim insanı silicide için metalizasyon öncesi sputter sisteminde iyonla yüzey temizleme işlemini kullanmıştır. Sputter yöntemi ile elde edilmiş alüminyum-silisyum diyotlar buna örnek olarak verilebilir. Bu diyotların üretiminde alüminyum sputter edilmeden önce iyonla temizleme işlemi uygulanmış ve idealite sabitleri 1.01 ile 1.02 arasında olan yapılar elde edilmiştir. Sonuç olarak iyonla temizleme ve sputter kaplama yöntemi ideal eklem elde etmede en etkili yöntem olarak kabul edilebilir (Rhoderick and Williams 1988).

Bunun dışında, silicide-silisyum ara yüzeyi silisyumun orijinal yüzeyinin bir miktar altında oluşmasından dolayı, kirlenmeye kapalı olacaktır ve oda sıcaklığında kararlı olacaktır. Bu şekilde oluşturulan kontaklar genel olarak ideale yakın ve kararlı elektriksel özelliklere sahiptirler (Rhoderick and Williams 1988).

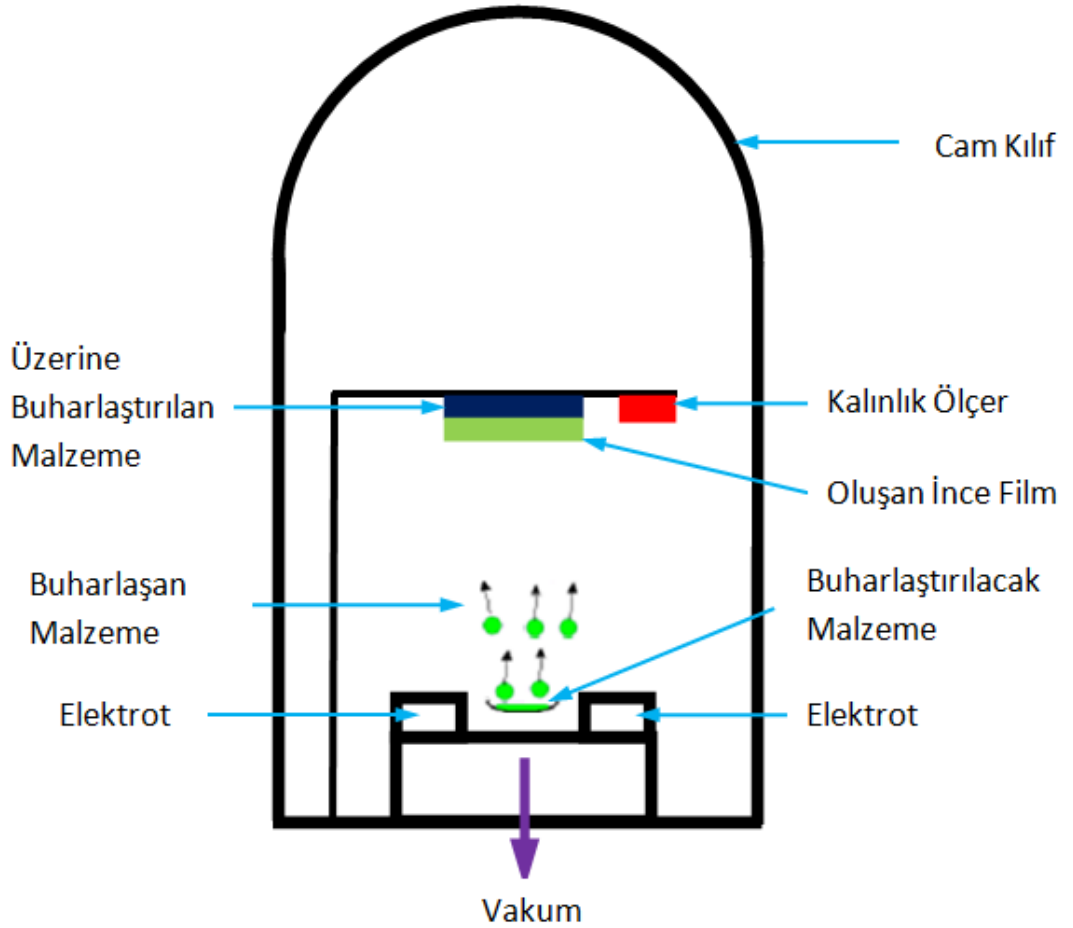
2.7. Metalizasyon Yöntemleri

Yarıiletkenlerin elektronik endüstrisinde tercih edilen malzeme olmasının nedeni gelişen büyütme teknikleridir. Bu itibarla yarıiletkenlerin endüstriyel uygulamalarında büyütme teknikleri önem kazanmıştır. Örneğin *Ge* tek kristali yılların birikimi ile ortaya çıkan değişik büyütme teknikleri ile mükemmel yakın kristal olarak büyütülebilmektedir. Mükemmel *Si* kristalleri ise 30 cm ve daha büyük çapta külçe olarak büyütülebilmektedir (Yu and Cardona 2010).

2.7.1. Termal buharlaştırma

Maksada uygun metal-yarıiletken kontağı için metalin yarıiletken yüzeyine transferinde uygun yöntemin seçilmesi gerekir. Termal Buharlaştırma, sputter veya elektro kaplama vb. birçok yöntem bulunmaktadır. Kullanılan bu yöntemler arasında termal buharlaştırma, *III – V* bileşenli yarıiletkenler üzerine metal kaplama işlemlerinde yaygın olarak kullanılır. Bir matrisin kontak malzemesi olarak kullanılması halinde doğru stokiometrinin elde edilebilmesi için, ya istenen kalınlığa ulaşırken farklı bileşenlerin sırayla buharlaştırılması ya da bahsi geçen bileşenlerin uygun oranlarda

karıştırılması ile elde edilen matrisin tamamen tüketilmesine kadar buharlaştırılması gerekir (Willardson and Beer 1981). Termal buharlaştırma Şekil 2.6'da şematize edilmiştir.



Şekil 2.6. Termal Buharlaştırma sistemi bileşenleri.

2.7.2. Kimyasal buhar yığıma

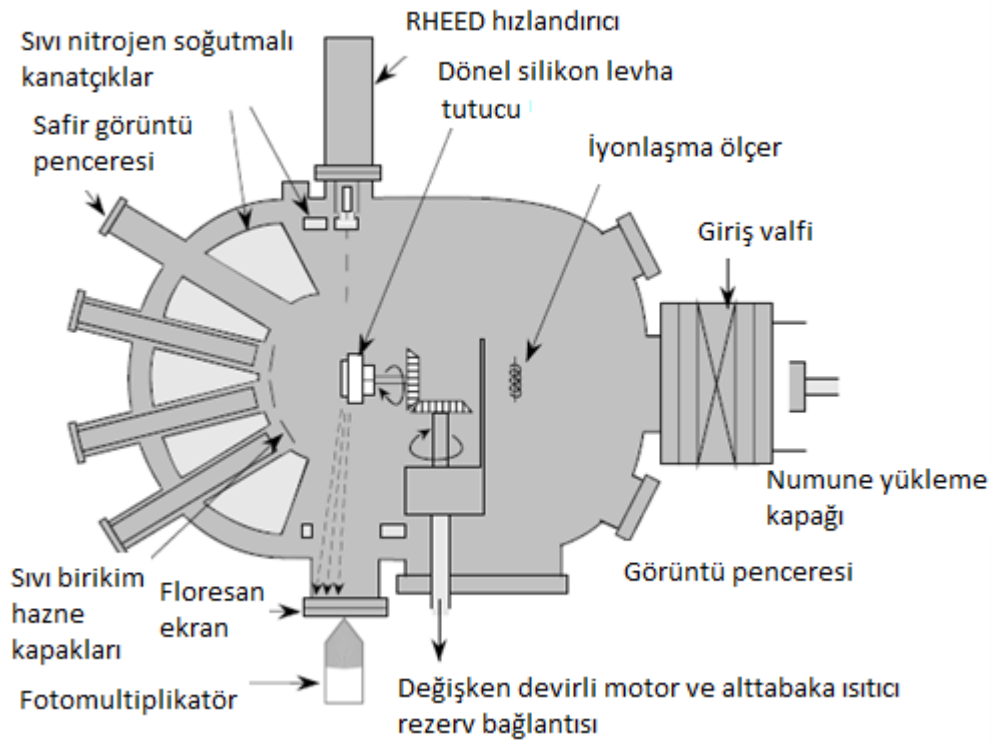
Metalizasyon teknikleri arasında en esnek olanlarından biri de 100°C ile 1300°C arasında geniş bir sıcaklık bandında kullanılabilen Kimyasal Buhar Yığıma (CVD) yöntemidir. Bu metot da seyreltici gaz olarak hidrojen kullanılır.

CVD yöntemi gaz fazındaki malzemenin bir altlık üzerine yığılması işlemidir. Bu yöntem yüksek saflıkta olan ve aynı zamanda yüksek performans değerlerine sahip ince film tabakalarının elde edilmesinde kullanılır. *CVD* yöntemi yaygın olarak tek-kristalli, çok-kristalli, düzensiz yapıların ince filmlerinin elde edilmesinde kullanılır.

2.7.3. Molekül demet ile yığıma

Moleküler demet ile yığıma (*MBE*) altlıklar üzerinde çok yüksek vakumda kontrollü ince film büyütme tekniğidir. *MBE* ile teknolojik öneme sahip yarı iletkenler büyütülebilmektedir. Tipik bir *MBE* sistemi Şekil 2.7’de gösterilmektedir. *MBE*, içerisinde çeşitli elementlerin yüklendiği ve kısmi buhar basıncını kontrol etmek üzere sıcaklığı kontrol edilebilen hücrelerin bulunduğu bir yüksek vakum tekniğidir (Singh 2003).

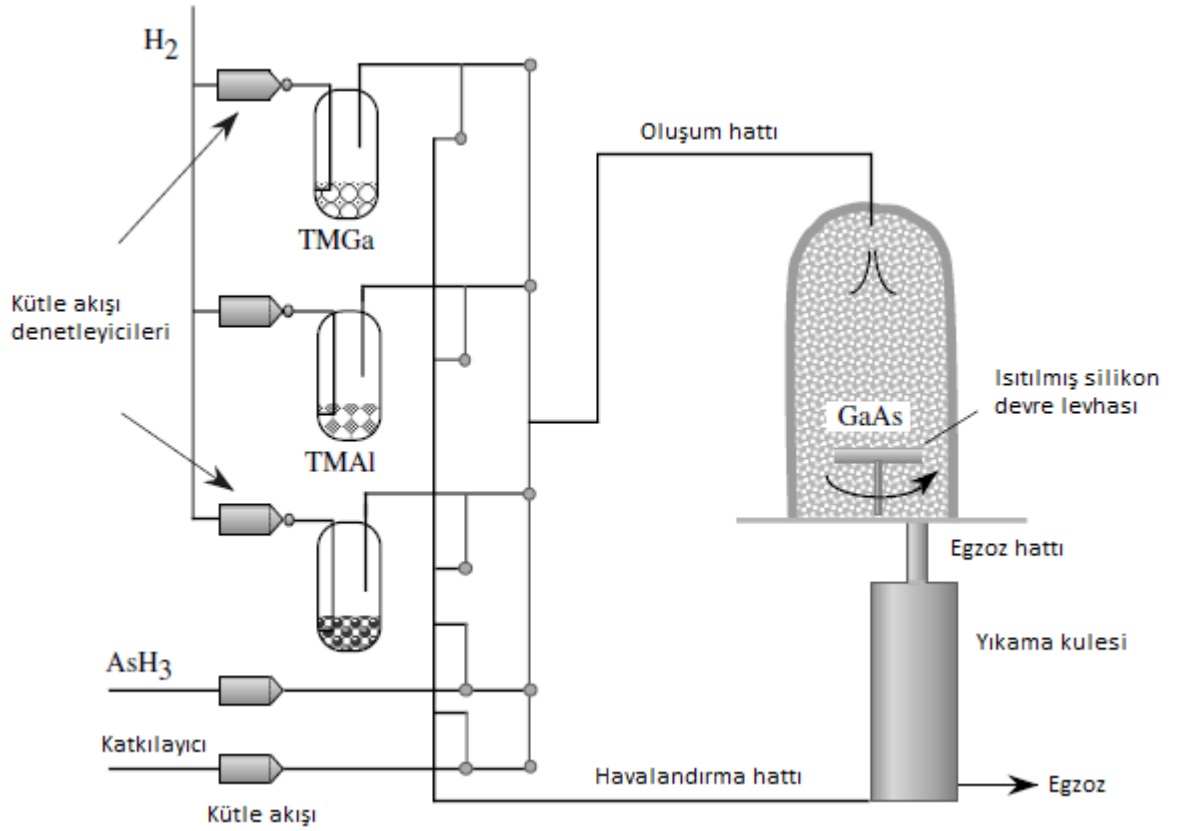
MBE yönteminde tabaka büyüme hızı saniyede yaklaşık 1 atomik tabaka mertebesinde seçilebilir. Düşük büyüme oranı ile hücrelerin önüne yerleştirilmiş olan şua akı kontrol kapaklarının yardımı ile istenilen kompozisyonda ince filmler büyütülebilmekte ve yapılar oluşturulabilmektedir. *MBE* yönteminde herhangi bir kimyasal reaksiyon olmamasından dolayı, bu teknik bütün ince film büyütme teknikleri içinde en kolay kontrol edilenidir. Bununla beraber, tüm işlemler yüksek vakum altında gerçekleştiğinden yüksek vakumun muhafaza edilmesi için vakum odasının dış duvarları sıvı azot ile soğutulur (Singh 2003).



Şekil 2.7. Molekül Demet Yığıma (MBE) sistemi

2.7.4. Metal-Organik kimyasal buhar yığıma

Metal-Organik Kimyasal Buhar Yığıma (*MOCVD*), homojen olmayan yığıma oluşumları için yaygın olarak kullanılan bir diğer önemli büyütme tekniğidir. MBE tekniğinde olduğu gibi *MOCVD* tekniği de ara kesiti çok iyi tabakalı yapılar oluşturulabilir. Tipik bir *MOCVD* sistemi Şekil 2.8'de gösterilmektedir. *MBE* tekniğinin aksine *MOCVD* sisteminde kullanılan gazlar tekli elementlerden oluşmaz. *Ga* yada *As* gibi elementler içeren kompleks moleküller kullanılır. Bunun sonucunda büyüme, ısıtılan alt tabaka yüzeyinde oluşan kimyasal reaksiyonlara bağlıdır (Singh 2003).



Şekil 2.8. Tipik bir Metal-Organik Kimyasal Buhar Yığıma (*MOCVD*) sistemi

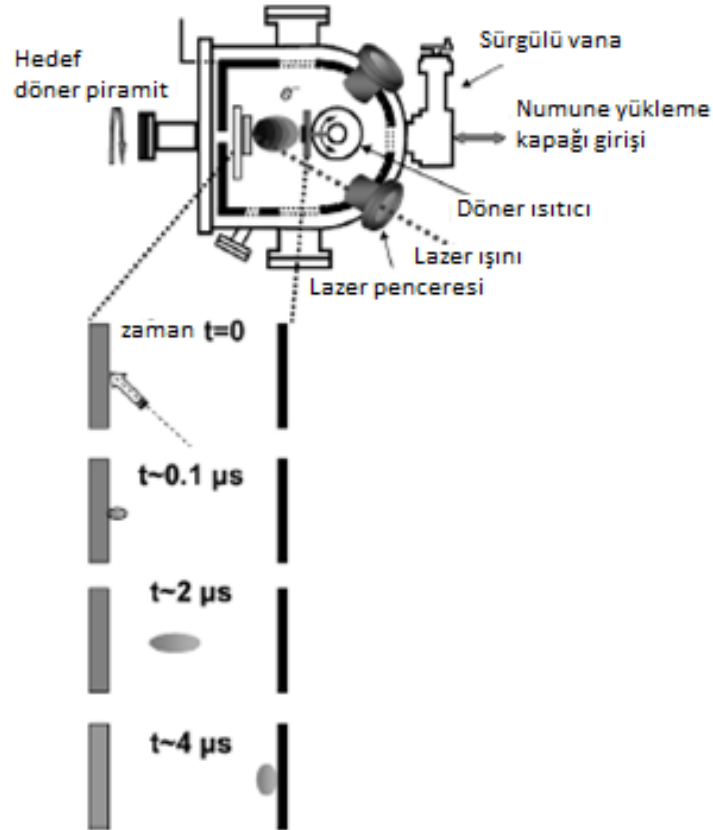
Bir kimyasal reaksiyon neticesinde oluşan büyümenin avantajlarından birisi, lokal bölgelerde büyüme gerçekleştirebilmek için altlık sıcaklığının kontrol edilebilmesi imkanının olmasıdır. Lazer yardımı ile gerçekleştirilen bölgesel büyüme bazı malzemeler için mümkündür ve bu durum yeni aygıt yapılarının elde edilmesi amacı için kullanılabilir. Lokal büyütme bu tekniğin *MBE* tekniğine olan üstünlüğüdür. (Singh 2003).

MOCVD reaktörlerinin birçok çeşidi vardır. Atmosferik *MOCVD* sisteminde, büyüme haznesi atmosfer basıncında bulunmaktadır. Bu durumda, vakum problemleri olmamasına rağmen, istenen büyümenin sağlanabilmesi için çok miktarda gaz akışına ihtiyaç duyulur (Singh 2003).

MOCVD sisteminde kullanılan gazlar çoğunlukla zehirlidir ve kullanımı üst seviyede güvenlik tedbirlerini gerektirir (Singh 2003).

2.7.5. Darbeli lazer ile yığıma (PLD)

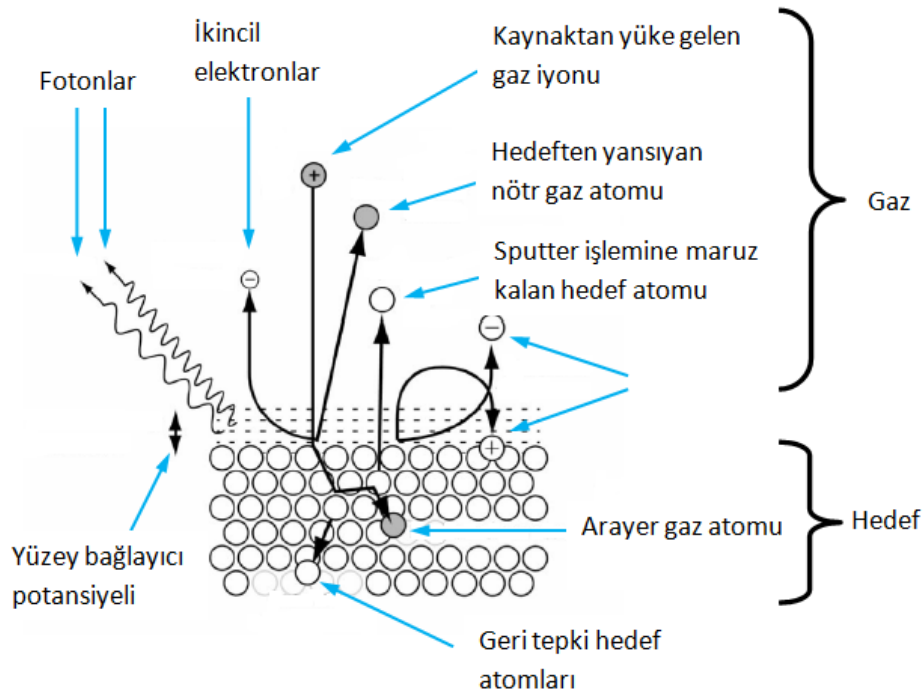
Güçlü lazerlerin teknolojik gelişiminden sonra, darbeli lazer ile buharlaştırma ince film büyütmede özellikle seramik malzeme filmlerinin elde edilmesinde kullanılmıştır. Yüksek sıcaklık süper iletken ince oksit filmlerin büyümesindeki zorluklar *PLD* tekniği ile aşılmıştır. Farklı buharlaşma özellikleri ile süper iletken filmlerin oluşması için doğru stokiyoetrinin sağlanması gerekir. Bu teknikle büyütülen kristallerin kimyasal yapılarının kompleks olmasından bağımsız olarak neredeyse bütün oksit bileşenlerinin ince-film oluşumları hızlı bir şekilde gözlemlenebilir. Günümüzde *PLD* yöntemi yalıtkanların, yarıiletkenlerin, metallerin, polimerlerin ve hatta biyolojik malzemelerin ince filmlerinin oluşturulmasında kullanılır. Şekil 2.9'da *PLD* sistemi ve tek bir lazer darbesi sonrası oluşan buhar paketinin hedeften numuneye doğru yayılması şema tize edilmiştir (Eason 2007).



Şekil 2.9. *PLD* sistemi ve tek bir lazer darbesi sonrası oluşan buhar paketinin hedeften numuneye doğru yayılması.

2.7.6. Sputter ile yığma

Sputter işlemi fiziksel bir işlem olup plazma içinde oluşan pozitif iyonların hedef malzeme yüzeyine çarpması ve momentum transferi sonucu atomların bu yüzeyden sökülmesi olarak tanımlanabilir. Bu olay esnasında oluşan enerjinin yaklaşık %1'i atomların yüzeyden sökülmesinde harcanır. Enerjinin %75'lik dilimi ise bombardımana tabii tutulan yüzeyin ısınmasında harcanır. Kalan %24'lük enerji dilimi ise alt tabakayı ısıtan ikincil elektronlar tarafından harcanır. Atomların yüzeyden sökülmesi, yüzey içerisine nüfuz eden iyonların kinetik enerjilerinin yüzeydeki atomların bağlanma enerjisinden daha büyük olması durumunda gerçekleşecektir (Schwartz and Srikrishnan, 2006). Örneğin hedef atomunun enerjisi bağlanma potansiyelini aşacak düzeyde olduğunda ve bu atomun momentumu yüzeyden dışa doğru yöneldiğinde, söz konusu bu atom gaz fazı bölgesine taşınacaktır. Bu durum Şekil 2.10'da şematik olarak gösterilmiştir. Sputter işleminin oluşabilmesi için, gelen iyonun enerjisinin yüzeydeki atomların bağlanma enerjisinden büyük olması gerekir; çünkü her bir çarpışma ile çarpan ve çarpılan atomlar arasındaki enerji paylaşımı olur (Rocket 2008).



Şekil 2.10. Sputter işlemi (Rocket 2008).

Sputter işlemindeki temel işlemler aşağıda ele alınmıştır (Schwartz and Srikrishnan 2006).

Hedef: Sputter işleminde atomların yüzeyinden söküldüğü katı yüzey “hedef” olarak tanımlanır. Film tabakası oluşumu amacıyla sputter hedef kullanıldığı takdirde; bazı malzemeler için sadece sinterlenmiş, sıcak preslenmiş ya da toz hedefler mevcut olmakla beraber kirlenme ihtimalini ortadan kaldırmak amacıyla külçe hedef tercih edilir. Hedef yüzey bombardımana tabi tutulan iyonlar nedeniyle ısınacak olmasından dolayı, hedefin monte edildiği tutucu soğutulmalıdır. Tutucunun ısı transfer özelliğinin iyi olması ve aynı zamanda kirlenmeye de sebebiyet vermemesi gerekir.

Eşik enerjisi: Sputter işleminde gerekli olan minimum iyon enerjisi eşik enerjisi olarak adlandırılır. Eşik enerjisi hedef malzemesinin süblimleşme ısısına bağlı olarak değişmekle beraber rölatif olarak bombardıman iyonu cinsinden bağımsızdır. Sputter işlemi sonucunda elde edilen malzeme, çift atomlu türler (örneğin SiO_2 hedeften elde edilen SiO de olduğu gibi) saptanmakla beraber genellikle tek atomdan oluşur. Sputter işlemlerinde genel olarak iyon kaynağı yalnızca soy gaz (genellikle Ar) olup, bununla beraber reaktif sputter işlemlerinde hedef malzemeye bağlı olarak soy gaza ilave O_2 ya da N_2 ilave edilerek oksitli veya nitrürlü yapılar oluşturulabilir.

Sputter verimi: Sputter işleminde verim her bir iyona karşılık hedef yüzeyinden sökülen atom sayısı olarak tanımlanır. Kazanç; iyon enerjisinin artmasına bağlı olarak artacaktır. Bu artış değeri daha düşük enerji seviyelerinde üstel ve sonrasında ise lineer iken son aşamada sabit olacak ve sonrasında çok yüksek enerji seviyelerinde azalmaya başlar.

Film Kompozisyonu: Oluşturulan film kompozisyonu genellikle homojen yapıdaki hedef kompozisyonu ile aynıdır. Farklı sputter verimine sahip atomlardan oluşan alaşım hedef durumunda hedefin yüzeyinde değişik bir tabaka oluşur. Başlangıçta, en yüksek sputter verimine sahip olan bileşen tercihen daha çok sputter olacaktır. Bu durum yüzeyin daha düşük sputter verimine sahip bileşen açısından zengin olmasına sebep olacaktır. Kararlı durumda, alt tabaka üzerindeki bozulmuş tabakadan sputter işlemi

neticesinde elde edilen filmin kompozisyonu hedef malzemesinin kompozisyonu ile aynıdır. Bununla beraber, eğer altlık yüzeyinden belirgin bir şekilde sputter işlemi ayrıcalıklı olarak tekrar ediliyorsa ve/veya hedef yüzeyinde difüzyon varsa bu durumda oluşan filmin yapısı kaynaktan farklı olur.

Çalışma Şartlarının Etkileri: Gaz basıncının artması sputter işlemindeki iyonların sayılarının artmasına sebep olur. Buna bağlı olarak iyonların enerjilerinin azalmasına karşın film yığılma oranında artış olur. Çünkü sputter işleminin verimi sputter işleminde kullanılan enerji aralığındaki azalmaya bağlı olarak yavaş yavaş azalacaktır. Kaynak ile alt tabaka arasındaki mesafenin artması birikme oranında azalmaya sebep olmakla beraber filmin homojenliğinde iyileşmeye sebep olacaktır. Altlık sıcaklığının artmasına bağlı olarak yığılma oranı azalacaktır.

Sıcaklık Etkileri: Filmin birçok özelliği altlık sıcaklığından etkilendiğinden dolayı, sıcaklığın kontrolü önemli bir parametredir. Numune altlığı farklı tekniklerle soğutulabilir ya da ısıtılabilir. Fakat alt tabakalar ile bu tabakaları tutan tutucular arasında ısı transfer araçlarının yerleştirilmesi durumu dışında, yüzey altında iyon bombardımanı ve ikincil elektronlar yardımıyla ısınmadan dolayı sıcaklık altlık sıcaklığından farklı olur. Yüzey sıcaklığının doğru ölçümü flor-optik probu kullanılarak ölçülür. Ancak cihazların içine bu sistemin dahil edilmesi zor olduğundan kontrol maksadı ile kullanımı pratik değildir. Numune tutucusunun sıcaklığının gözlenmesi ve kontrolü daha uygundur, fakat bu durum tutucu ile silisyum altlık arasında iyi termal kontağı gerektirir.

Sputter Yığılma İşleminin Avantajları: Sputter işleminin avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- 1) Sputter işlemi ile oluşan filmin stokiyometrisi rahatça kontrol edilebilir,
- 2) Numunenin sputter temizliğinin kolay olması,
- 3) Adezyonun iyileşmesi,
- 4) Film kalınlığının kolay kontrol edilebilmesi,

5) Filmlerin fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi ve yapıda oluşabilecek boşlukların doldurulması için ön-gerilim sputter işleminde kullanılması.

Sputter Yığıma İşleminin Dezavantajları: Sputter işleminin yukarıda sayılan avantajlarının yanında bazı dezavantajları da vardır. Bunları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

- 1) Sputter işlemi için gerekli altyapı oldukça pahalıdır,
- 2) Verim oldukça düşüktür,

2.8. Yarıiletkenlere Omik Kontak Yapımı

Omik özellik sergileyen ve doğrultucu olmayan metal-yarıiletken eklemleri mikro elektroniğin kritik bileşenidir. Metal-yarıiletken kontaklar metal-metal kontağı kadar düşük bir dirence sahip olur beklentisi karşılanamamaktadır. Bununla beraber, metal ve yarıiletkenin Fermi enerji seviyesine bağlı olarak metal-yarıiletken arasında yüksek dirençli doğrultucu özellikte kontak oluşumuna neden olabilir. Uygun malzeme seçimleri ile düşük dirençli Omik kontakların elde edilmesi mümkündür. Omik kontak özelliğini taşıyan ve yüklerin eklemi tünelleme ile geçebildiği kontaklar mikro-elektronikte yaygınca kullanılır. Tünellemenin gerçekleştiği potansiyel engel aşırı katkılı yarıiletken üzerine yapılan metalizasyon ile kolayca elde edilebilir. Bu durumda metal ve yarıiletkenin Fermi enerji seviyesine bağlı olarak doğrultucu kontak oluşsa bile ekleme oluşun potansiyel engelin genişliği yarıiletkenin aşırı katkılı olmasından dolayı çok dar olacaktır. Potansiyel engelin çok dar olması yüklerin potansiyel engel içinden her iki yönde kuantum mekaniksel tünelleme yapmasına imkân sağlar (Brillson 1993).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Silisyum Temizleme İşlemi

Silisyum yarıiletken teknolojisinde standart hale gelmiş olan silisyum yüzeyinin organik ve metalik temizliğinde kullanılan temizleme yöntemi bu çalışmada da kullanılmıştır. Söz konusu temizleme yöntemi iki aşamalı olup RCA1 ve RCA2 olarak adlandırılmıştır (Kern and Puotinen1970). Temizleme işleminin ilk aşamasında RCA1 ile organik temizleme yapılırken, ikinci aşamasında RCA2 ile ağır metal temizliği yapılır. Silisyum için bu çalışmada kullanılan temizlik işlem basamakları sırasıyla aşağıda verilmiştir.

- Asetonda 10 dakika ultrasonik yıkama
- Metanolde 10 dakika ultrasonik yıkama
- Deiyonize su ile durulama
- RCA1 ($H_2O:H_2O_2:NH_3$; 6: 1: 1) içinde 60°C sıcaklıkta 10 dakika bekletme
- Akar deiyonize su ile durulama
- Seyreltik HF ($H_2O:HF$; 10: 1) içinde 30 saniye bekletme
- Akar deiyonize su ile durulama
- RCA2 ($H_2O:H_2O_2:HCl$; 6: 1: 1) içinde 60°C sıcaklıkta 10 dakika bekletme
- Deiyonize su ile durulama
- Seyreltik HF ($H_2O:HF$; 10,1) içinde 30 saniye bekletme
- 15- 20 dakika akan deiyonize su içerisinde bekletme
- Azot gazı (N_2) ile kurutma

3.2. Omik Kontak Yapımı

Kullanılan n-tipi silisyumun mat olan yüzeyine $2,9 \times 10^{-8}$ Torr basınç altında $Au:Sb$ (%2,5 Sb) buharlaştırıldı ve 400°C'de 3 dakika tavlansak omik kontak elde edildi. Bu çalışmada omik kontak yapımında mat yüzeyin seçilmesinin nedeni mat yüzeyde yüzey kusurlarının fazla olmasıdır. Bir başka ifade ile yüzey kusurlarının fazla olması omik

kontakın oluşumuna katkıda bulunacağından omik kontak yapımında mat yüzey seçilmiştir. Omik kontakın gerçekleşmesi için numune atmosfer basıncında inert azot gazı akışı altında ısıtılmasına tabi tutulmuştur.

3.3. Sputter ve Metalizasyon Sistemi

Omik kontak yapıldıktan sonra doğrultucu (Schottky) kısım sputter tekniği yardımıyla elde edilmiştir. Sputter işleminin gerçekleştirildiği cihaz Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Numune için fabrikasyon parametreleri aşağıdaki gibi seçilmiştir.

Başlangıç Vakum Seviyesi	: $3,4 \times 10^{-7}$ Torr
Argon akış miktarı	: 10(6N) ccm
Argon gaz altı basınç	: $1,8 \times 10^{-3}$ Torr
<i>RF</i>	: 23,3 MHz
<i>RF</i> Darbe Süresi	: 10 ms
<i>RF</i> Darbe Frekansı	: 11Hz
<i>DC</i> Hedef	: - 100V
<i>DC</i> Numune	: - 40V
Depozisyon Süresi	: 10 dakika



Şekil 3.1. Sputter cihazı (Atatürk Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Laboratuvarı)

3.4. Isıl İşlem

Yapılan numunelerde $Mo - Si$ ara yüzünde $Mo:Si$ silicide oluşumu için ısıl işlem uygulanmıştır. Burada uygulanan ısıl işlemin amacı kullanılan altlık ile kaplaması yapılan malzeme arasındaki atomik seviyede dizilimin daha düzenli olmasını sağlamaktır. Kullandığımız fırın $1100^{\circ}C$ sıcaklığına kadar ulaşabilmektedir. Şekil 3.2'de numunelere uygulanan ısıl işlemlerin gerçekleştirildiği tavlama fırını görülmektedir.



Şekil 3.2. Isıl işlem Fırını (Atatürk Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Laboratuvarı)

3.5. $I - V$ Ölçüm Sistemi ve Haritalama

Bu çalışmada kullanılan sıvı azot kryostatı 80-400 K aralığında vakum ortamında sıcaklığa bağlı ölçüm alabilme kabiliyetine sahiptir. Ayrıca sıcaklık sabitken birden çok diyotun haritalaması vakum altında yapılabilmektedir. Şekil 3.3 akım-gerilim ölçüm ve haritalama sistemini göstermektedir.



Şekil 3.3. Akım-Gerilim ölçüm ve haritalama sistemi (Atatürk Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Laboratuvarı)

3.6. X –Ray Difraksiyonu

X –Ray Difraksiyonu (*XRD*) numunelerin yapısı hakkında bilgi edinilmesi amacıyla kullanılan tahribatsız bir işlemdir. *XRD* işleminde kullanılan X –ışınlarının dalga boyları numuneleri teşkil eden atomların arasındaki mesafe mertebesinde olduğunda kullanılır. *XRD* ölçüm sistemi ile büyütülen ince filmlerin kalınlıkları, yönelimleri ve kristal yapıları tespit edileceği gibi elde edilen filmin yapısal bozukluklarda belirlenebilir. Gerek tahribatsız bir işlem olması ve gerekse fonksiyonu nedeniyle *XRD* çok yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Şekil 3.4 bu çalışmada numunelerin *XRD* sonuçlarının elde edilmesinde kullanılan cihaz görülmektedir.

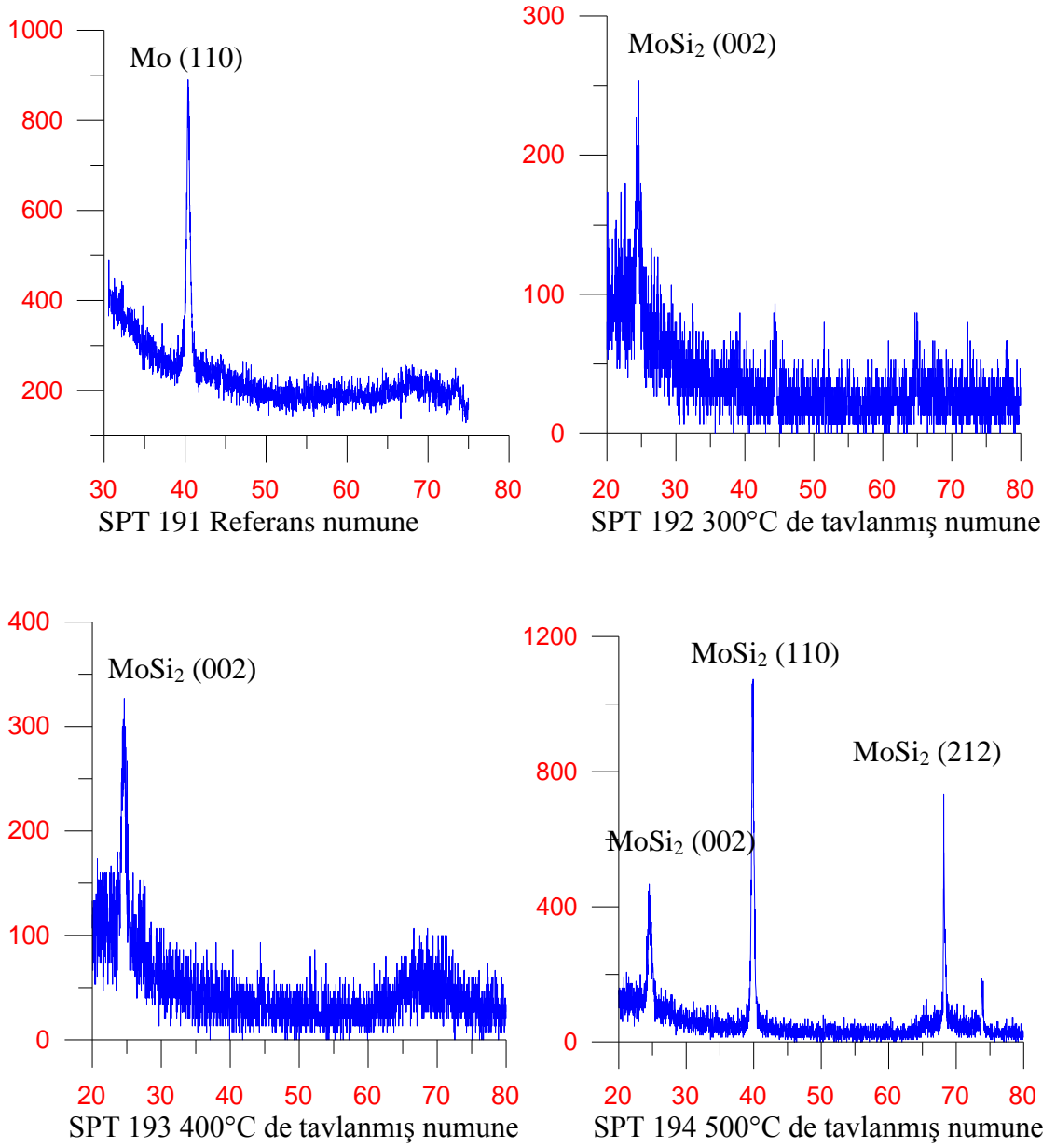


Şekil 3.4. *XRD* ölçüm sistemi (Atatürk Üniversitesi Yüzey Teknolojileri ve Biyomekanik Laboratuvarı)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. *XRD* Ölçüm Değerleri

Bu çalışmada ilk olarak *n* –tipi silisyumun bir yüzeyine buharlaştırma tekniği ile *Au:Sb* buharlaştırılıp ısıtılma işlemi ile omik kontak elde edildi. Silisyumun diğer yüzeyine ise Sputter tekniği ile *XRD* ölçümleri için Schottky diyot üretiminde kullanılan parametreler ile silisyum üzerinde *Mo* film oluşturuldu. Bu ölçümlerde öncelikle silisyum üzerine yapılan büyütmeden sonra elde edilen referans numune kullanılmıştır. Şekil 4.1 referans numunesi ile farklı sıcaklıklarda tavlınmış numuneler için *XRD* sonuçlarını göstermektedir. Çizelge 4.1 ise numunelerin *XRD* ölçüm detaylarını (açı değeri ve buna bağlı olarak oluşan yapı ve yönelimleri) göstermektedir.



Şekil 4.1. Referans numunesi ve farklı sıcaklıklarda tavllanmış numuneler için XRDölçümleri.

Çizelge 4.1. Referans numunesi ve farklı sıcaklıklarda tavllanmış numuneler için *XRD* ölçüm detayları.

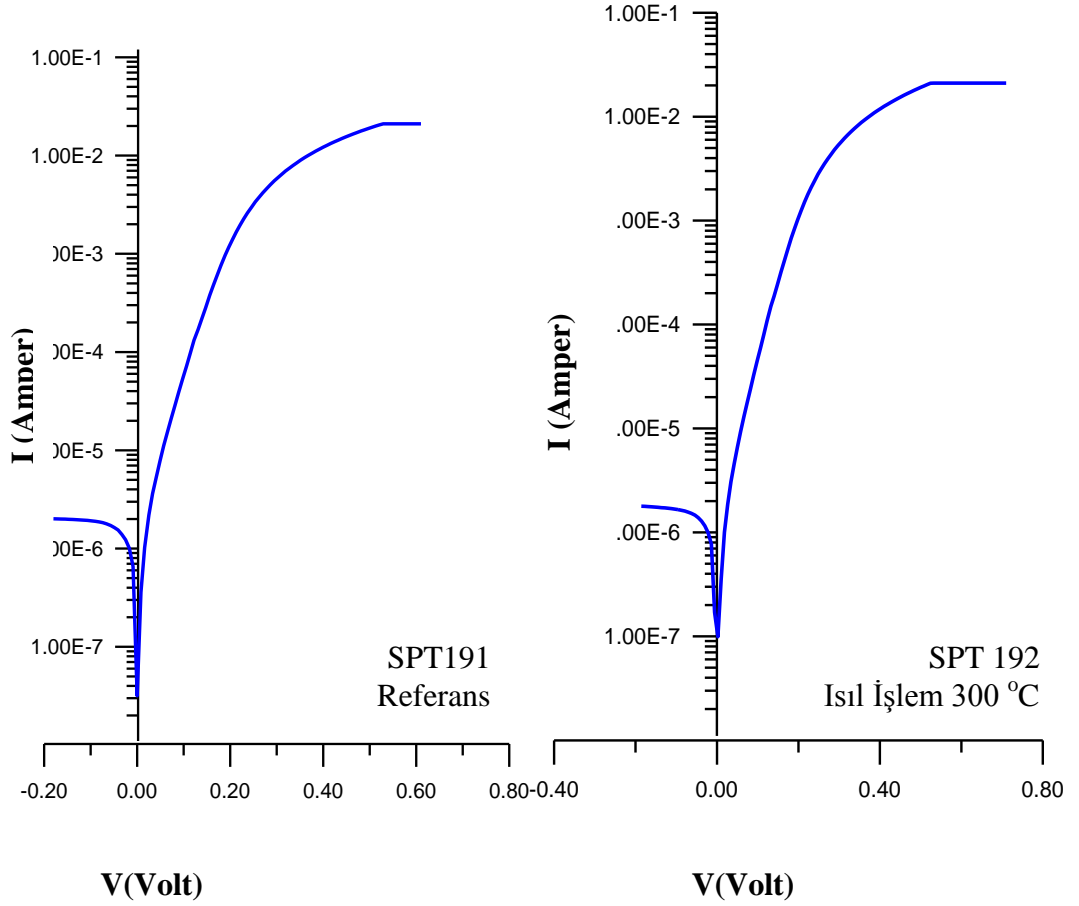
Numunelerin <i>XRD</i> ölçüm detayları		
Numune	2θ	Yapı ve Yönelim
SPT 191 (referans numune)	40,42°	<i>Mo</i> (110)
SPT 192 (300°C’de tavllanmış numune)	22,90°	<i>MoSi₂</i> (002)
SPT 193 (400°C’de tavllanmış numune)	22,94°	<i>MoSi₂</i> (002)
	22,85°	<i>MoSi₂</i> (002)
SPT 194 (500°C’de tavllanmış numune)	39,92°	<i>MoSi₂</i> (110)
	68,16°	<i>MoSi₂</i> (212)

Alınan *XRD* ölçümleri incelendiğinde SPT191 referans numunesinde herhangi bir kristal yapı oluşmadığı görülmüştür. Ancak tavlama sıcaklığı attıkça molibden ile silisyum bileşik oluşturarak *MoSi₂* yapısı oluştuğu gözlenmektedir. Oluşan bu bileşiğin oranları tavlama derecesine bağlı olarak değişir. SPT 191 referans numunesi ve 400°C’ye kadar tavllanmış olan numunelerde *MoSi₂*(002) yöneliminde kristalleşme olduğu görülmektedir. Tavlama 500°C’ye çıkarıldığında yönelimin oluştuğu gözlenmektedir. Bu yönelimler *MoSi₂*(110) ve *MoSi₂*(212) düzlemlerine ait difraksiyonlardır.

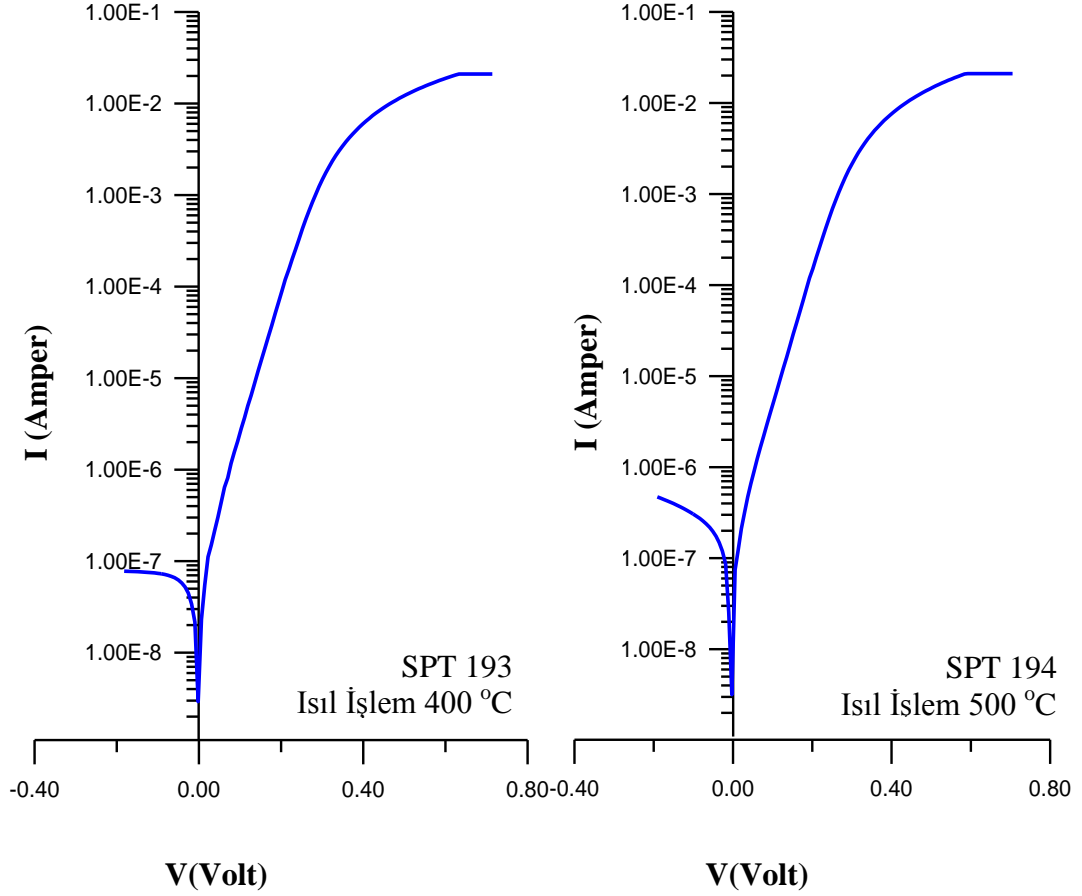
4.2. Akım-Gerilim (*I – V*) Ölçümleri

Şekil 4.2 referans numunesi ile farklı sıcaklıklarda tavllanmış numuneler için akım-gerilim (*I – V*) ölçüm sonuçlarını göstermektedir. *Mo* depozisyon sonrası Şekil 4.2’de SPT191’in ters beslemde geçen akım $2 \times 10^{-6} A$ mertebesinde iken 300°C’de tavlama sonrası ters beslem akımı mertebe olarak değişmez iken seri dirençte azalma olmaktadır. 400°C’de ki ısıtma işlemi ise ters beslem sızıntı akımı $8 \times 10^{-8} A$ mertebesine inerek ekleme ısıtma işlemi sonrası bir iyileşmenin olduğu görülmektedir, Şekil 4.2c’de 500°C’deki ısıtma işlemi sonucunda eklem bozulma sürecine girdiği ters beslem sızıntı

akımının artmasından anlaşılmaktadır, Şekil 4.2d. Bu numuneler ile ilgili nümerik analiz sonuçları sonraki başlıklar altında verilmiştir. Mxn matris formunda 300K'de yapılan ölçümler standart termiyonikemisyon (*TE*) teorisi ve Cheung fonksiyonları kullanılarak eklem parametreleri hesaplanmış olup Gauss dağılımları analiz edilmiştir.



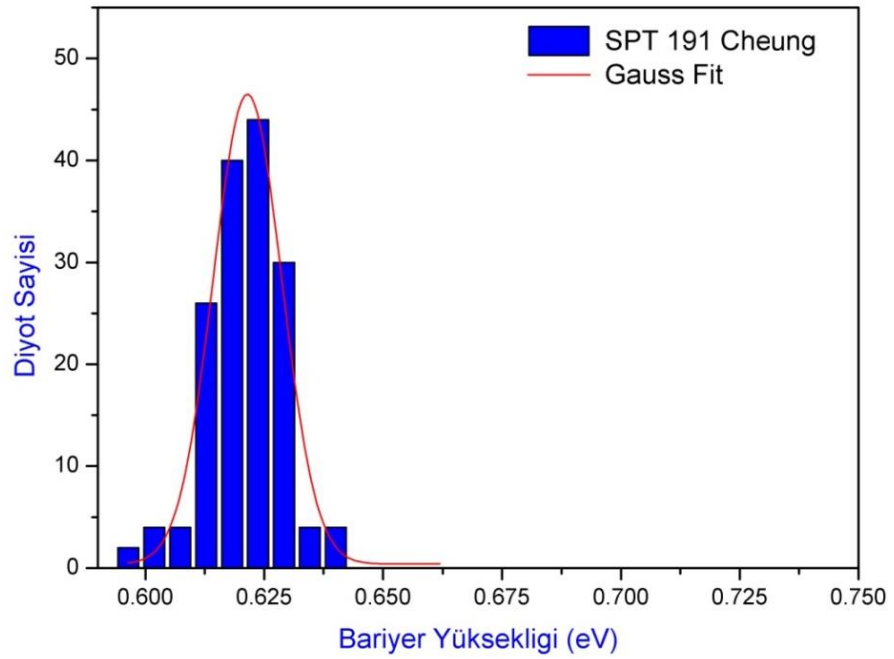
Şekil 4.2. Referans numunesi ve farklı sıcaklıklarda tavllanmış numuneler için 300 K'de $I - V$ ölçüm değerleri



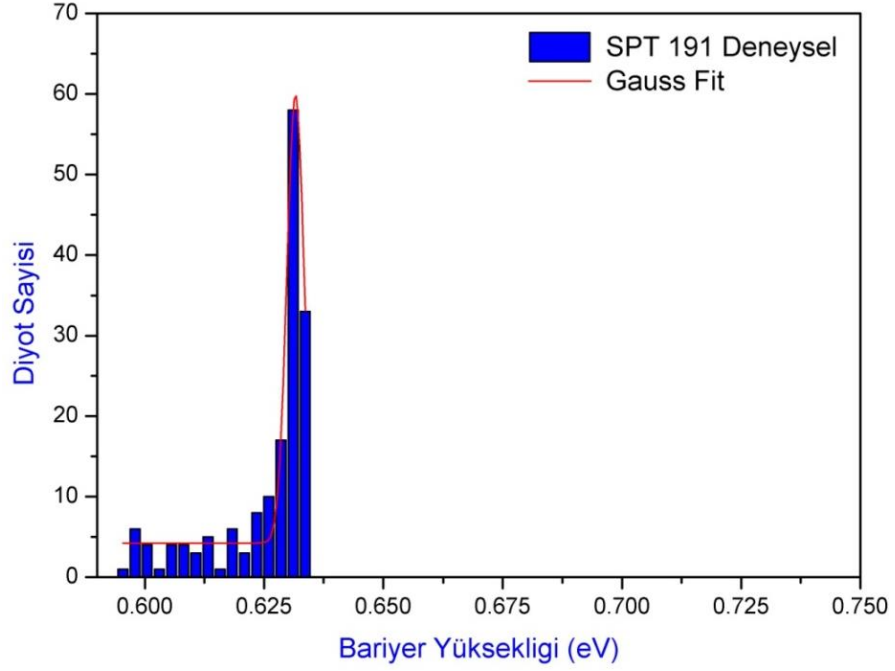
Şekil 4.2 (devam)

Bu örneklemede deneysel olarak elde edilen Gauss dağılımı *TE* fit ve Cheung metodu ile elde edilen dağılımla karşılaştırılmıştır. Şekil 4.3 ve 4.4 tavlama yapılmamış referans numunesi (SPT191) için sırasıyla doğrudan fit ve deneysel haritalama ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliklerinin (EY) Gauss dağılımlarını göstermektedir. Çizelge 4.2’de ise her iki yöntem için Gauss dağılımlarının maksimum değerleri ile yarı yükseklik genişlik değerleri verilmektedir. Şekil 4.3’de engel yüksekliğinin dağılımı Gaussian tipte olup pozisyonu 621 meV olup yarı yükseklik genişliği 17 meV dur. *TE* model ile yapılan analizde engel yüksekliği dağılımı daha düşük değerlerden başlayıp simetrik olmayan bir dağılım sergilemektedir. Bu analizde diyotların engel yüksekliği 631 meV civarında yoğunlaşmış olup dağılım genişliği $4,2 \text{ meV}$ olarak bulundu. Analiz karşılaştırmaları Çizelge 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.5’de örnekleme yapılan diyotların

engel yüksekliklerinin *Si* dilim üzerindeki dağılımları, kontrast engel yüksekliğini temsil etmek üzere verilmiştir. Cheung fonksiyonları kullanılarak yapılan incelemede (Şekil 4.5) dağılımda tek bir hat boyunca gözlenen keskin sapma Şekil 4.6'da *TE* emisyon modeli ile yapılan analizde gözükmemektedir. *TE* modeli karakterizasyonun yapıldığı diyotların çoğunun 631 *meV* civarında 4.1 *meV* gibi düşük band aralığında dağılıma sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.3. Tavlama yapılmamış SPT 191 referans numunesine ait doğrudan fit ile haritalama ölçümünden elde edilen Gauss dağılımı.

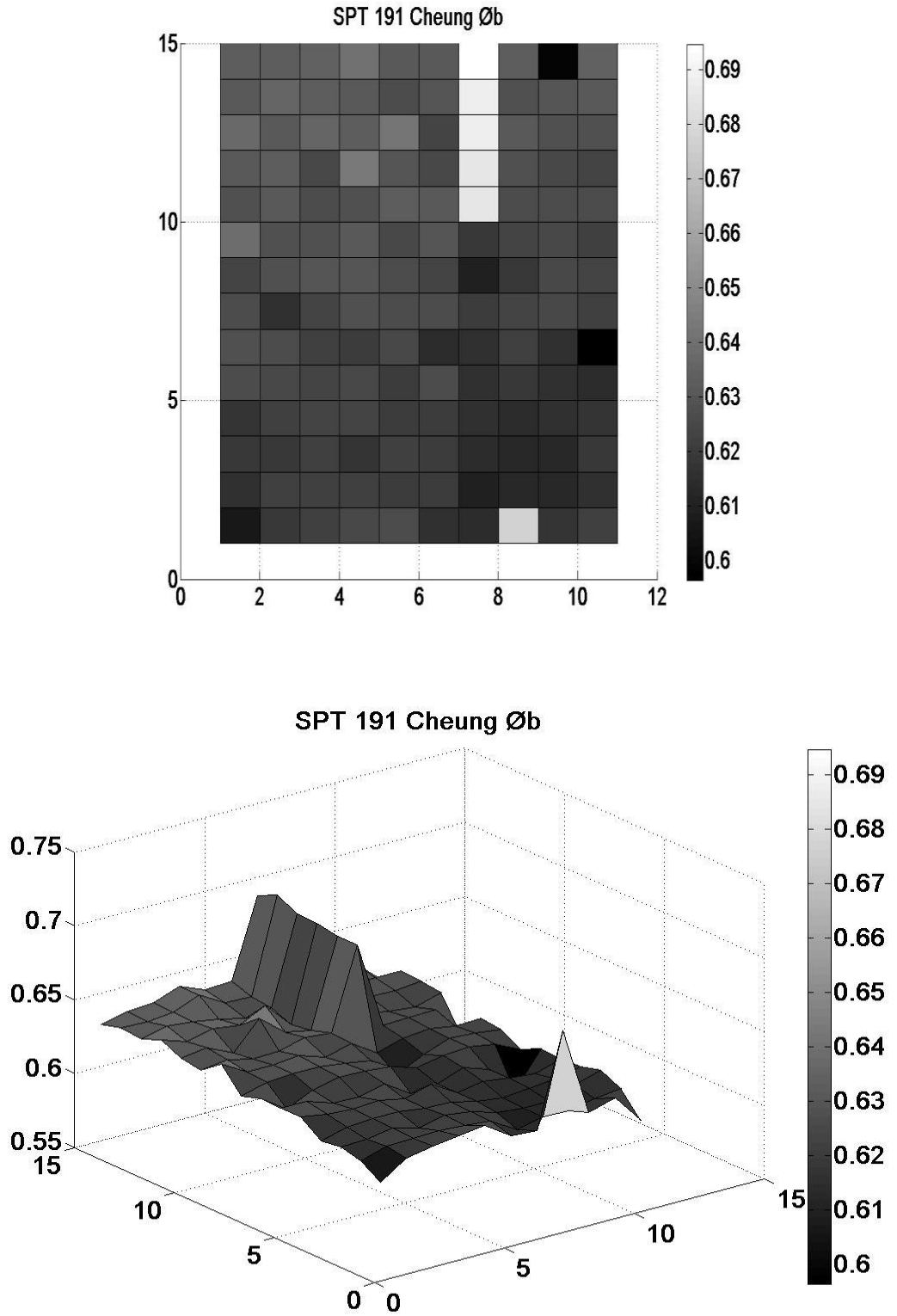


Şekil 4.4. Referans SPT191 numunesinde I/V haritalama ölçümlerinin standart $I - V$ analizinden elde edilen engel yüksekliği Gauss dağılımı.

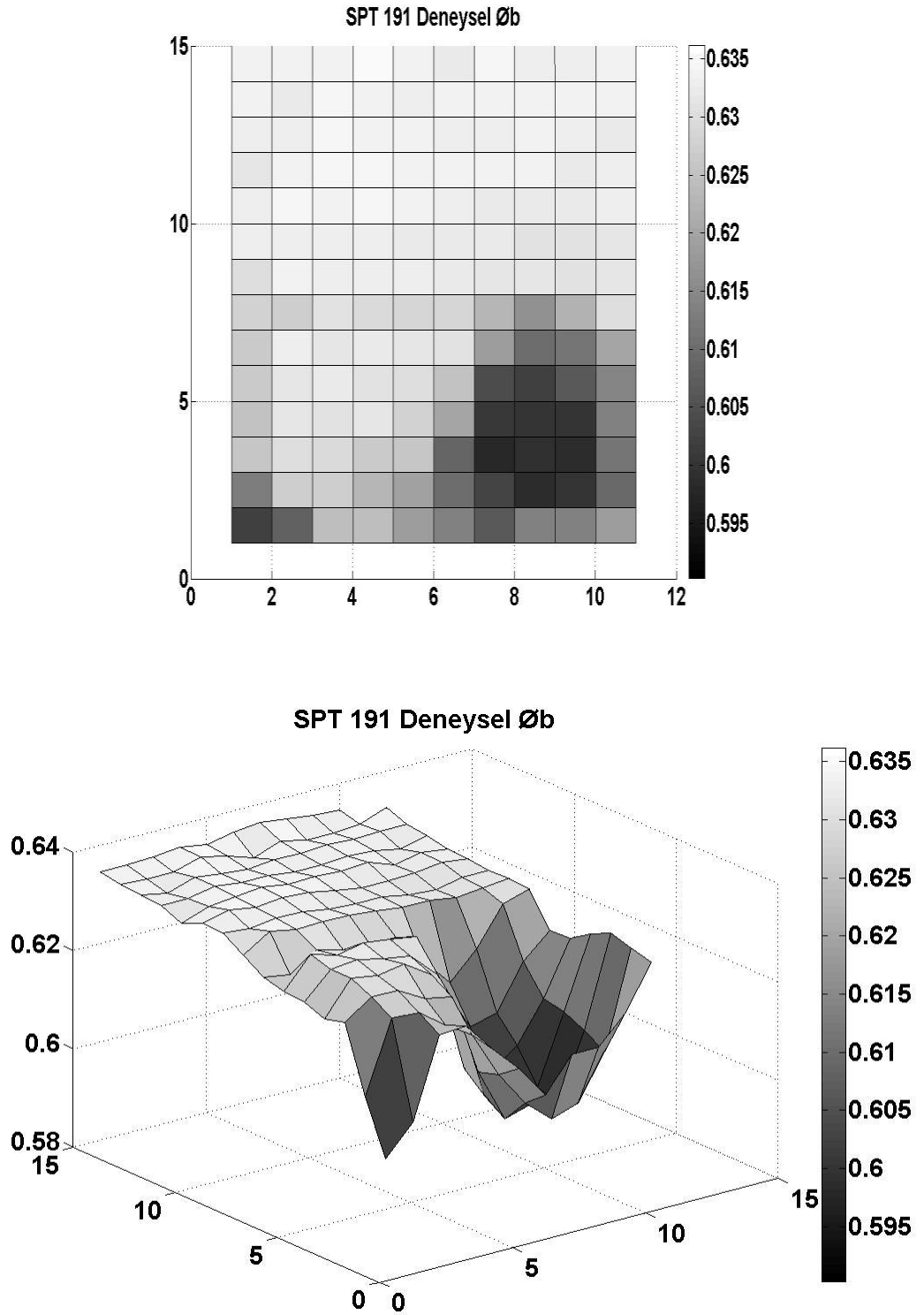
Çizelge 4.2. SPT191 Referans numunesinde Cheung yöntemi ve $\ln(I) - V$ eğiminden hesaplanan engel yüksekliğinin Gauss dağılımına ait parametreler.

Hesaplama Yöntemi	Gauss Dağılımının Maksimumu (meV)	Yarı Yükseklik Genişliği ($FWHM$) (meV)
Cheung	621	17
TE	631	4,2

Şekil 4.5 SPT 191 Referans numunesi için elde edilen 2 ve 3 boyutta Cheung yöntemi ile yapılan haritalama değerlerini göstermektedir. Şekil 4.6 ise SPT 191 Referans numunesi için elde edilen 2 ve 3 boyutta doğrudan analiz yöntemi ile yapılan haritalama değerlerini göstermektedir.



Şekil 4.5. Referans numunede 12x15 adet $I - V$ ölçümüne ait engel yüksekliğinin Cheung analizi.

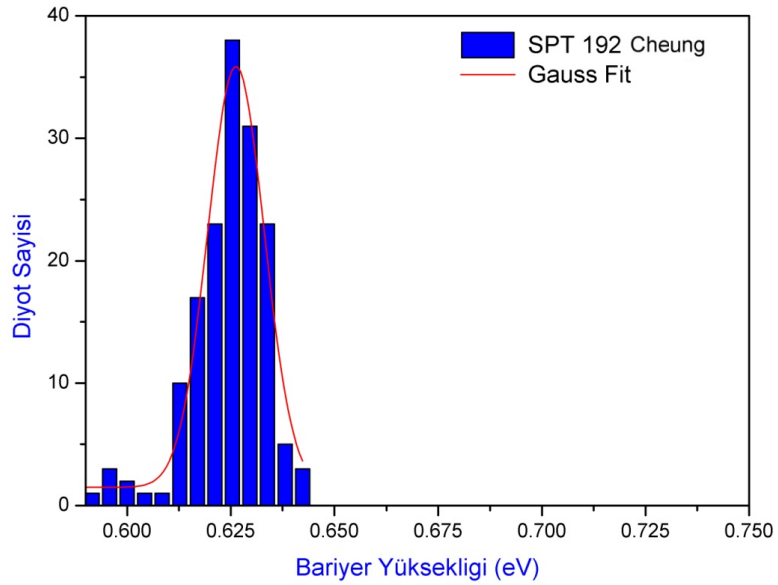


Şekil 4.6. Referans numunede 12x15 adet $I - V$ ölçümüne ait engel yüksekliğinin Standart $I - V$ analizi.

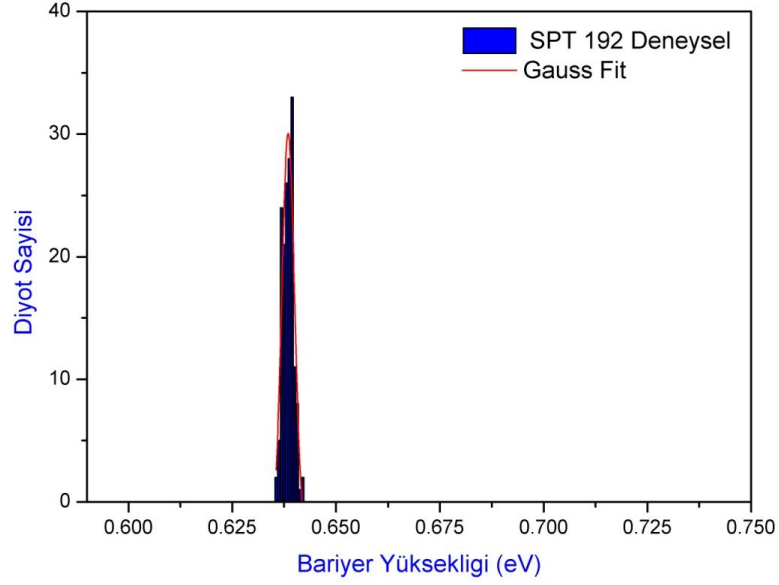
4.2.1. Isıl işleme tabi tutulmuş numunelerde Gauss dağılımı

Homojenliği artırmak ve silicide yapıların sağladığı kararlılıktan faydalanmak üzere metalizasyonu yapılmış her bir numune sırası ile 300, 400 ve 500°C'de 30dakika süre atmosfer basıncında argon gazı akışı altında ısıl işlem yapılarak çoklu diyottan $I - V$ ölçümleri yapıldı. TE ve Cheung metodu ile yapılan analiz sonuçlarına ait engel yüksekliği dağılımları aşağıda özetlenmiştir.

300°C'de yapılan ısıl işlem sonucunda ortalama engel yüksekliğinde her iki modele göre yapılan analizlerde bir artış olmuştur. Cheung modeline göre Şekil 4.7'de 626 meV civarında referans numuneye göre simetrik dağılım elde edilmiştir. Yarı yükseklik genişliği TE analizinde 3.6 meV olarak bulunmuş olup homojenliğin iyileştiğini göstermektedir, Şekil 4.8 ve Çizelge 4.3.



Şekil 4.7. 300°C'de tavlama yapılmış SPT192 numunesinde 165 diyotun I/V ölçümlerinin Cheung analizi ile elde edilen engel yüksekliği Gauss dağılımı.

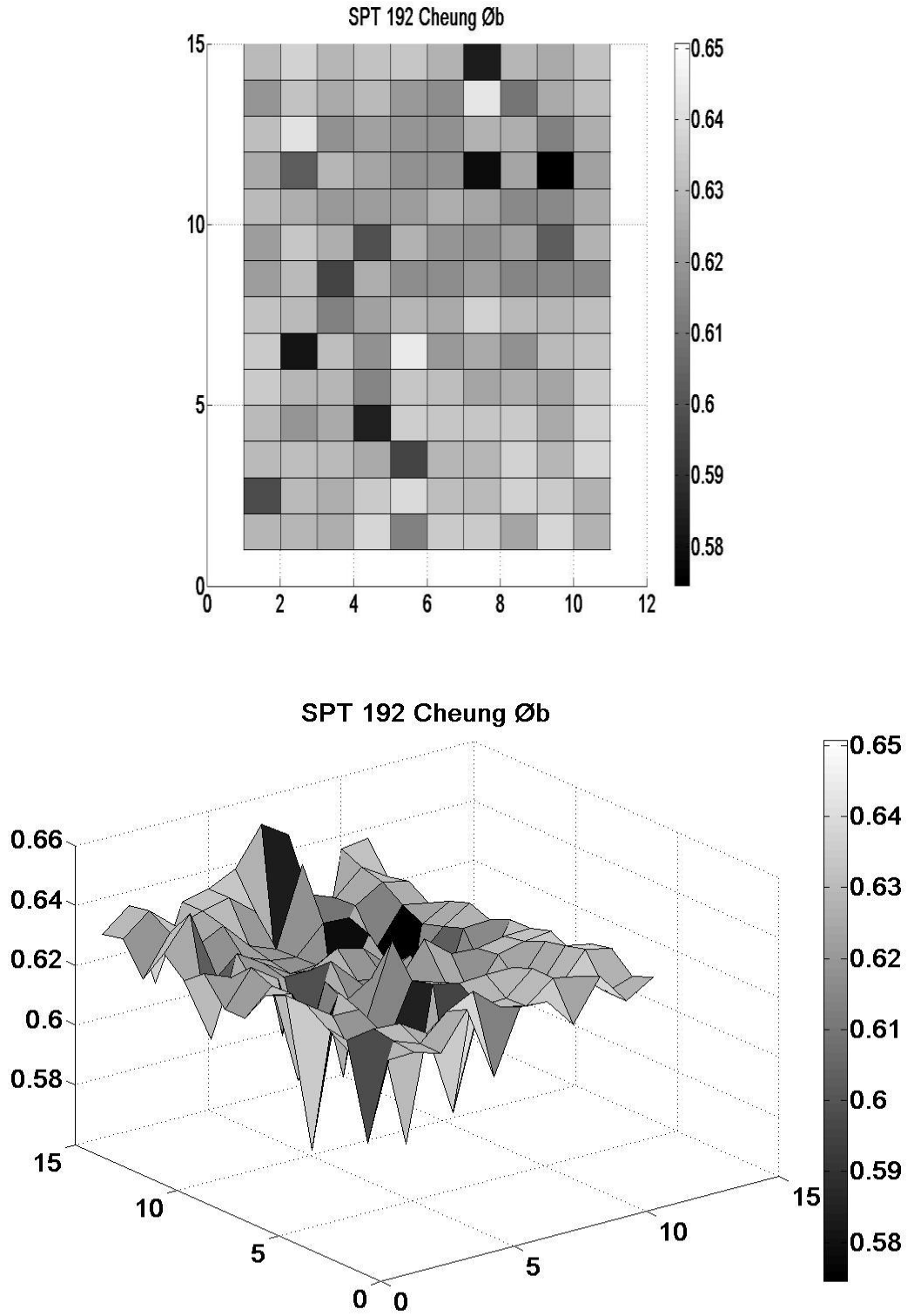


Şekil 4.8. 300°C’de tavlama yapılmış SPT192 numunesinde 165 diyodun I/V ölçümlerinin standart $I - V$ analizi ile elde edilen engel yüksekliği Gauss dağılımı.

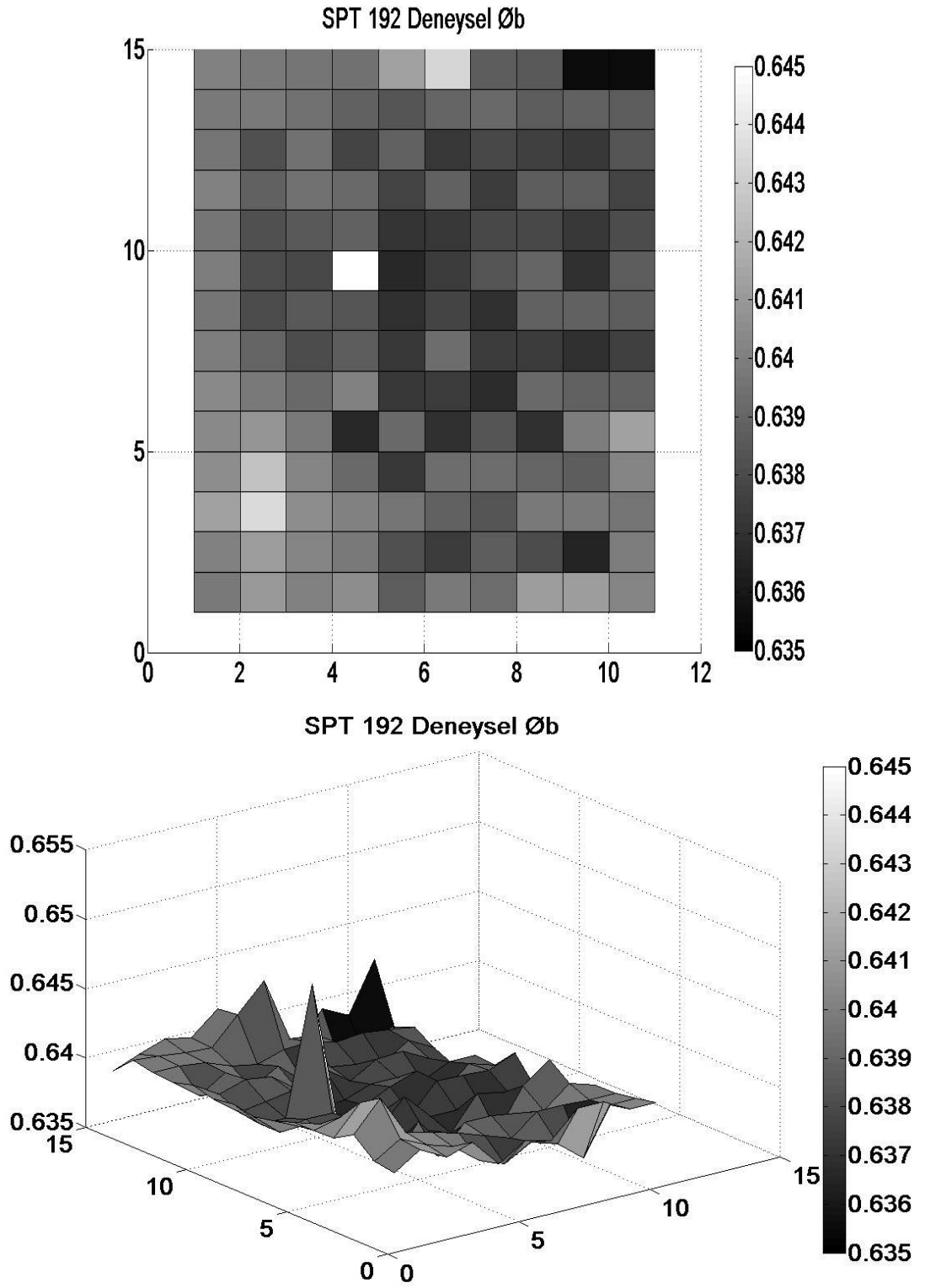
Çizelge 4.3. SPT192 300°C’de ısıtılma işlemine tabi tutulmuş numunede Cheung yöntemi ve $\ln(I) - V$ eğiminden hesaplanan engel yüksekliğinin Gauss dağılımına ait parametreler

Hesaplama Yöntemi	Gauss Dağılımının Maksimumu (meV)	Yarı Yükseklik Genişliği ($FWHM$) (meV)
Cheung	626	16,1
TE	638	3,6

SPT 192 numunesinde ölçümü yapılan diyotlara ait engel yükseklikleri ve idealitelerin haritalaması Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da verilmiştir.

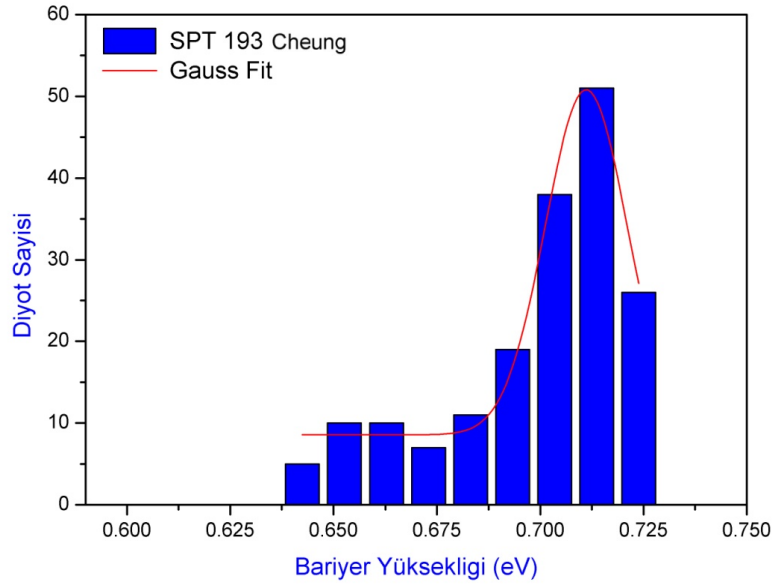


Şekil 4.9. 300°C’de tavllanmış SPT192 numunesinde, 12x15 adet $I - V$ ölçümüne ait engel yüksekliğinin Cheung analizi.

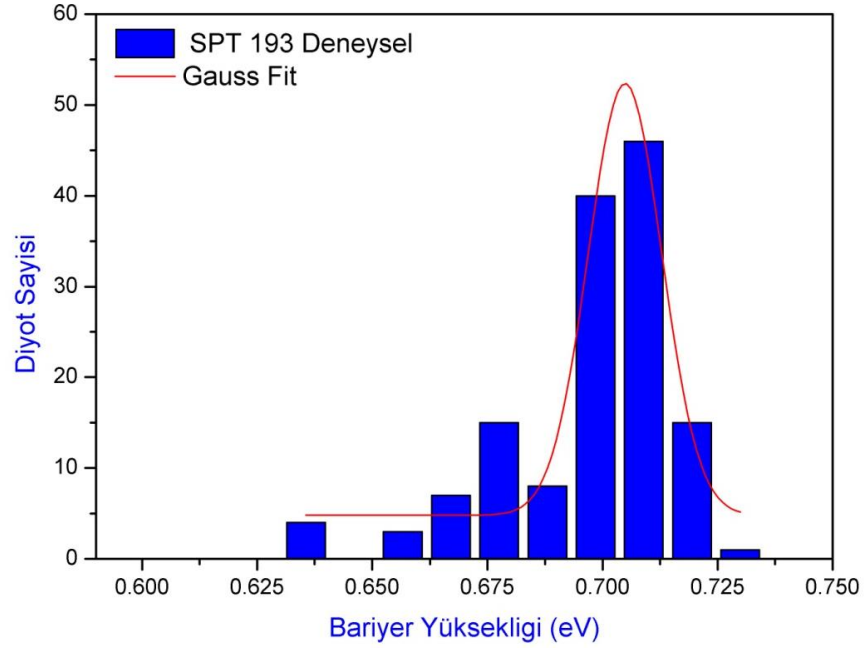


Şekil 4.10. 300°C’de tavllanmış SPT192 numunesinde, 12x15 adet $I - V$ ölçümüne ait engel yüksekliğinin Standart $I - V$ analizi.

400°C'de ısıtılma işlemi yapıldığı SPT 193 numunesinde TE ve Cheung yöntemine göre yapılan analizlerde engel yükseklikleri sırası ile 705 ve 711 meV olarak bulundu (Şekil 4.11 ve 12). Her iki metod birbirine yakın sonuç verirken $FWHM$ değerleri de artmıştır, Çizelge 4.4. Engel yüksekliğinde artış $Mo - Si$ ara yüzünde metalürjik reaksiyonun başladığına işaret ederken homojensizlikteki artış başlangıç ara yüzey şartlarının aynı olmamasından kaynaklandığı söylenebilir. Numune üzerinde engel ve idealite faktörü parametrelerinin dağılımı ise Şekil 4.13 ve 14'de verilmiştir.



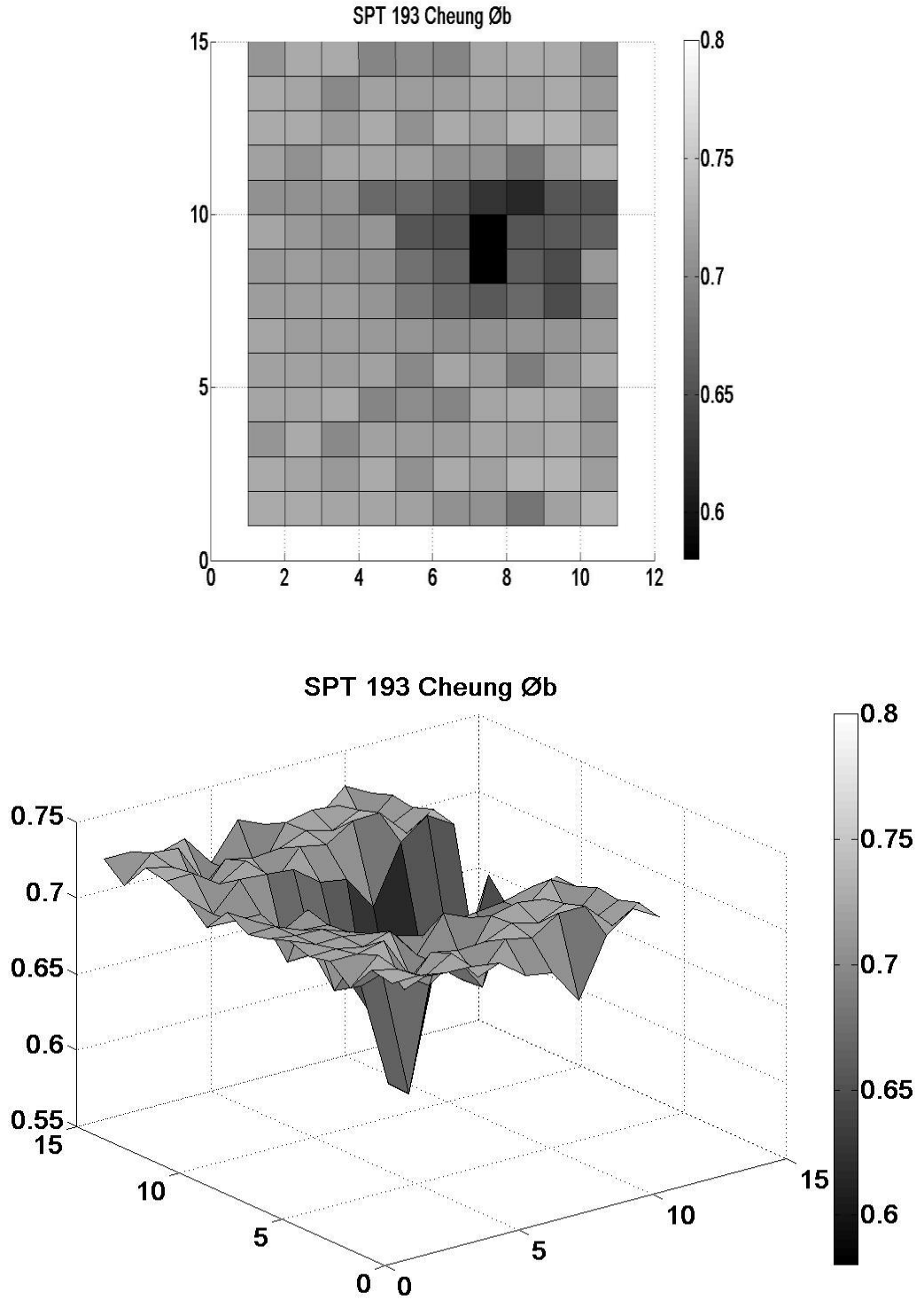
Şekil 4.11. SPT193 400°C'de tavllanmış numunede $I - V$ ölçümlerinin Cheung analizinden elde edilen engel yüksekliği Gauss dağılımı.



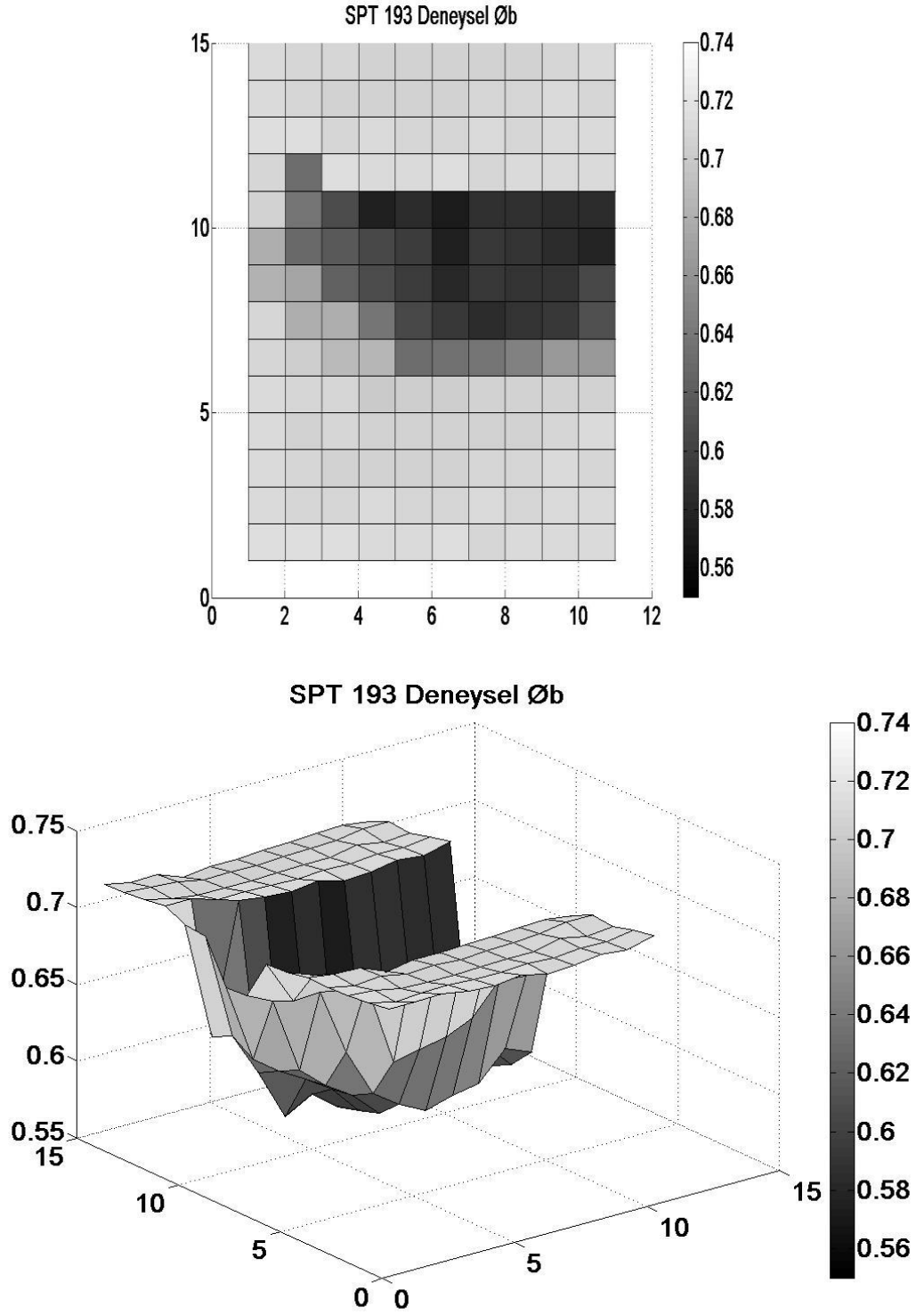
Şekil 4.12. SPT193 400°C’de tavlanmış numunede standart $I - V$ analizinden elde edilen engel yüksekliği Gauss dağılımı.

Çizelge 4.4. SPT193 400°C’de ısıl işleme tabi tutulmuş numunede Cheung yöntemi ve $\ln(I) - V$ eğiminden hesaplanan engel yüksekliğinin Gauss dağılımına ait parametreler.

Hesaplama Yöntemi	Gauss Dağılımının Maksimumu (meV)	Yarı Yükseklik Genişliği ($FWHM$) (meV)
Cheung	711	23,3
TE	705	18,8

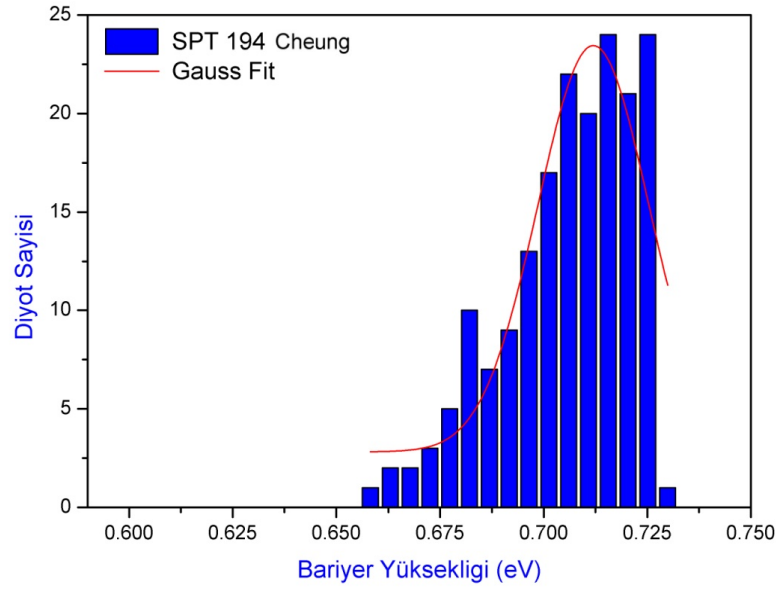


Şekil 4.13. 400°C’de tavllanmış SPT193 numunesinde, 12x15 adet $I - V$ ölçümüne ait engel yüksekliğinin Cheung analizi.

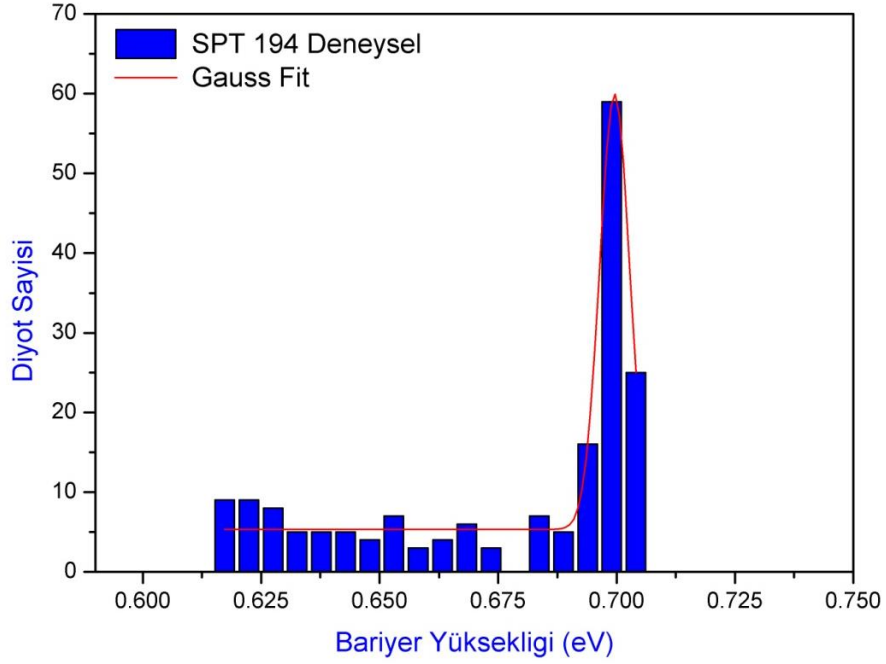


Şekil 4.14. 400°C’de tavllanmış SPT193 numunesinde, 12x15 adet $I - V$ ölçümüne ait engel yüksekliğinin Standart $I - V$ analizi.

500°C’de yapılan ısıl işlem sonucunda ortalama engel yüksekliği artmış olup TE modeline göre 712 meV ve Cheung analizine göre 700 meV bulunmuştur. Etkin olarak homojen olmayan dağılım gözlemlendi. Şekil 4.16’de görüldüğü gibi TE modeline göre bu dağılım 620 meV değerine kadar gözlenirken Cheung modelinde (Şekil 4.15) bu dağılım 650 meV üzerinde sınırlı kalmıştır. Engel yüksekliğinin iki boyutlu dağılımı ise Şekil 4.17 ve 4.18 verilmiştir. 500°C’de yapılan ısıl işlem sonrası etkin engel yüksekliğinde bir artış gözlenirken düşük engelli diyotların ortaya çıkışı yapısal homojensizliğin ortaya çıkışı olarak değerlendirilebilir.



Şekil 4.15. SPT194 500°C’de tavlanmış numunede $I - V$ ölçümlerinin Cheung analizinden elde edilen engel yüksekliği Gauss dağılımı

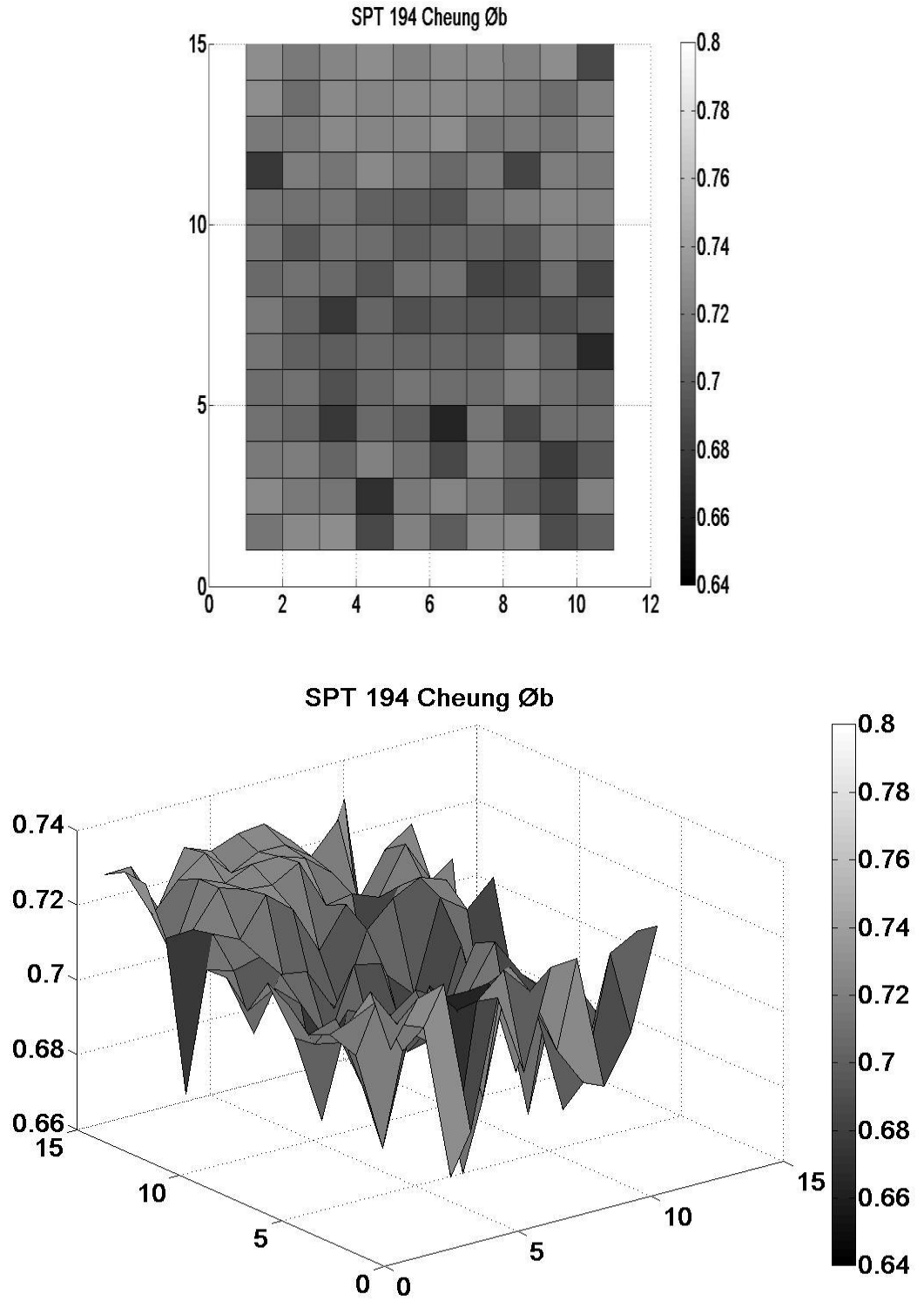


Şekil 4.16. SPT194 500°C’de tavlanmış numunede standart $I - V$ analizinden elde edilen engel yüksekliği Gauss dağılımı.

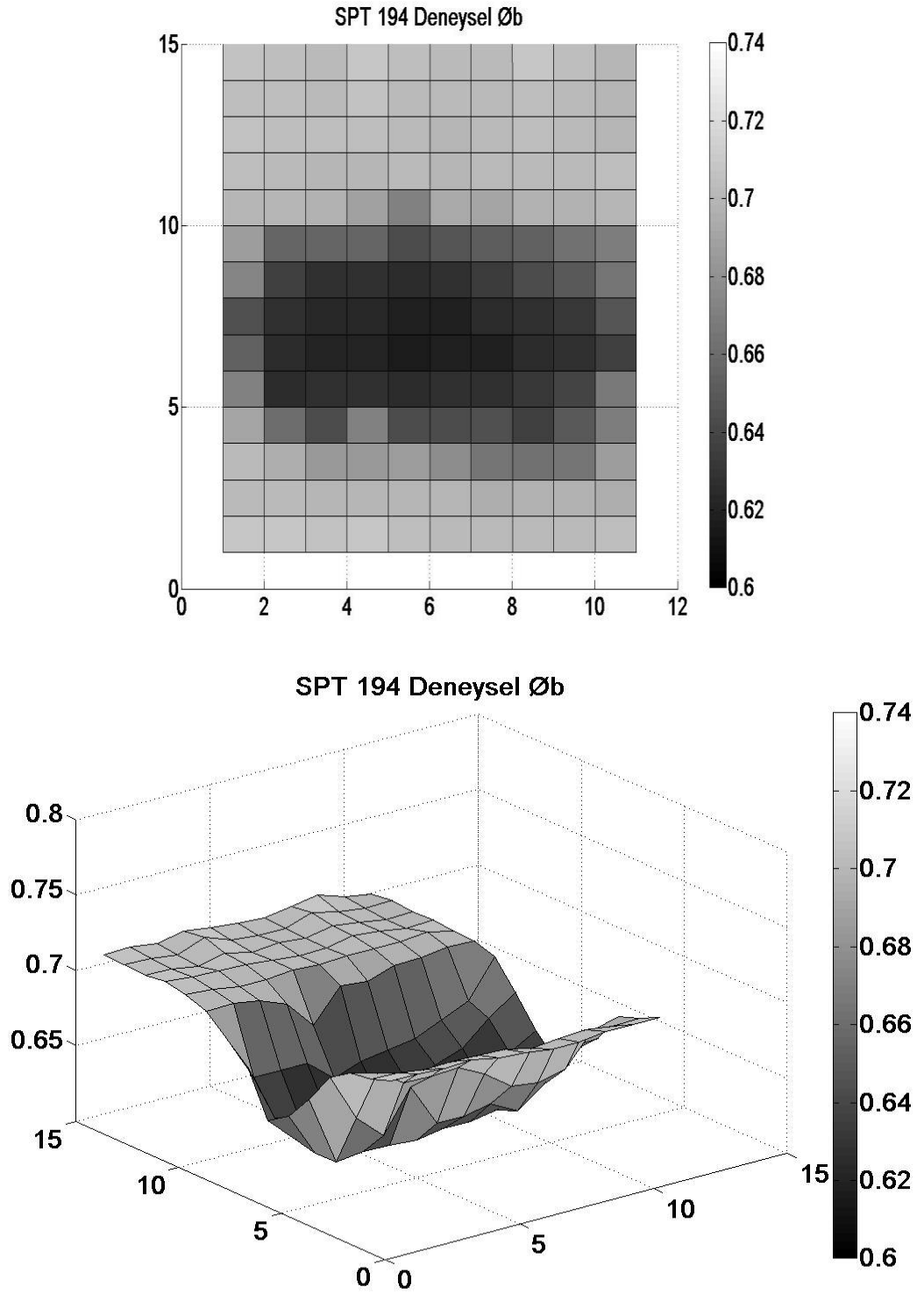
Çizelge 4.5. SPT 194 500°C’de ısıl işleme tabi tutulmuş numunede Cheung yöntemi ve $\ln(I) - V$ eğiminden hesaplanan engel yüksekliğinin Gauss dağılımına ait parametreler

Hesaplama Yöntemi	Gauss Dağılımının Maksimumu (meV)	Yarı Yükseklik Genişliği (FWHM) (meV)
Cheung	712	32
TE	700	7,4

Şekil 4.17 SPT 194 500°C’de ısıl işleme tabi tutulmuş numune için elde edilen 2 ve 3 boyutta Cheung yöntemi ile yapılan haritalama değerlerini göstermektedir. Şekil 4.18 ise SPT 194 500°C’de ısıl işleme tabi tutulmuş numune için elde edilen 2 ve 3 boyutta doğrudan analiz yöntemi ile yapılan haritalama değerlerini göstermektedir.



Şekil 4.17. 500°C’de tavllanmış SPT194 numunesinde, 12x15 adet $I - V$ ölçümüne ait engel yüksekliğinin Cheung analizi.

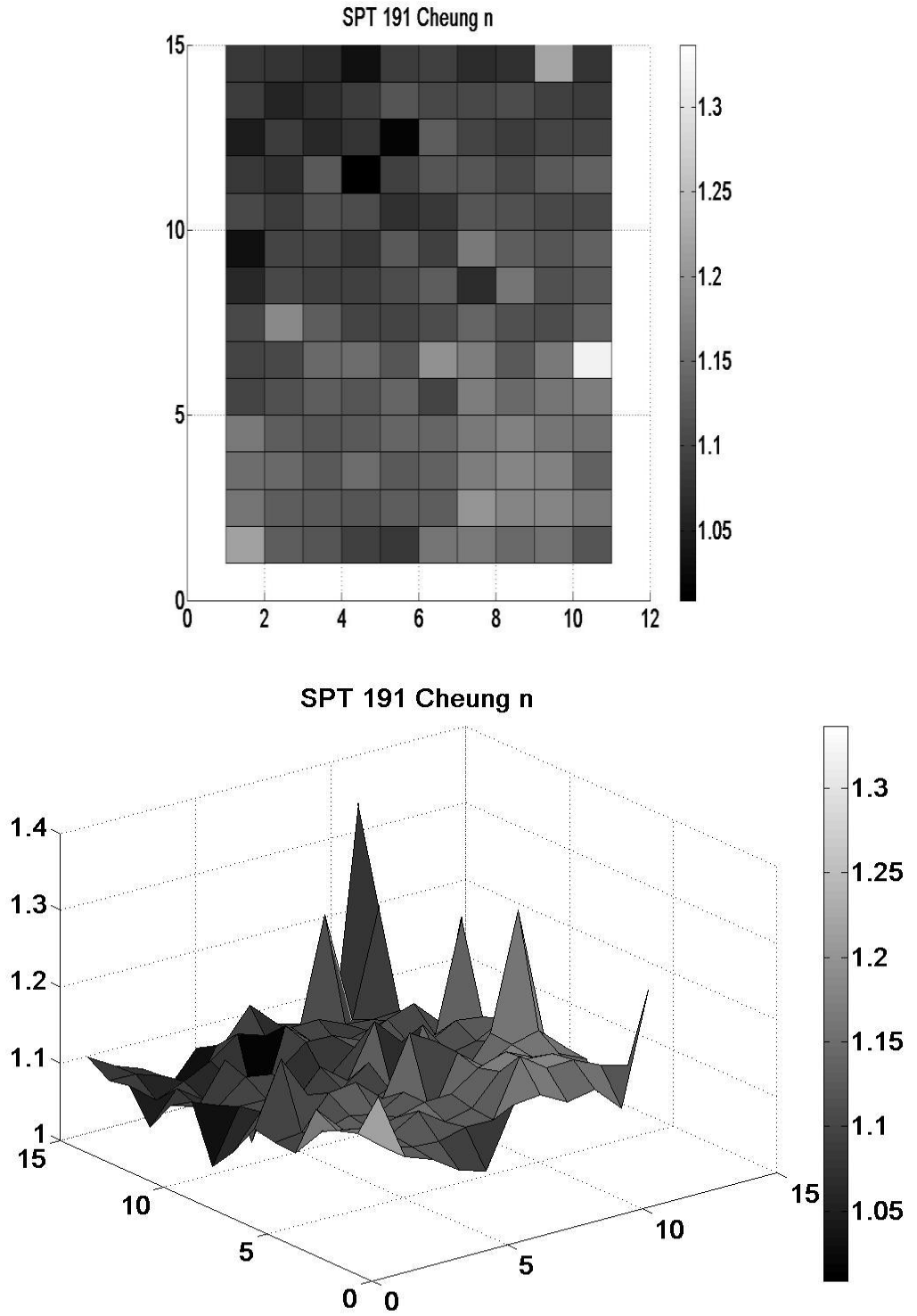


Şekil 4.18. 500°C’de tavllanmış SPT194 numunesinde, 12x15 adet $I - V$ ölçümüne ait engel yüksekliğinin Standart $I - V$ analizi.

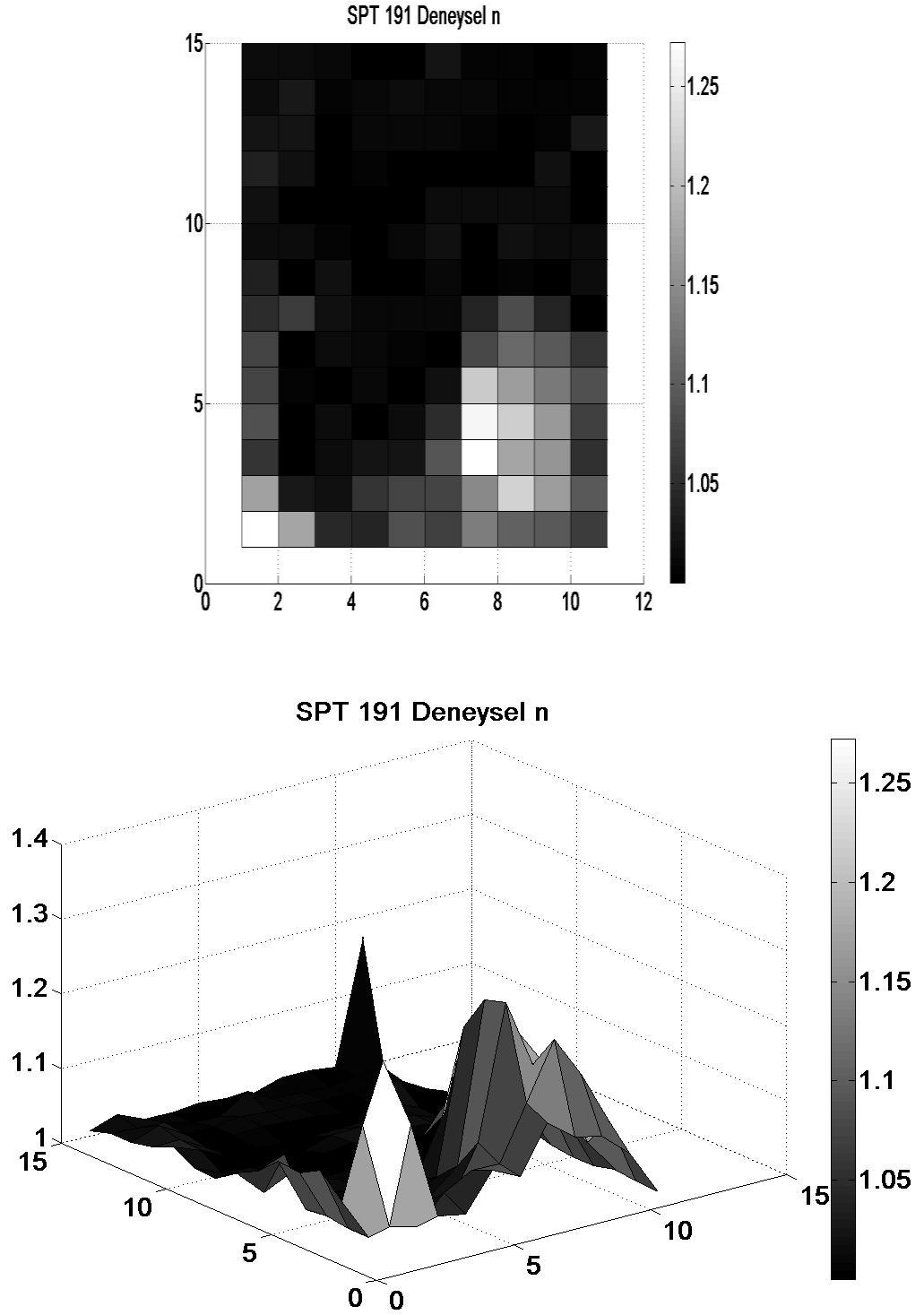
4.3. İdealite Faktörü

4.3.1. İdealite faktörünün iki ve üç boyutlu haritalamalarının incelenmesi

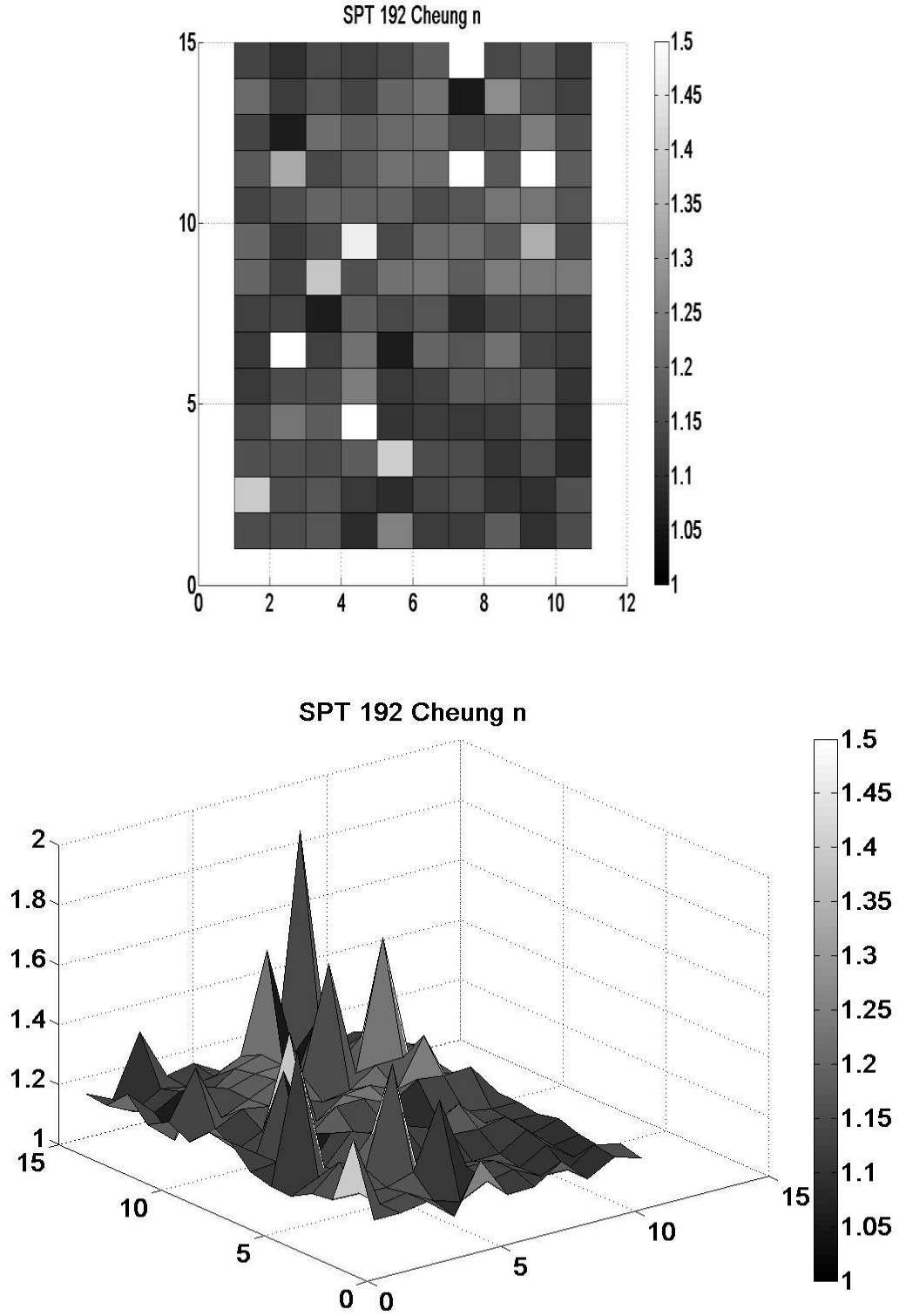
İdealite faktörünün iki ve üç boyutta haritalamalarının incelenmesi referans numune ile farklı sıcaklıklarda tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş numuneler için *TE* modeline göre ve Cheung metodu kullanılarak iki farklı şekilde yapılmıştır. Aşağıdaki şekiller söz konusu haritalama sonuçlarını göstermektedir. İdealitenin homojenliği üzerine odaklanan bu çalışmada hesaplamalarda kullanılan modele göre birbirleri ile tam örtüşmeyen dağılımlar elde edilmiştir. Isıl işlem yapılmamış numunede, Şekil 4.19, 4.20'de *TE* modeli daha homojen dağılım öngörürken Cheung yönteminde dağılım artmıştır. Benzer davranış 300°C'deki tavllanmış numune için de söylenebilir. Şekil 4.21'de $n=1.1$ 'de yoğunlaşmış bir dağılım sergilerken *TE* analizi idalitelerin 1.01'in altında olduğunu ve numune üzerinde dağılımı yüksek oranda homojenlik sergilediği gözlemlendi. Şekil 4.22 400°C ve 500°C'deki tavlama sonrası idealitenin dağılımının homojensizleştiği Şekil 4.23- 26'da görülmektedir.



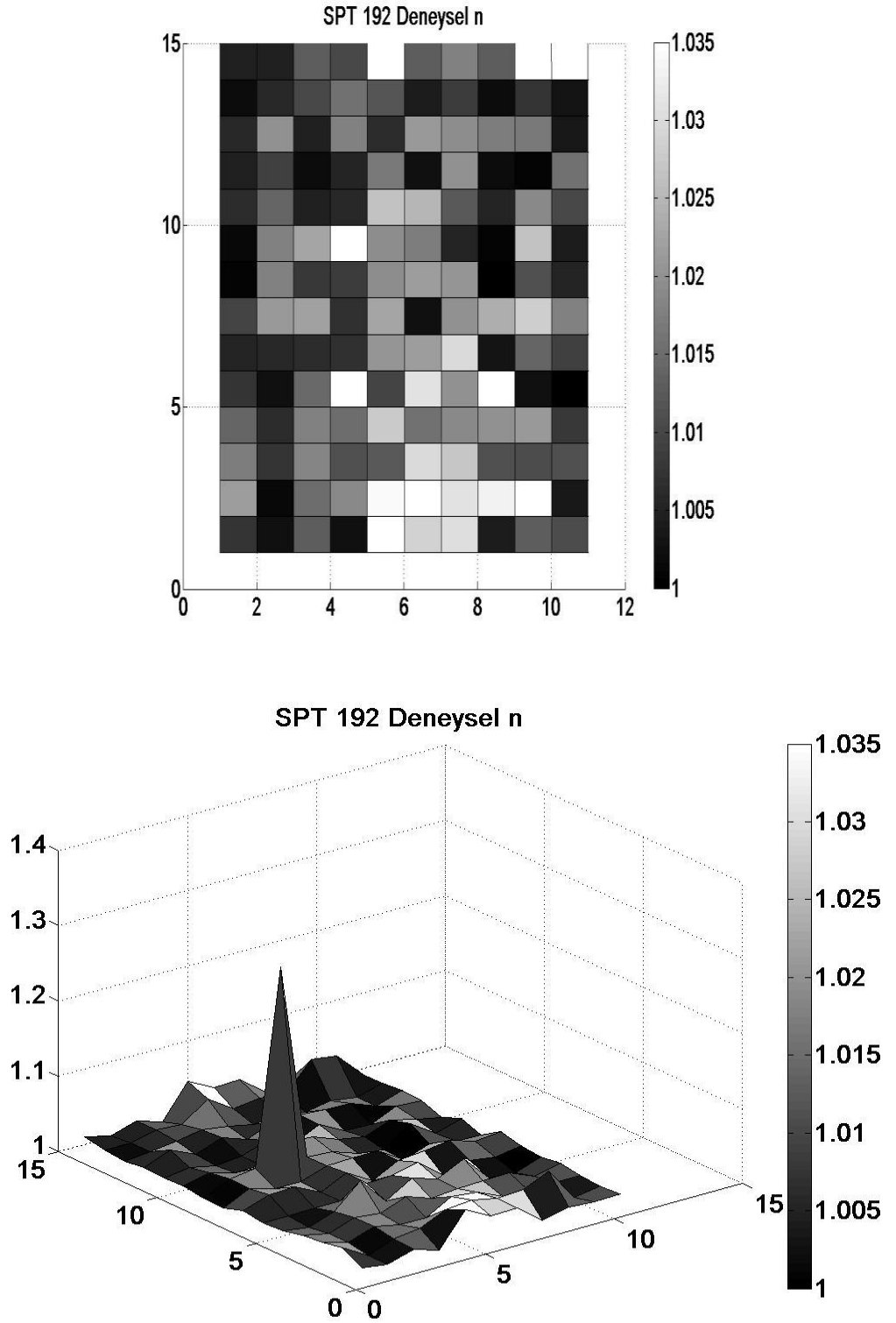
Şekil 4.19. Referans SPT191 numunesinde, 12x15 adet $I - V$ ölçümüne ait Cheung analizi ve idealite faktörünün dağılımı.



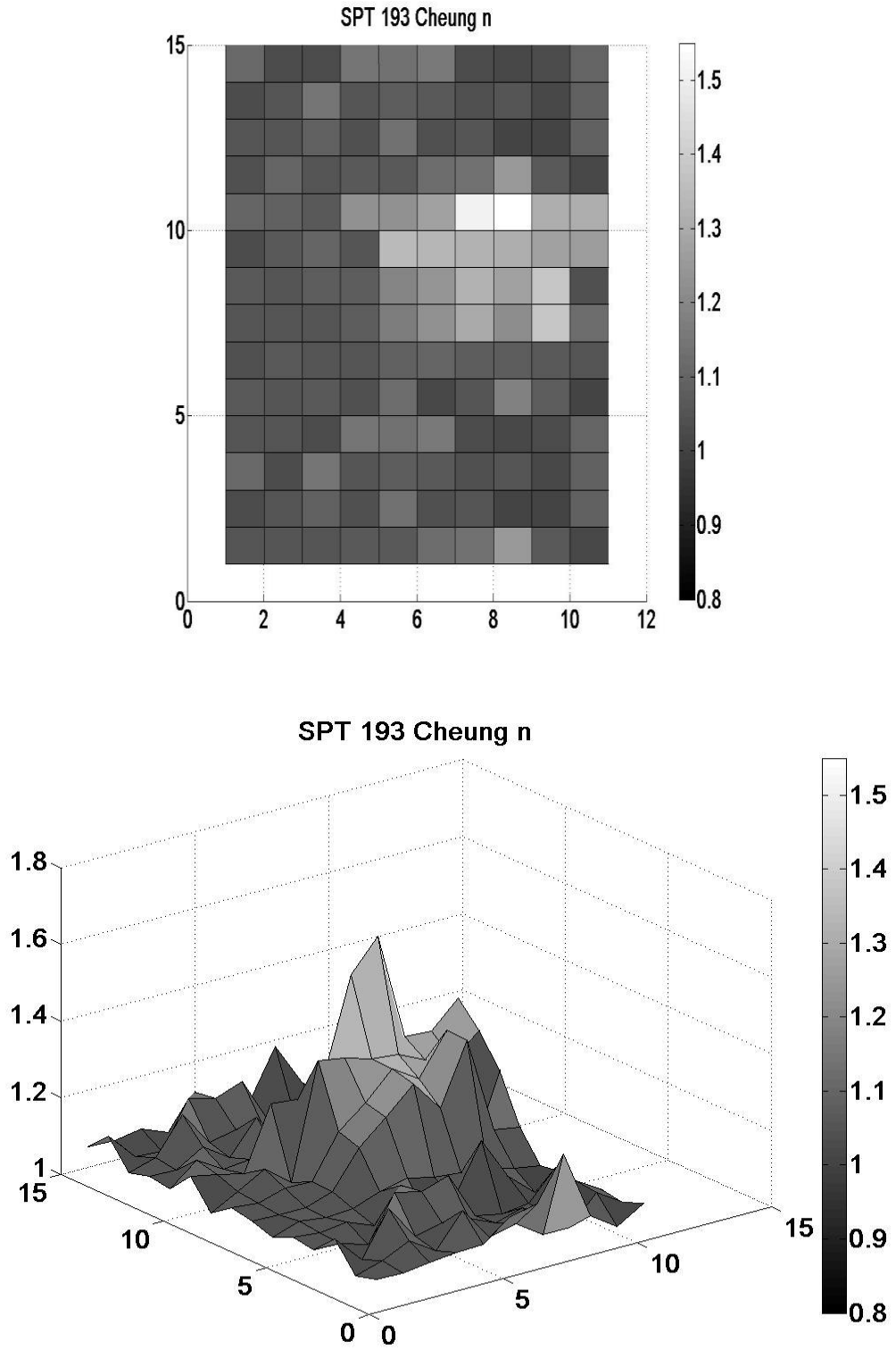
Şekil 4.20. Referans SPT191 numunesinde, 12x15 adet $I - V$ ölçümüne ait engel idealite faktörü haritalanması Standart $I - V$ analizi.



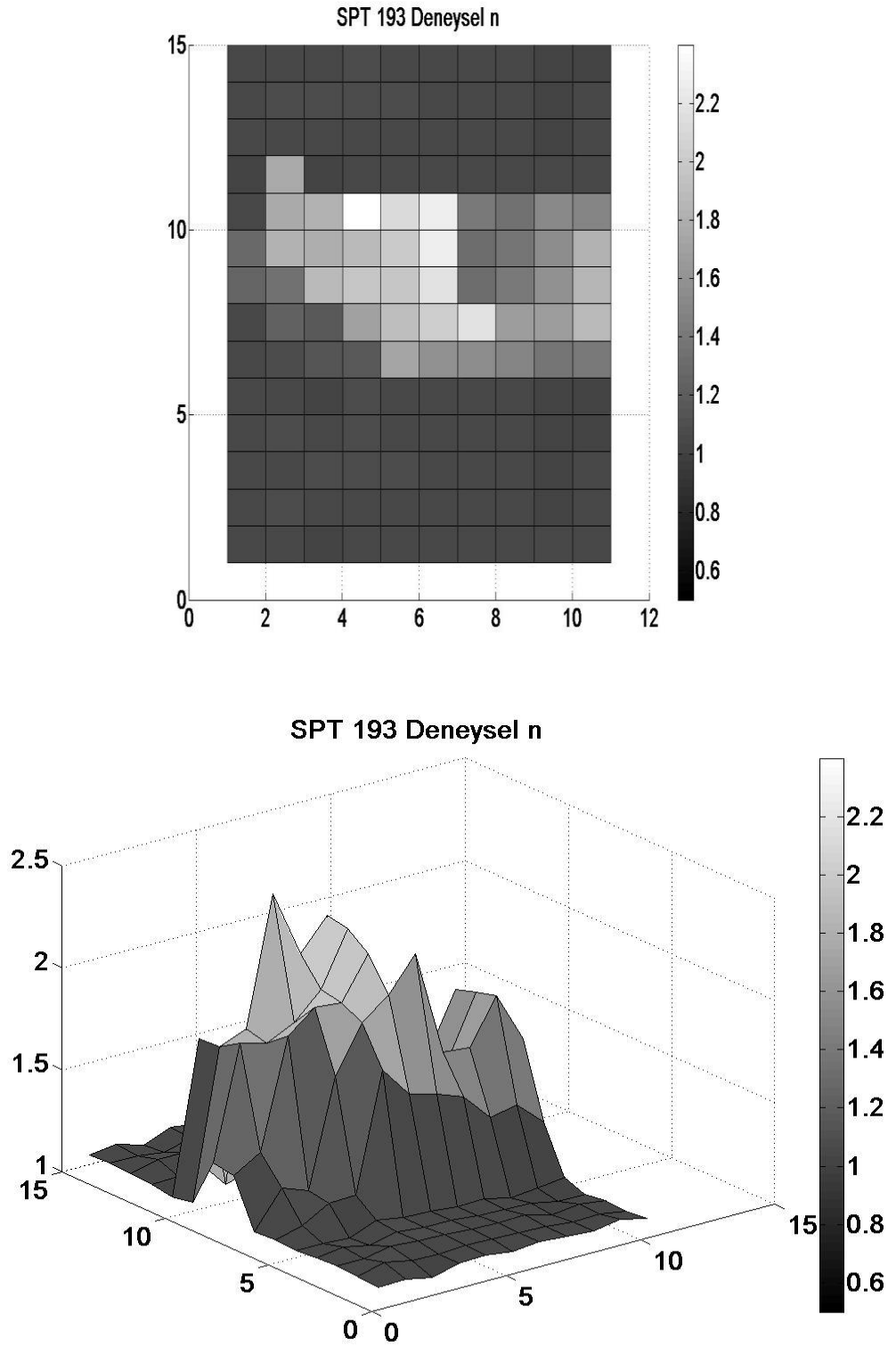
Şekil 4.21. 300°C'de ısııl işleme tabi tutulmuş SPT192 numunesinde, 12x15 adet $I - V$ ölçümüne ait engel idealite faktörü haritalanması Cheung analizi.



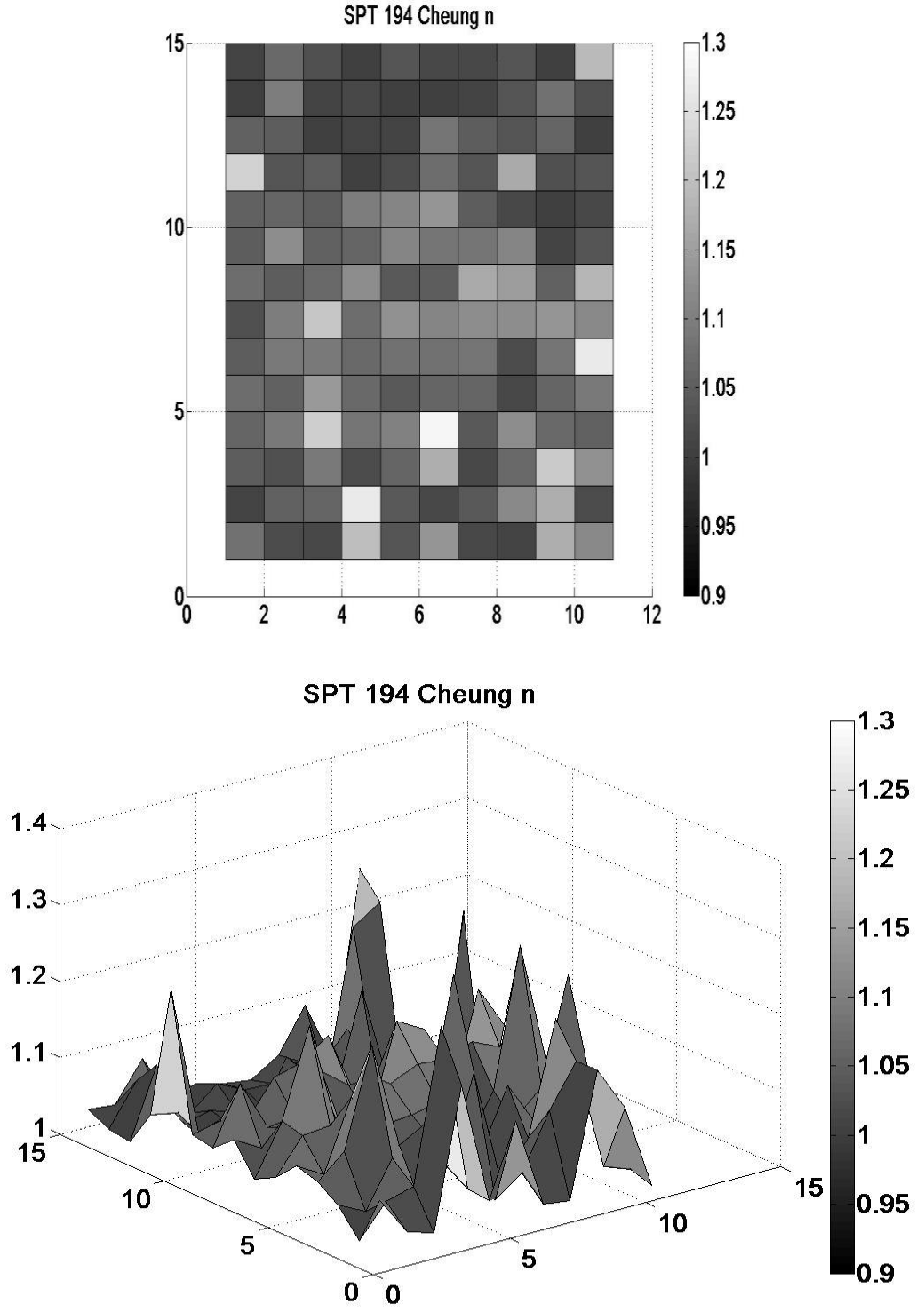
Şekil 4.22. 300°C'de ısııl işleme tabi tutulmuş SPT192 numunesinde, 12x15 adet $I - V$ ölçümüne ait engel idealite faktörü haritalanması Standart $I - V$ analizi.



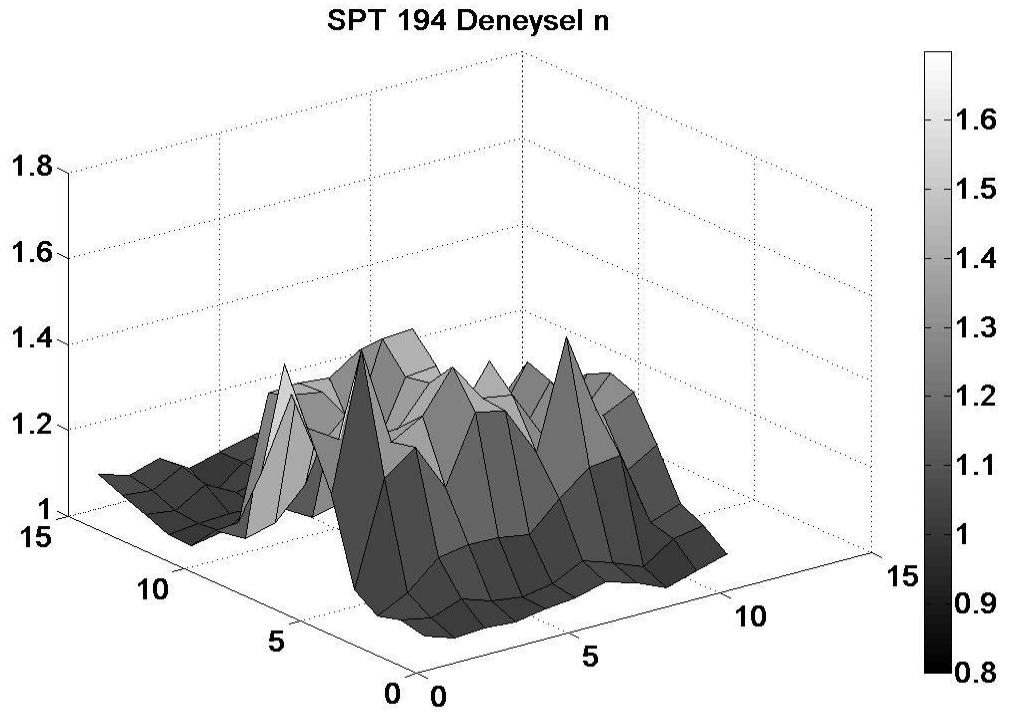
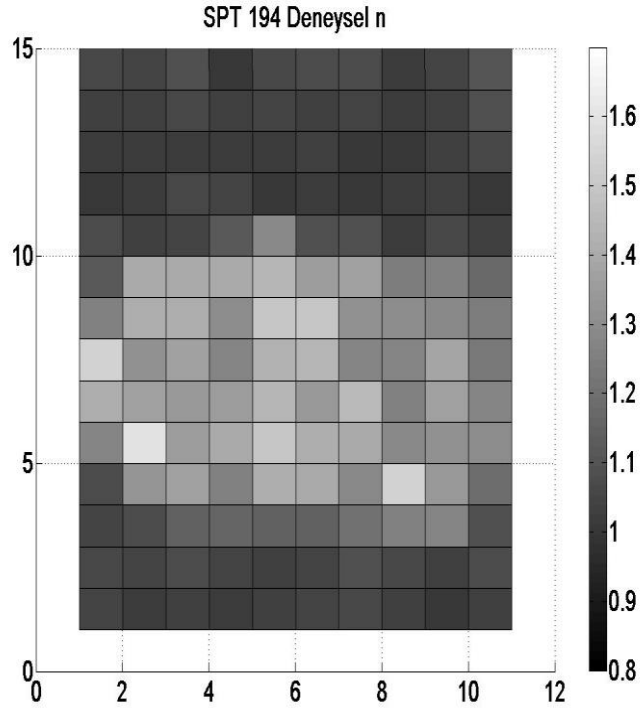
Şekil 4.23. 400°C’de ısııl işleme tabi tutulmuş SPT193 numunesinde, 12x15 adet $I - V$ ölçümüne ait engel idealite faktörü haritalanması Cheung analizi.



Şekil 4.24. 400°C’de ısııl işleme tabi tutulmuş SPT193 numunesinde, 12x15 adet $I - V$ ölçümüne ait engel idealite faktörü haritalanması Standart $I - V$ analizi.



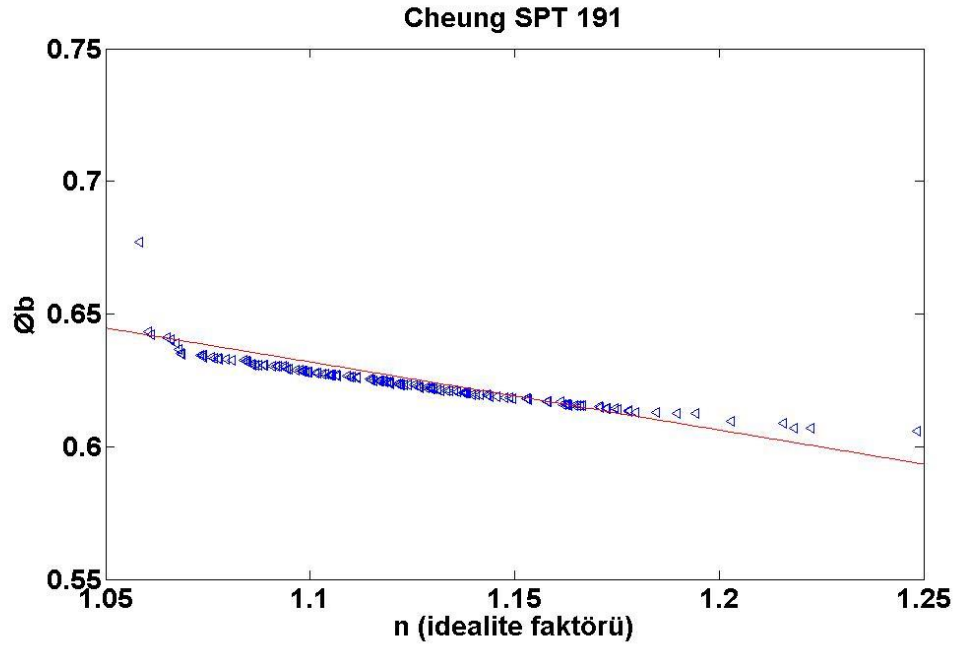
Şekil 4.25. 500°C’de ısııl işleme tabi tutulmuş SPT194 numunesinde, 12x15 adet $I - V$ ölçümüne ait engel idealite faktörü haritalanması Cheung analizi.



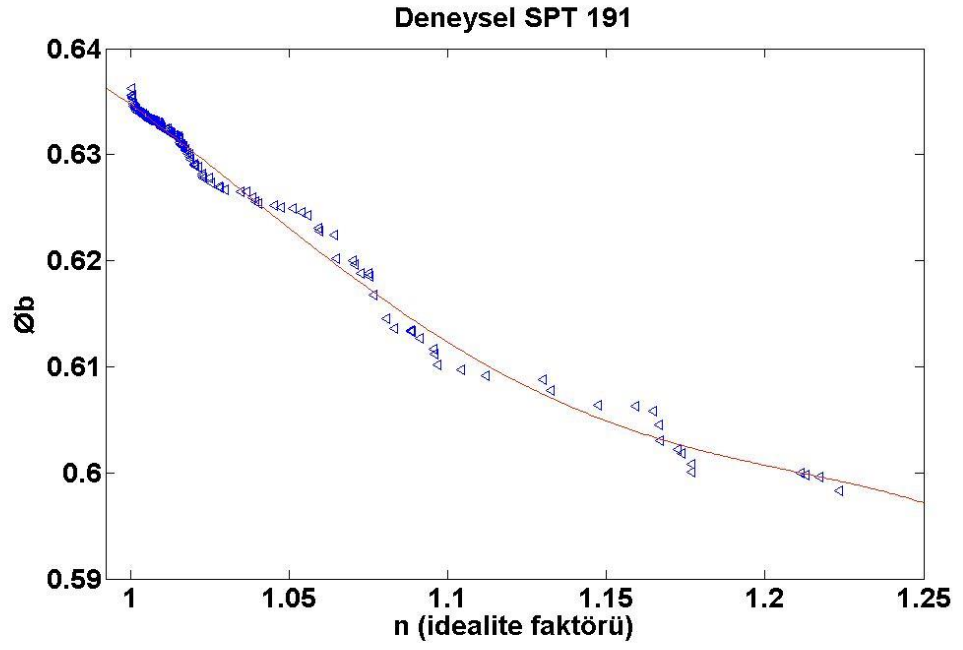
Şekil 4.26. 500°C’de ısııl işleme tabi tutulmuş SPT194 numunesinde, 12x15 adet $I - V$ ölçümüne ait engel idealite faktörü haritalanması Standart $I - V$ analizi.

4.3.2. Engel yüksekliğinin idealite faktörüne göre değişimi

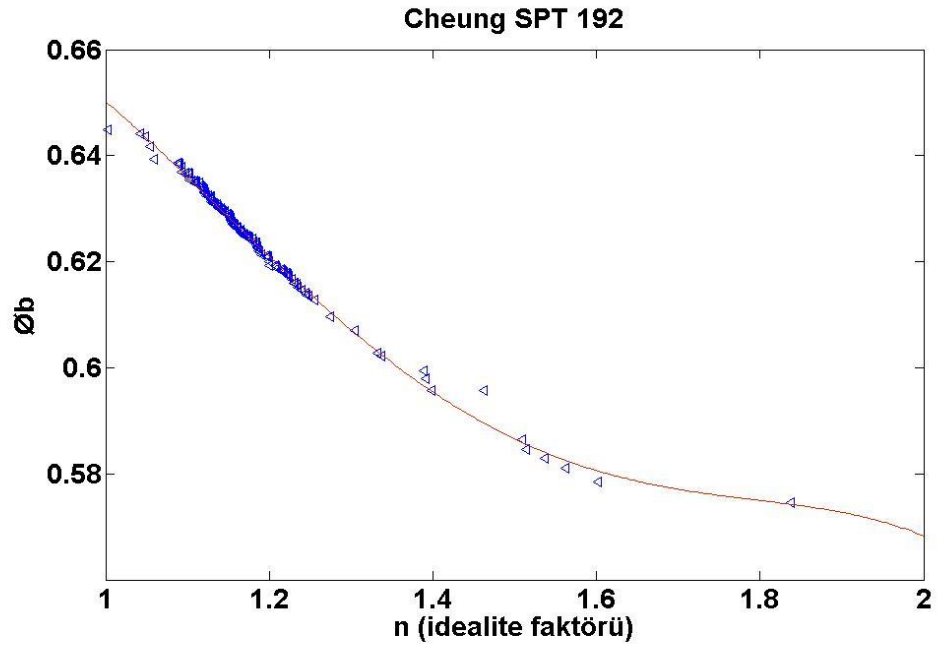
Prosesi yapılan numuneler üzerinde yapılan $I - V$ ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliği ve idealite faktörü arasındaki ilişkiler Şekil 4.27-34 grafiklerinde verilmiştir. Teori ve deneysel gözlemler idealite faktörü değişimi ile hesaplanan engel yüksekliği arasında lineer olacağı yönündedir. Şekillerde görüldüğü üzere idealite faktörünün artışı ile ϕ_b 'deki azalış teorik beklentiyi karşılamaktadır. Referans numuneye ait ϕ_b ve n arasındaki lineer ilişki Cheung analizi verilerinde gözlenmekte iken Şekli 4.27, doğrudan TE analiz sonuçlarında gözlenememiştir, Şekil 4.28. Isıl işlem ile $\phi_b - n$ ilişkisindeki lineer ilişkide artış olmuştur. Şekil 4.29-34 grafikleri bize olası farklı engel yüksekliklerinin oluştuğunu işaret etmektedir ancak bu yöndeki bir analiz için lineer korelasyonun daha yüksek olduğu ölçümlere ihtiyaç vardır.



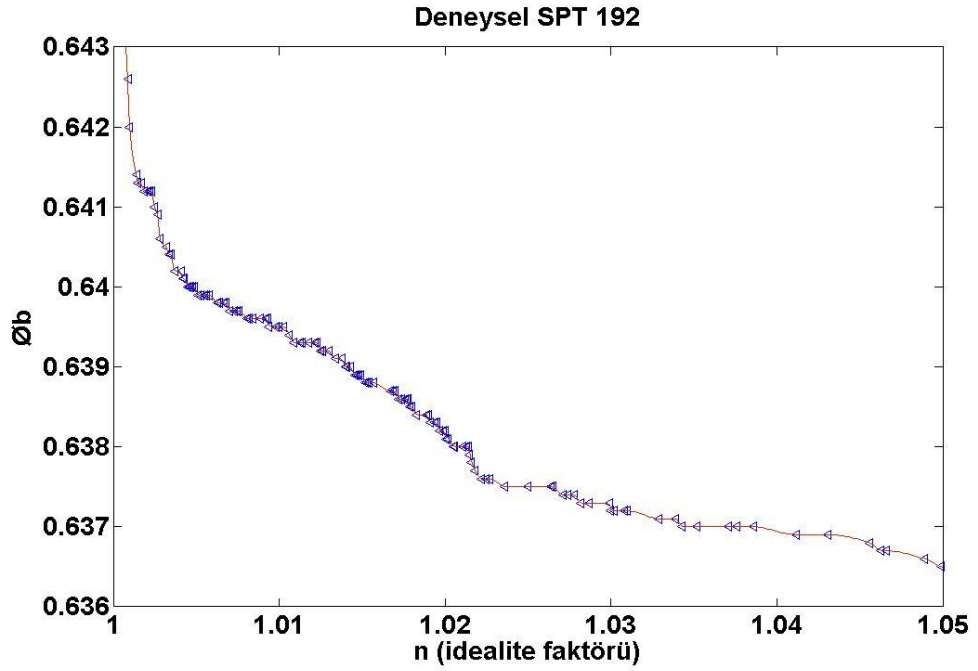
Şekil 4.27. SPT191 Referans numunesinde Cheung yöntemi ile hesaplanan engel yüksekliğinin n ile değişimi.



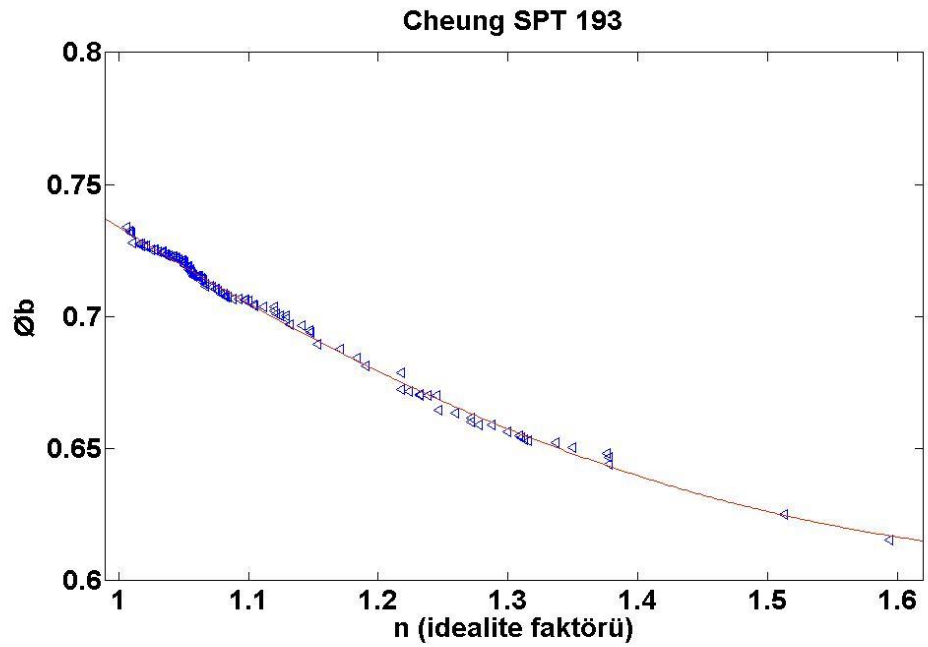
Şekil 4.28. SPT191 Referans numunesinin $I - V$ ölçümlerinin standart analizinden hesaplanan engel yüksekliğinin n ile değişimi.



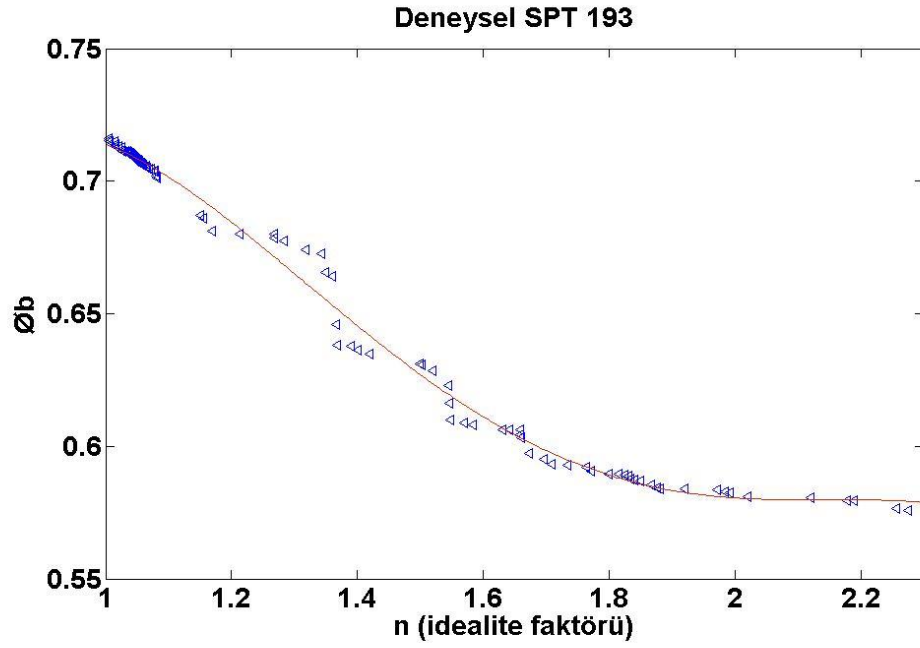
Şekil 4.29. SPT192 300°C'de ısıtılma tabii tutulmuş numunede Cheung yöntemi ile hesaplanan engel yüksekliğinin n ile değişimi.



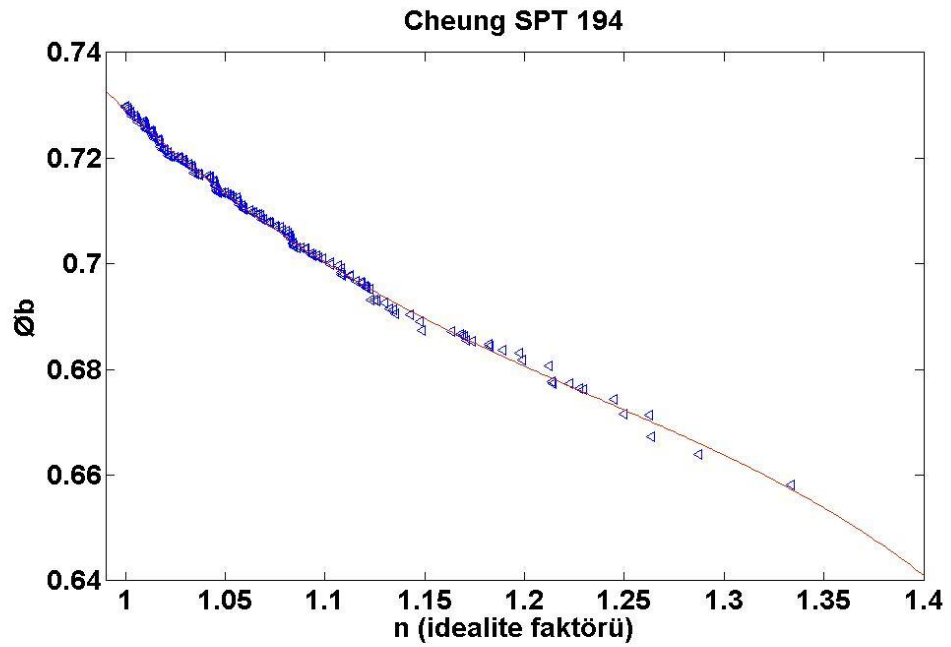
Şekil 4.30. SPT192 300°C’de ısıl işleme tabi tutulmuş $I - V$ ölçümlerinin standart analizinden hesaplanan engel yüksekliğinin n ile değişimi.



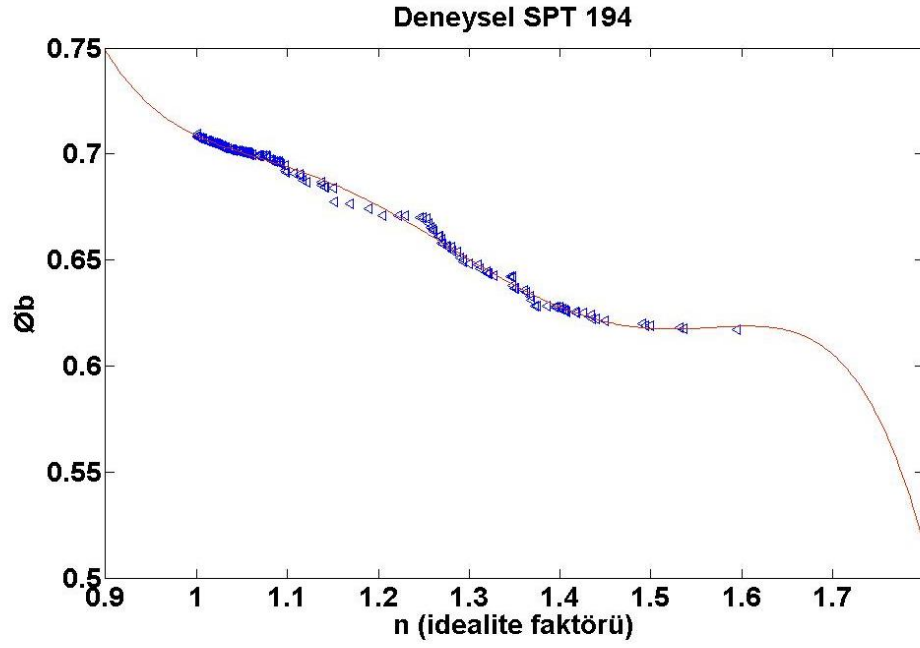
Şekil 4.31. SPT193 400°C’de ısıl işleme tabi tutulmuş numunede Cheung yöntemi ile hesaplanan engel yüksekliğinin n ile değişimi.



Şekil 4.32. SPT193 400°C’de ısıl işleme tabi tutulmuş numunenin $I - V$ ölçümlerinin standart analizinden hesaplanan engel yüksekliğinin n ile değişimi.



Şekil 4.33. SPT194 500°C’de ısıl işleme tabi tutulmuş Cheung yöntemi ile hesaplanan engel yüksekliğinin n ile değişimi.



Şekil 4.34. SPT194 500°C’de ısıl işleme tabi tutulmuş numunenin $I - V$ ölçümlerinin standart analizinden hesaplanan engel yüksekliğinin n ile değişimi.

5. SONUÇ

Bu çalışmada ilk olarak standart organik ve metalik kirlilik temizliği işlemleri sonrası n-tipi silisyumun mat yüzeyine termal buharlaştırma ile $Au:Sb$ (%2,5) metalizasyonu yapıldı ve 400°C 'de kuru azot akışı altında 3 dk. süren ısıtma işlemi ile omik kontak oluşturuldu. Isıtma işlemi sonrası silisyumun parlak yüzeyine sputter tekniği ile Schottky kontak oluşturulmak üzere Mo metalizasyonu yapıldı. Sputter işlemi $3,4 \times 10^{-7}$ Torr başlangıç vakumunda plazma oluşumu için $Ar(6N)$ taban basıncı kütle akış kontrolörü $1,8 \times 10^{-3}$ Torr'a ayarlandı. 23.3 MHz RF sinyali darbeleri olarak 10 ms darbe süresi 11 Hz frekans ile 10 dakika süreli Mo yığılma işlemi yapıldı. $M \times n$ matris formunda diyotları oluşturmak üzere 0.5 mm çaplı gölge maske kullanıldı.

Elde edilen $Mo/n - Si$ eklemi üzerinde yapılan XRD ölçümü ile ısıtma işlemi sonrası $Mo:Si$ etkileşimi incelenmiştir. Bu numuneler önce referans daha sonra ise tavlama yapıldıktan sonra değerlendirilmiştir.

XRD ölçümlerinde referans numunesi ve 30 dk. süre ile 400°C 'de kadar tavllanmış olan numunelerde $MoSi_2(002)$ yöneliminde kristalleşme olduğu görülmektedir. Tavlama 500°C 'ye çıkarıldığında (002) yönelimine ilaveten (100) yöneliminin de oluştuğu görülmektedir.

Bu çalışmada ayrıca $I - V$ ölçümlerinin doğrudan TE ve Cheung modellerine göre hesaplanan Φ_b ve n 'in Gauss dağılım parametreleri hesaplanarak karşılaştırması yapıldı. $M \times n$ matris formunda çoklu diyotların $I - V$ ölçümlerinden elde edilen Φ_b ve n 'in dağılımlarının 300°C 'de yapılan ısıtma işlemi ile en iyi homojenliğe ulaştığı görüldü.

Son olarak idealite faktörünün engel yüksekliğine bağlı değişimi incelenmiştir. Teori ve deneylerin öngördüğü Φ_b ve n arasındaki lineer ilişki ısıtma işlemi tabii tutulan numunelerde gözlenirken çoklu engel yüksekliği oluşumu analizlerin genişletilmesi gerekmektedir.

KAYNAKÇA

- Aflatooni, K., Nathan, A., Hornsey, R., 1996, Low frequency noise behavior in a-Si : H Schottky barrier devices, *Amorphous Silicon Technology*, 420, 747-752.
- Atiwongsangthong, N., Titiroongruang, W., 2009, Multiplication photocurrent gain in Silicon planar metal-semiconductor-metal structures, *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, 2, 1435-1438.
- Baranov, V.V., Emelyanov, V.A., Solovjov, J.A., 2006, Schottky contacts electrical parameters modelling, *1st Electronics System Integration Technology Conference*, Dresden Germany, 1-2, 324-327.
- Benton, J.L., Jacobson, D.C., Jackson, B., Johnson, J.A., Boone, T., Eaglesham, D.J., Stevie, F.A., Becorro, J., 1999, Behavior of molybdenum in silicon evaluated for integrated circuit processing, *Journal of Electrochemical Society*, 146 (5), 1929-1933.
- Biswas, N., Gurganus, J., Misra, V., Yang, Y., Stemmer, S., 2005, Evaluation of nickel and molybdenum silicides for dual gate complementary metal-oxide semiconductor application, *Applied Physics Letters*, 86 (2), yayin no: 022105.
- Boltovets, N.S., Ivanov, V.N., Konakova, R.V., Milenin, V.V., Voitsikhovskii, D.I., 2003, Phase interactions in TiN_x(TiB_x)-n-Si-n(+)-Si contacts and their thermal degradation due to rapid thermal annealing, *Technical Physics*, 48 (4), 441-448.
- Brillson, L.J., 1993. *Contacts to Semiconductors: Fundamentals and Technology*, Noyes Publishing.
- Bulyarski, S.V., Zhukov, A.V., 2001, An analysis of the charge-transport mechanisms defining the reverse current-voltage characteristics of the metal-GaAs barriers, *Semiconductors*, 35 (5), 539-542.
- Chi, K.S., Chen, L.J., 2002, Dominant diffusion species in the growth of amorphous interlayer between Yb metal thin films and crystalline Si, *Journal of Applied Physics*, 92 (2), 927-931.
- Crowell, C.R., Sze, S.M., 1966, Current transport in metal-semiconductor barriers, *Solid-State Electronics*, 9 (11-12), 1035-1048.
- Eason, R., 2007, *Pulsed Laser Deposition of Thin Films: Applications – Led Growth of Functional Materials*, Wiley-Interscience Publication.
- Grundmann, M., 2010, *The Physics of Semiconductors*, Springer Publication.
- Hamaguchi, T., Hayamizu, Y., 1991, Deep levels associated with molybdenum in silicon, *Japanese Journal of Applied Physics*, 30 (11A), L1837-L1839.
- Huang, W., Zhang, L., Gao, Y., Jin, H., 2007, Effect of a thin W, PtMo, and Zr interlayer on the thermal stability and electrical characteristics of NiSi, *Microelectronic Engineering*, 84 (4), 678-683.
- Kern, W., Puotinen, D.A., 1970, Cleaning solutions based on hydrogen peroxide for use in silicon semiconductor technology, *RCA Review*, 31, 187-206.
- Kitagawa, K., Aoki, T., Khunkhao, S., Wongprasert, Y., Titiroongruang, W., Sato, K., 2005, Optical-beam profiling by field-controlled metal-semiconductor-metal structures, *International Journal of Electronics*, 92 (10), 595-600.

- Kobayashi, K., Niemcharoen, S., Supadech, S., Yasamura, Y., Sato, K., 2002, Intrinsic and extrinsic photoresponse of Mo/n-Si/Mo structures with wide electrode gap, *Solid-State Electronics*, 46 (9), 1411-1416.
- Kolodziej, A., Pisarkiewicz, T., 1991, Amorphous hydrogenated silicon films studied by Schottky barrier method, *ACTA Physica Polonica A*, 79 (2-3), 229-234.
- Lahnor, P., Seiter, K., Schulz, M., Dorsch, W., Scholz, R., 1995, Barrier-height non-uniformities of PtSi/Si(111) Schottky diodes, *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 61, 369-375.
- Masui, T., Khunkhao, S., Kobayashi, K., Niemcharoen, S., Supadech, S., Sato, K., 2003, Photosensing properties of interdigitated metal-semiconductor-metal structures with undepleted region, *Solid-State Electronics*, 47 (8), 1385-1390.
- Miyamoto, S., 1969, Mo-Si Schottky barrier by DC plasma sputtering method, *Japanese Journal of Applied Physics*, 8 (9), 1165-1166.
- Miyamoto, S., 1977, Frequency-Conductance characteristic of the sputtered Mo-n Si Schottky barrier, *Japanese Journal of Applied Physics*, 16 (1), 101-109.
- Ohdomari, J., Tu, K.N., 1980, Parallel silicide contacts, *Journal of Applied Physics*, 51 (7), 3735-3739.
- Oversluizen, G., Lodders, W.H.M., Johnson, M.T., vanderPut, A.A., 1997, Electron-trapping-triggered anneal of defect states in silicon-rich hydrogenated amorphous silicon nitride, *Journal of Applied Physics*, 82 (1), 281-285.
- Padovani, F.A., Sumner, G.G., 1965, Experimental study of gold-gallium arsenide schottky barriers, *Journal of Applied Physics*, 36 (12), 3744-3747.
- Rhoderick, E.H., Williams, R.H., 1988, *Metal-Semiconductor Contacts*, Clarendon Publishing.
- Rockett, A., 2008, *The Materials Science of Semiconductors*, Springer Publishing.
- Schmitsdorf, R.F., Kampen, T.U., Mönch, W., 1997, Explanation of the linear correlation between barrier heights and ideality factors of real metal-semiconductor contacts by laterally nonuniform Schottky barriers, *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 15 (4), 1221-1226.
- Schmitsdorf, R.F., Mönch, W., 1999, Influence of the interface structure on the barrier height of homogeneous Pb/n-Si(111) Schottky contacts, *The European Physical Journal B*, 7, 457-466.
- Schwartz, G.C., Srikrishnan, K.V., 2006, *Handbook of Semiconductor Interconnection Technology* (2nd edition), Taylor and Francis Publishing.
- Singh, J., 2003, *Electronic and Optoelectronic Properties of Semiconductor Structures*, Cambridge University Press.
- Strelchuk, A.M., Rastegaeva, M.G., 1997, Characterization Shottky barriers occurring at the metal-6H-SiC contact based on results of studies of current-voltage characteristics, *Materials Science and Engineering B-Solid State Materials for Advanced Technology*, 46 (1-3), 379-382.
- Tung, R.T., 1991, Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers, *Applied Physics Letters*, 58 (24), 2821-2823.
- Tung, R.T., 1992, Electron transport at metal-semiconductor interfaces: general theory, *Physical Review B*, 45 (23), 13509-13523.
- Yu, P.Y., Cardona, M., 2010, *Fundamentals of semiconductores*, Springer Publication.

- Vink, T.J., Nieuwesteeg, K.J.M.B., Oversluizen, G., 1992, Tunneling through oxide interface in a Si-H Schottky diodes, *Journal of Applied Physics*, 71 (9), 4399-4404.
- Willardson, R.K., Beer, A.C., 1981. Semiconductors and Semimetals: Volume 15 Contacts, Junctions, Emitters, Academic Publishing.
- Yakimova, R., Hemmingsson, C., Macmillan, M.F., Yakimov, T., Janzen, E., 1998, Barrier height determination for n-type 4H-SiC Schottky contacts made using various metals, *Journal of Electronic Materials*, 27 (7), 871-875.
- Zhirnov, V.V., Choi, W.B., Cuomo, J.J., Hren, J.J., 1996, Diamond coated Si and Mo field emitters: diamond thickness effect, *Applied Surface Science*, 94-95, 123-128.

ÖZGEÇMİŞ

Hakan ERTAŞ 1974 yılında Erzurum’da doğdu. İlk ve orta öğrenimlerini sırasıyla Merkez Vali Hafız Paşa İlkokulu ve Şair Nef-i Ortaokulu’nda tamamladı. Lise öğrenimini Erzurum Atatürk Teknik Lisesi Elektrik bölümünde tamamladı. Yüksek öğrenimini ise 1996 yılında birinci olarak girdiği Abant İzzet Baysal Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Öğretmenliği bölümünde 2000 yılında tamamladı. 2001 yılında Atatürk Üniversitesi Refahiye Meslek Yüksek Okulu Elektrik programında Okutman olarak başladığı iş hayatına halen Atatürk Üniversitesi Erzurum Meslek Yüksekokulu Elektrik programında yine Okutman olarak devam etmektedir. Evli olup Rabia İrem, Zehra ve Zeynep adlarında üç kız çocuk babasıdır.