

**AYNI ŞARTLAR ALTINDA ÜRETİLEN ÖZDEŞ Au/n-Si (100) SCHOTTKY
DİYOTLARDA KARAKTERİSTİK PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ**

Kübra BENGİN AKGÜL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2015

Kübra BENGİN AKGÜL tarafından hazırlanan “AYNI ŞARTLAR ALTINDA ÜRETİLEN ÖZDEŞ Au/n-Si (100) SCHOTTKY DİYOTLARDA KARAKTERİSTİK PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Haluk KORALAY

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

İkinci Danışman: Doç. Dr. Nihat TUĞLUOĞLU

Türkiye Atom Enerjisi Kurumu

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Başkan: Prof. Dr. Selim ACAR

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Doç. Dr. Şükrü ÇAVDAR

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Doç. Dr. Ahmet KILIÇ

Fizik Anabilim Dalı, Ankara Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 05/ 01/ 2015

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Kübra BENGİN AKGÜL

05/ 01/ 2015

AYNI ŞARTLAR ALTINDA ÜRETİLEN ÖZDEŞ Au/n-Si (100) SCHOTTKY DİYOTLARDA KARAKTERİSTİK PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Kübra BENGİN AKGÜL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2015

ÖZET

Bu tez çalışmasında fosfor katkılı n tipi bir silisyum kristali, 380 μm kalınlıklı, (100) yüzey yönelimli ve 20 $\Omega\text{-cm}$ öz dirençli yarıiletken bir alttabaka olarak kullanıldı. Aynı şartlarda özdeş olarak 50 adet Au/n-Si/Al Schottky diyot hazırlandı ve diyotların akım-gerilim (I-V), kapasite-gerilim (C-V) ve iletkenlik-gerilim (G-V) karakteristikleri oda sıcaklığında ve karanlıkta ölçüldü. Au/n-Si/Al Schottky diyotların doyma akımı (I_0), idealite faktörü (n), engel yüksekliği (Φ_B) ve seri direnç (R_s) gibi karakteristik parametreleri doğru beslem I-V karakteristiklerinden, Termiyonik Emisyon teorisi kullanılarak belirlendi. Elde edilen n , Φ_B ve R_s (Norde metodu) değerleri sırasıyla 1,04-1,69; 0,70-0,81 eV ve 20,9-462,5 Ω aralığında değişmektedir. Ayrıca, ters beslem C^{-2} -V karakteristiklerinden elde edilen engel yükseklik ve taşıyıcı yoğunluk (N_D) değerleri sırasıyla 0,772-0,845 eV ve $1,034 \times 10^{15}$ - $1,482 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ aralığındadır. Aynı şartlarda hazırlanmasına rağmen, Au/n-Si/Al Schottky diyotları için elde edilen tüm parametrelerin bir diyottan diğerine değişimi, engel inhomojenliğine atfedildi. Bu yüzden bütün parametreler Gausyen fonksiyonuna fit edilmiştir. Bu fonksiyon yardımıyla 50 adet Schottky diyot için hesaplanan diyot parametrelerinin istatistiksel dağılımları ile ortalama değerleri ve standart sapmaları belirlenmiştir. Engel yüksekliği ve idealite faktörünün ortalama değerlerinin sırasıyla ($\bar{\Phi}_B = 0,758 \pm 0,030 \text{ eV}$) ve ($\bar{n} = 1,316 \pm 0,213$) olduğu bulundu. Diğer taraftan, ters beslem C^{-2} -V karakteristiklerinden elde edilen ortalama engel yüksekliği ve taşıyıcı yoğunluk değerlerinin sırasıyla ($\bar{\Phi}_B = 0,822 \pm 0,005 \text{ eV}$) ve ($\bar{N}_D = 1,311 \times 10^{15} \pm 1,083 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) olduğu bulundu. Bundan başka, 50 adet Au/n-Si/Al Schottky diyot için yanal homojen Schottky engel yüksekliği, deneysel olarak idealite faktörleri ve engel yükseklikleri arasındaki lineer ilişki 0,802 eV olarak belirlendi.

Bilim Kodu	: 202-1.147
Anahtar Kelimeler	: Schottky diyot, idealite faktörü, homojen engel yüksekliği, Schottky engel homojensizliği, I-V, C-V, G-V
Sayfa Adedi	: 91
Danışman	: Doç. Dr. Haluk KORALAY
İkinci Danışman	: Doç. Dr. Nihat TUĞLUOĞLU

DETERMINATION OF CHARACTERISTIC PARAMETERS IN Au/n-Si (100)
SCHOTTKY DIODES IDENTICALLY FABRICATED UNDER THE SAME
CONDITIONS

(M. Sc. Thesis)

Kübra BENGİN AKGÜL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2015

ABSTRACT

In this thesis, phosphor doped n-type Si single crystal has been used as a semiconductor substrate with a 380 μm thickness, (100) surface orientation, and 20 $\Omega\text{-cm}$ resistivity. 50 dots Au/n-Si/Al Schottky diodes have been identically prepared in the same conditions and their current-voltage (I-V), capacitance-voltage (C-V) and conductance-voltage (G-V) characteristics were measured at room temperature and in the dark. The characteristic parameters such as saturation current (I_0), ideality factor (n), barrier height (Φ_B) and series resistance (R_s) of the Au/n-Si/Al Schottky diodes were determined from the forward bias I-V characteristics by using thermionic emission theory. The obtained values of n , Φ_B and R_s (Norde method) were changed in the ranges of 1,04-1,69; 0,70-0,81 eV and 20,9-462,5 Ω , respectively. Also, the barrier height (Φ_B) and carrier concentration (N_D) values obtained from the reverse bias C^{-2} -V characteristics ranged from 0,772-0,845 eV and $1,034 \times 10^{15}$ - $1,482 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, respectively. The fact that all of the parameters for the Au/n-Si/Al Schottky diodes differ from one diode to another even if they are identically prepared were attributed to the barrier height inhomogeneity. For this reason all parameters have been fitted to Gaussian function. With the aid of this function the mean values and standart deviation of calculated diode parameters have been obtained with statistical dispersion for 50 dots Schottky diodes. The means of barrier height and ideality factor values have been found to be ($\bar{\Phi}_B = 0,758 \pm 0,030 \text{ eV}$) ve ($\bar{n} = 1,316 \pm 0,213$), respectively. Furthermore, the means of barrier height and carrier concentration values obtained from the reverse bias C^{-2} -V characteristics have been found to be ($\bar{\Phi}_B = 0,822 \pm 0,005 \text{ eV}$) and ($\bar{N}_D = 1,311 \times 10^{15} \pm 1,083 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$), respectively. Moreover, the lateral homogenous Schottky barrier height value for 50 dots of the Au/n-Si/Al Schottky diodes is determined as 0,802 eV from the experimental linear relationship between barrier heights and ideality factors.

Science Code	: 202-1.147
Key Words	: Schottky diode, ideality factor, homogeneous barrier height, Schotky barrier inhomogeneities, I-V, C-V, G-V
Page number	: 91
Supervisor	: Assoc. Prof. Dr. Haluk KORALAY
Co-Supervisor	: Assoc. Prof. Dr. Nihat TUĞLUOĞLU

TEŞEKKÜR

Tez çalışması boyunca, değerli bilgi birikimleri ve engin tecrübeleriyle yanımda olan bana rehberlik eden, her zaman hoşgörülü ve sevecen olan, beni en doğru şekilde yönlendiren girmiş olduğum bu yolda bana ışık tutan çok değerli hocalarım Doç. Dr. Haluk KORALAY ve Doç. Dr. Nihat TUĞLUOĞLU'na çok teşekkür ederim.

Laboratuvar ortamını sağlayarak malzeme yapımında bana destek olan Türkiye Atom Enerjisi Kurumu'na;

Çalışmam boyunca bilgi birikimlerini benimle paylaşarak, bana hertürlü zamanı ve imkanı sağlayan çok değerli müdürüm Erdal ÖZTAŞ'a;

Doğumumdan bu günüme, daima yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen anne ve babama;

Bana her zaman güvenen, daima cesaret veren ablama ve abime;

Akademik yaşantısını ve çalışmalarını örnek aldığım, tavsiyelerine değer verdiğim dayım Doç. Dr. Nurettin GÜLAÇTI'ya;

En içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca hayatıma girdiğinden beri her zaman yanımda olan, sevgi ve hoşgörüsünü hiç esirgemeyen, hayat tecrübeleriyle beni olgunlaştıran çok değerli eşim Kadir AKGÜL'e;

Saygı ve minnetlerimi bir borç bilirim...

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER	5
2.1. İletkenler	5
2.2. Yarıiletkenler.....	6
2.3. Yalıtkanlar.....	8
2.4. Yarıiletkenlerin Sınıflandırılması.....	9
2.4.1. Saf yarıiletkenler	9
2.1.Katkılı yarıiletkenler	12
2.5. Metal/Yarıiletken (Schottky) Kontaklar	14
2.5.1. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar	14
2.5.2. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontaklar	17
2.6. Metal/Yarıiletken Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları.....	19
2.6.1.Termoiyonik emisyon teorisi	20
2.7. Görüntü Kuvvet Etkisi (Schottky Alçalması)	22
2.8. İdeallik Faktörü	23
2.9. Seri Direnç Etkisi ve Ölçme Yöntemleri	24
2.9.1. Norde yöntemi.....	25

	Sayfa
2.9.2. Cheung yöntemi	27
2.10. Akım-Gerilim Karakteristikleri.....	28
2.11. Arayüzey Durumları.....	30
2.12. Kapasite-Gerilim Karakteristikleri.....	31
3. MATERYAL VE METOD	33
3.1. Schottky Diyotların Hazırlanması.....	33
3.1.1. Silisyum kristali temizleme işlemi.....	33
3.1.2. Au/n-Si/Al Schottky diyotların hazırlanması.....	35
3.2. Kullanılan Ölçüm Cihazları ve Düzenekleri	39
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	41
4.1. Giriş.....	41
4.2. Düz Beslem Akım-Gerilim Karakteristikleri	41
4.3. Kapasite-Gerilim ve İletkenlik-Gerilim Karakteristikleri	54
4.4. Engel Yüksekliği Homojensizliği	67
4.4.1. Akım-gerilim parametrelerinin gauss metoduyla istatistiksel analizi.....	68
4.4.2. Kapasite-iletkenlik-gerilim parametrelerinin Gauss metoduyla istatistiksel analizi.....	74
5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR	81
KAYNAKLAR	85
ÖZGEÇMİŞ	91

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Au/n-Si(100)/Al Schottky diyotlarının I-V ölçümlerinden elde edilen n , I_0 , Φ_B ve N_{ss} değerleri	47
Çizelge 4.2. Cheung metodu ile elde edilen R_s , n ve Φ_B değerleri.....	51
Çizelge 4.3. $F(V)$ fonksiyonu yardımıyla elde edilmiş Φ_B ve R_s değerleri.....	53
Çizelge 4.4. Hill-Coleman metodu ile elde edilen parametreler.....	67
Çizelge 4.5. Au/n-Si(100)/Al Schottky diyotlarının C^{-2} -V eğrilerinden elde edilen parametreler	68

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Metallerin öz direncinin sıcaklıkla değişimi.....	7
Şekil 2.2. Metallerin enerji-bant diyagramı	8
Şekil 2.3. Yarıiletkenlerin öz direncinin sıcaklıkla değişimi	9
Şekil 2.4. Bir yarıiletkenin $T=0$ K ve $T > 0$ K'de enerji-bant diyagramı	9
Şekil 2.5. Yalıtkanların enerji-bant diyagramı.....	10
Şekil 2.6. Malzemelerin toplu halde enerji-bant diyagramı.....	11
Şekil 2.7. Silisyum atomu ve kovalent bağlı valans elektronları	12
Şekil 2.8. $T=0$ K'de ve $T > 0$ K durumunda katkısız yarıiletkenin bant yapısı	13
Şekil 2.9. a) N-tipi Si yarıiletken (Antimon, Sb katkılı) b) Verici atom enerji seviyesi.....	14
Şekil 2.10. a) P-tipi Si yarıiletken (Bor katkılı) b) Alıcı atom enerji seviyesi.....	15
Şekil 2.11. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji-bant diyagramı: a) Kontakтан önceki b) Kontakтан sonraki durumları.....	17
Şekil 2.12. a) Metal/yarıiletken kontak şeması b) Termal denge durumu taşıyıcı akışı c) Düz beslem durumu taşıyıcı akışı d) Ters beslem durumu taşıyıcı akışı.....	19
Şekil 2.13. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontağın enerji-bant diyagramı: a) Kontakтан önceki b) Kontakтан sonraki durumları.....	20
Şekil 2.14. Ters ve düz beslem durumlarında omik kontağın enerji-bant diyagramları: a) $V < 0$ durumu b) $V > 0$ durumu	21
Şekil 2.15. Schottky ve omik kontak akım-gerilim karakteristiği	21
Şekil 2.16. Bir metal/n-Si eklem yapısında akım iletim mekanizmalarının şematik gösterimi	22
Şekil 2.17. Schottky etkisinin varlığında, metal n-tipi yarıiletken kontağının enerji-bant gösterimi	25
Şekil 2.18. Akım-iletim mekanizmaları için $nkT/q - kT/q$ eğrileri	27

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. Tüm Au/n-Si (100)/Al Schottky diyotlarının düz beslem I-V karakteristikleri: a) 1'den 25 nolu numuneye kadar b) 26'dan 50 nolu numuneye kadar	45
Şekil 4.2. Tüm Au/n-Si (100)/Al Schottky diyotlarının yarı logaritmik düz beslem I-V karakteristikleri: a) 1'den 25 nolu numuneye kadar b) 26'dan 50 nolu numuneye kadar	46
Şekil 4.3. 50 adet Au/n-Si(100)/Al Schottky diyot için idealite faktörünün fonksiyonu olarak engel yüksekliğinin eğrisi	47
Şekil 4.4. Tüm Au/n-Si(100)/Al Schottky diyotlarının $dV/d(\ln I)$ -I eğrileri: a) 1'den 25 nolu numuneye kadar b) 26'dan 50 nolu numuneye kadar	49
Şekil 4.5. Tüm Au/n-Si(100)/Al Schottky diyotlarının $H(I)$ -I eğrileri: a) 1'den 25 nolu numuneye kadar b) 26'dan 50 nolu numuneye kadar	50
Şekil 4.6. Tüm Au/n-Si(100)/Al Schottky diyotlarının $F(V)$ -V eğrileri: a) 1'den 25 nolu numuneye kadar b) 26'dan 50 nolu numuneye kadar	52
Şekil 4.7. Metal/yarıiletken kontaklarda arayüzey durumlarının yeri	54
Şekil 4.8. Düz beslem I-V eğrileri kullanılarak elde edilmiş arayüzey durum yoğunluklarının enerjiye bağlı dağılımları; a) 1'den 25 nolu numuneye kadar b) 26'dan 50 nolu numuneye kadar	55
Şekil 4.9. Tüm Au/n-Si(100)/Al Schottky diyotlarının C-V eğrileri: a) 1'den 25 nolu numuneye kadar b) 26'dan 50 nolu numuneye kadar	56
Şekil 4.10. Tüm Au/n-Si(100)/Al Schottky diyotlarının G-V eğrileri: a) 1'den 25 nolu numuneye kadar b) 26'dan 50 nolu numuneye kadar	57
Şekil 4.11. Tüm Au/n-Si(100)/Al Schottky diyotlarının uygulanan gerilime bağlı seri direnç eğrileri: a) 1'den 25 nolu numuneye kadar b) 26'dan 50 nolu numuneye kadar	59
Şekil 4.12. Seri direnç etkisi dikkate alınarak düzeltilmiş kapasite-gerilim eğrileri: a) 1'den 25 nolu numuneye kadar b) 26'dan 50 nolu numuneye kadar	61
Şekil 4.13. Seri direnç etkisi dikkate alınarak düzeltilmiş kapasite-gerilim eğrileri: a) 1'den 25 nolu numuneye kadar b) 26'dan 50 nolu numuneye kadar	62

Şekil	Sayfa
Şekil 4.14. Tüm Au/n-Si(100)/Al Schottky diyotlarının $C^{-2} - V$ eğrileri: a) 1'den 25 nolu numuneye kadar b) 26'dan 50 nolu numuneye kadar	65
Şekil 4.15. Bariyer yüksekliğinin görünümü a) İki boyutlu b) Üç boyutlu homojen c) Üç boyutlu homojen olmayan durum.....	69
Şekil 4.16. 50 adet Schottky diyot için I-V ölçümlerinden elde edilen parametrelerin istatistiksel dağılımları: a) I_0 için Gaussian dağılımı b) n için Gaussian dağılımı ve c) Φ_B için Gaussian dağılımı	71
Şekil 4.17. 50 adet Schottky diyot için Cheung'in $dV/d(LnI) - I$ grafiğinden elde edilen a) İdeallik faktörlerinin b) Seri dirençlerinin istatistiksel dağılımları	73
Şekil 4.18. 50 adet Schottky diyot için Cheung'in $H(I) - I$ grafiğinden elde edilen a) Engel yüksekliklerinin b) Seri dirençlerinin istatistiksel dağılımları	74
Şekil 4.19. 50 adet Schottky diyot için Norde'un $F(V) - V$ grafiğinden elde edilen a) Engel yüksekliklerinin b) Seri dirençlerinin istatistiksel dağılımları	75
Şekil 4.20. 50 adet Au/n-Si/Al Schottky diyot için I-V ölçümleri yardımıyla elde edilmiş arayüzey durum yoğunluklarının istatistiksel dağılımı	76
Şekil 4.21. 50 adet Schottky diyot için $1/C^2 - V$ eğrileri kullanılarak elde edilmiş difüzyon potansiyeli değerlerinin istatistiksel dağılım grafiği	77
Şekil 4.22. 50 adet Schottky diyot için elde edilmiş donör taşıyıcı yoğunluğu değerlerinin istatistiksel dağılım grafiği.....	77
Şekil 4.23. 50 adet Schottky diyot için elde edilmiş fermi enerjisi değerlerinin istatistiksel dağılım grafiği.....	78
Şekil 4.24. 50 adet Schottky diyot için elde edilmiş tüketme tabakası genişliği değerlerinin istatistiksel dağılım grafiği.....	78
Şekil 4.25. 50 adet Schottky diyot için elde edilmiş Schottky engel alçalması değerlerinin istatistiksel dağılım grafiği.....	79
Şekil 4.26. 50 adet Schottky diyot için elde edilmiş Schottky engel yüksekliği değerlerinin istatistiksel dağılım grafiği.....	80
Şekil 4.27. 50 adet Schottky diyot için elde edilmiş arayüzey tabaka kalınlığı değerlerinin istatistiksel dağılım grafiği.....	80
Şekil 4.28. 50 adet Schottky diyot için elde edilmiş seri direnç değerlerinin istatistiksel dağılım grafiği	81

Şekil**Sayfa**

Şekil 4.29. 50 adet Schottky diyot için elde edilmiş arayüzey durum yoğunlukları değerlerinin istatistiksel dağılım grafiği.....	82
--	----

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Fosfor katkılı n-tipi silisyum kristali	36
Resim 3.2. Beher Bandelin Sonorex marka ultrasonik banyo	36
Resim 3.3. “Innovation Water Purification” marka deiyonize su sistemi	36
Resim 3.4. Kristal temizliği aşamasında kullanılan ısıtıcı düzeneği	37
Resim 3.5. Au/n-Si/Al Schottky diyotların hazırlanması için kullanılan “Edwards” marka buharlaştırma sistemi.....	38
Resim 3.6. Omik kontağın oluşturulması için kullanılan metal maske	39
Resim 3.7. Numune tutucu içerisine maske ile yerleştirilmiş silisyum kristali	39
Resim 3.8. Buharlaştırma işleminde kullanılan tungsten pota.....	39
Resim 3.9. “Edwards FTM6” marka kalınlık ölçer	40
Resim 3.10. Omik kontak oluşumunda kullanılan tungsten levhalar	40
Resim 3.11. Doğrultucu kontak oluşumunda kullanılan metal maske.....	41
Resim 3.12. Çeyrek silisyum alttabaka üzerinde oluşturulan Au/n-Si/Al Schottky yapılarının görüntüsü.....	41
Resim 3.13. Oluşturulan Au/n-Si/Al Schottky yapılarının şematik diyagramı	41
Resim 3.14. Bilgisayar kontrollü HP Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer (soldaki) ve Keithley 2400 Source Meter (sağdaki) cihazları.....	42

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
As	Arsenik
A*	Richardson sabiti
ac	Alternatif sinyal
C_{HF}	Yüksek frekans kapasitesi
C_{LF}	Düşük frekans kapasitesi
C_{ox}	Oksit kapasitesi
C₂	Taşıyıcı yoğunluğuna bağlı parametre
C_{m,acc}	Biriktirme bölgesindeki ölçülen kapasite
C_{m,max}	Maksimum kapasite
C_m	Ölçüm kapasitesi
C_c	Düzeltilmiş kapasite
D_n	Elektron difüzyon sabiti
d_{ox}	Oksit tabakası kalınlığı
D_{it}	Arayüzey durum yoğunlukları
dV/d(LnI)	Birinci Cheung fonksiyonu
E_c	İletkenlik bandının enerji seviyesi
E_v	Değerlik bandının enerji seviyesi
E_g	Yasak enerji bant aralığı
E_F	Fermi enerji seviyesi
E_i	Gerçek enerji seviyesi
E_d	Verici atom için izin verilen enerji seviyesi
E_a	Alıcı atom için izin verilen enerji seviyesi
E	Metalden elektron sökmek için gerekli enerji
E_{Fyi}	Yarıiletkenin Fermi seviyesi
E(x)	Schottky bölgesindeki elektrik alanı
E_{ss}	Arayüzey durumlarının enerji seviyesi
E_m	Maksimum elektrik alan
F(V)	Norde fonksiyonu

Simgeler**Açıklamalar** **$F(V_0)$**

Minimum Norde fonksiyonu

GaAs

Galyum arsenit

GaP

Galyum fosfor

 $G_{m,acc}$

Biriktirme bölgesindeki ölçülen iletkenlik

 G_m

Ölçüm iletkenliği

 G_c

Düzeltilmiş iletkenlik

 $G_{m,max}$

Maksimum iletkenlik

 h

Planck sabiti

 $H(I)$

İkinci Cheung fonksiyonu

 H_2O_2

Hidrojen peroksit

HF

Hidroflorik asit

InP

İndiyum fosfor

 I

Taşıyıcıların oluşturduğu toplam akım

 I_0

Doyma akımı

 J

Akım yoğunluğu

 J_n

Doyma akımı yoğunluğu

 k

Boltzman sabiti

 m_e^*

Elektronların etkin kütlesi

 m_h^*

Deşiklerin etkin kütlesi

 m^*

Taşıyıcıların etkin kütlesi

 N_A

Alıcı yoğunluğu

 N_{AT}

Teorik taşıyıcı yoğunluğu

 N_{AD}

Deneysel taşıyıcı yoğunluğu

 N_C

İletkenlik bandı etkin durum yoğunluğu

 N_D

Verici yoğunluğu

 N_v

Değerlik bandındaki etkin durum yoğunluğu

 N_{ss}

Arayüzey durumları

 NH_4OH

Amonyum hidroksit

 n_i

Gerçek taşıyıcı yoğunluğu

 n

İdeallik faktörü

 p

Deşiklerin etkin yoğunluğu

 $P(\Phi_B)$

Engel yüksekliği olasılığı

Simgeler	Açıklamalar
P	Fosfor
R_s	Seri direnç
Si	Silisyum
T	Kelvin cinsinden sıcaklık
V_d	Difüzyon potansiyeli
V_F	Düz beslem
V_R	Ters beslem
V₀	Norde fonsiyonu için minimum voltaj
V_i	Arayüzey potansiyeli
W_D	Tüketme bölgesinin genişliği
w	Açısal frekans
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
Φ_B	Engel yüksekliği
Φ_e	Etkin engel yüksekliği
Φ_B	Ortalama engel yüksekliği
ΔΦ_B	Schottky alçalması
q	Elektronik yük
Q_m	Metal üzerindeki yüzey yükü
Q_{ss}	Yarıiletken üzerindeki yüzey yükü
Q_{sc}	Yarıiletkenin tüketme tabakasındaki uzay yükü
qΨ(x)	Elektron potansiyel enerjisi
qΦ(x)	Yarım-Fermi seviyesi
qΦ₀	Yüzey enerjisi Fermi seviyesi
qΦ_{B0}	Sıfır beslem engel yüksekliği
qΦ₀	Yüzeydeki enerji seviyesi
ε_s	Yarıiletkenin elektrik geçirgenliği
ε₀	Boşluğun elektriksel geçirgenliği
ε_i	Oksit tabakasının elektriksel geçirgenliği
ε_{0x}	Oksit tabakasının dielektrik sabiti
χ	Elektron yatkınlığı

Simgeler**Açıklamalar** v_x

Elektronların hızı

 μ

Elektron mobilitesi

 δ

Arayüzey tabakasının kalınlığı

 γ

Norde fonksiyonu için bir tam sayı

 Ψ_s

Yüzey potansiyeli

 Γ

Etkin engel yüksekliği gerilim katsayısı

 ρ

Özdirenç

 σ

Standart sapma

 $1/\sigma_s\sqrt{2\pi}$

Normalizasyon sabiti

Kısaltmalar**Açıklamalar****AE**

Alan Emisyonu

AC/DC

Analog-Sayısal çevirici

C-V

Kapasite-Gerilim

D

Difüzyon

G-V

İletkenlik-Gerilim

I-V

Akım-Gerilim

RCA

Radio Corporation of America

TAE

Termoionik Alan Emisyonu

TE

Termoionik Emisyon

TED

Termoionik Emisyon-Difüzyon

 $1/C^2$ -V

Ters kapasite-Gerilim

1. GİRİŞ

Metal ile yarıiletkenin kontak haline getirilmesiyle oluşan Schottky yapılar, yarıiletken tabanlı elektronik ve optoelektronik cihazların vazgeçilmez parçasıdır [1-18]. Bu yüzden 1874 yılında Braun [1]'un ilk çalışmasından günümüze kadar bu yapıların performans ve güvenilirliğinden dolayı yoğun çalışmalar yapılmıştır. Schottky yapılar düşük güç kaybı ve çoğunluk taşıyıcı akım akışıyla birleşen yüksek anahtarlama hızı gibi özelliklere sahip olmasından dolayı geniş kullanım alanlarına sahiptir [19].

Schottky yapıların en temel parametreleri olan engel yüksekliği (Φ_B) ve idealite faktörünü (n) belirlemede genellikle termiyonik emisyon (TE) teoremi kullanılmaktadır. TE teorisi homojen olan kontak yapılarını iyi açıklayabilmektedir. Farklı yapılarda üretilen Schottky diyotların analizlerinde TE teorisine göre ideallikten sapmalar gözlenmiştir. Engel yüksekliğinin oluşumunda metal-yarıiletken ara yüzeyinin yerel özellikleri sorumlu mekanizmadır. Yarıiletken yüzeyinin kimyasal temizleme, biriktirilen metal kontaklar ve diğer istenmeyen durumlara maruz kalmasından dolayı beklenenden farklı Schottky engel yükseklikleri elde edilebilir [20,21]. Ayrıca, idealite faktörünün de 1'den büyük olmasının nedeni arayüzey durumları ve tüketme bölgesinde oluşan akımlar (tekrardan birleşme ve oluşum akımları) [10], görüntü yük etkisi [22] ve ara yüzeyde oluşan homojensizlikler [20,23] ile açıklanabilmektedir.

Schottky diyotların arayüzey özelliklerinin bilinmesi, devre elemanlarının üretiminde oldukça önemlidir. TE teoreminden gözlenen ideallikten sapmalar Schottky engelin homojen olmayışına atfedilmiştir. Son yıllarda engelin homojen olmayışını tanımlama üzerine yoğun bir şekilde teorik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda aynı şartlar altında hazırlanmış Schottky diyotlarda engel yüksekliği ile idealite faktörü değerlerinin diyottan diyota değiştiği gözlenmiştir. Tung ve diğerleri [24,25] engelin homojensizliği arttıkça, idealite faktörü arttığını ve engel yüksekliğinin azaldığını teorik olarak belirlemişlerdir. Mönch ve diğerleri [26,27] idealite faktörü ile engel yüksekliği arasındaki lineer ilişkiyi deneysel olarak ispatlamışlardır. Bu çalışmalarda ayrıca yanal homojen engel yüksekliği değerleri de belirlenmiştir. Benzer çalışmalar farklı yarıiletken alttabakalarda aynı şartlarda hazırlanan diyotlarda da gözlenmiştir [28-42].

Mönch ve Schmitsdorf [29], aynı şartlar altında 68 adet Pb/n-Si Schottky diyet hazırlamışlardır. I-V ve C-V ölçümlerinden sırasıyla idealite faktörü - engel yüksekliği ve taşıyıcı konsantrasyonu – engel yüksekliği değerlerini rapor etmişlerdir. Hesaplanan parametrelerin geniş bir aralıkta dağılım göstermesi sebebiyle Gausyen fonksiyonu yardımıyla istatistiksel dağılımı kullanarak parametrelerin ortalama değerlerini belirlemişlerdir.

Nuhoğlu ve diğerleri [30], aynı şartlar altında 70 adet Pb/p-Si Schottky diyet hazırlamışlardır. I-V ölçümlerinden termiyonik teorisini kullanarak idealite faktörü değerlerini 1.054-1.191 ve engel yüksekliği değerlerini 0,686-0,735 eV aralığında hesaplamışlardır. Hazırlamış oldukları diyetlerde idealite faktörü ile engel yüksekliği arasındaki lineer ilişkiyi tespit etmişlerdir.

Sağlam ve diğerleri [31], aynı şartlar altında 24 adet Au/n-Si/AuSb Schottky diyet hazırlamışlardır. I-V ölçümlerinden termiyonik teorisini kullanarak idealite faktörü değerlerinin 1,051-1,179 ve engel yüksekliği değerlerinin 0,789-0,819 eV arasında olduğunu ve ters belsem C^{-2} -V ölçümlerinden engel yüksekliği değerlerinin 0,801-0,851 eV arasında olduğunu bulmuşlardır. I-V ve C^{-2} -V ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliği değerlerinin Gausyen fonksiyonuna fit edilmesiyle ortalama engel yüksekliklerini sırasıyla 0,809 eV ve 0,808 eV olarak hesaplamışlardır. Bununla birlikte, engel yüksekliğinin idealite faktörüne karşı çizilen lineer grafiğin ekstrapole edilmesinden yanal homojen engel yüksekliğini 0,834 eV olarak bulmuşlardır.

Çetin ve diğerleri [32], aynı şartlar altında 70 adet Ti/p-Si Schottky diyet hazırlamışlardır. I-V ölçümlerinden termiyonik teorisini kullanarak idealite faktörü değerlerini 1,087-1,240 ve engel yüksekliği değerlerini 0,584-0,761 eV aralığında belirlemişlerdir. Engel yüksekliği ile idealite faktörü arasındaki lineer ilişkinin varlığını tespit etmişlerdir.

Güllü ve diğerleri [33], aynı şartlar altında 26 adet safranine T/p-Si Schottky diyet hazırlamışlardır. I-V ölçümlerinden ortalama idealite faktörü değerini $1,80 \pm 0,20$ ve ortalama engel yüksekliği değerini $0,59 \pm 0,02$ eV olarak hesaplamışlardır. C-V ölçümlerinden ortalama taşıyıcı konsantrasyonu değerini $(6,96 \pm 0,37 \times 10^{14})$ engel yüksekliği değerini $(0,67 \pm 0,10$ eV) olarak belirlemişlerdir.

Aksu [34] aynı şartlarda özdeş olarak 23 adet FeCrNiC/n-GaAs Schottky diyot hazırlamıştır. Diyotun I-V ve C-V ölçümleri oda sıcaklığında ve karanlıkta alınmıştır. engel yüksekliği değerlerinin 0,790-0,805 eV İdealite faktörü değerlerinin 1,000-1,016 ve arasında olduğunu ve ters belsem C^{-2} -V ölçümlerinden engel yüksekliği değerlerinin 0,848-0,925 eV arasında olduğunu bulmuşlardır. Hesaplanan değerlerin Gausyen fonksiyonuna fit edilmesiyle ortalama idealite faktörü ve engel yüksekliği değerini sırasıyla $1,007 \pm 0,004$ ve $0,800 \pm 0,02$ eV olarak hesaplamışlardır. Bununla birlikte, engel yüksekliğinin idealite faktörüne karşı çizilen lineer grafiğin ekstrapole edilmesinden yanal homojen engel yüksekliğini 0,863 eV olarak rapor etmişlerdir.

Güzeldir ve diğerleri [35] aynı şartlar altında 28 adet Cd/CdS/n-Si/Au-Sb Schottky diyot hazırlamışlardır. I-V ölçümlerinden termiyonik teorisini kullanarak idealite faktörü değerlerinin 1,190-1,400 ve engel yüksekliği değerlerinin 0,664-0,710 eV arasında olduğunu ve ters belsem C^{-2} -V ölçümlerinden engel yüksekliği değerlerinin 0,720-0,865 eV arasında olduğunu bulmuşlardır. Hesaplanan değerlerin Gausyen fonksiyonuna fit edilmesiyle C-V ölçümlerinden ortalama taşıyıcı konsantrasyonu değerini $8,55 \pm 1,62 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ engel yüksekliği değerini $0,759 \pm 0,02$ eV olarak belirlemişlerdir. I-V'den ortalama idealite faktörü ve engel yüksekliği değerini sırasıyla $1,007 \pm 0,004$ ve $0,800 \pm 0,02$ eV olarak hesaplamışlardır.

Boyarbay ve diğerleri [36] aynı şartlar altında 30 adet Sn/p-Si/Al Schottky diyot hazırlamışlardır. I-V ölçümlerinden termiyonik teorisini kullanarak engel yüksekliği değerlerinin 0,729-0,749 eV ve idealite faktörü değerlerinin 1,083-1,119 arasında olduğunu rapor etmişlerdir. Hesaplanan değerlerin Gausyen fonksiyonuna fit edilmesiyle ortalama engel yüksekliği ve idealite faktörü değerini sırasıyla $0,739 \pm 0,003$ eV ve $1,099 \pm 0,009$ olarak hesaplamışlardır. Bununla birlikte, yanal homojen engel yüksekliğini 0,770 eV olarak rapor etmişlerdir.

Güler ve diğerleri [37] aynı şartlar altında 21 adet Ni/n-Si/Au-Sb Schottky diyot hazırlamışlardır. I-V ölçümlerinden termiyonik teorisini kullanarak engel yüksekliği değerlerinin 0,58-0,70 eV ve idealite faktörü değerlerinin 1,10-1,66 arasında olduğunu belirlemişlerdir. Yanal homojen engel yüksekliğini 0,69 eV olarak rapor etmişlerdir. Hesaplanan değerlerin Gausyen fonksiyonuna fit edilmesiyle ortalama engel yüksekliği ve idealite faktörü değerini sırasıyla $0,63 \pm 0,03$ eV ve $1,33 \pm 0,18$ olarak hesaplamışlardır.

Asubay ve diğerkleri [38] aynı şartlar altında 31 adet Au/n-InP/Zn-Au Schottky diyet hazırlamışlardır. I-V ölçümlerinden engel yüksekliğı değerklerinin 0,58-0,72 eV ve idealite faktörü değerklerinin 1,14-1,47 arasında olduğunu belirlemişlerdir. Yanal homojen engel yüksekliğini 0,72 eV olarak rapor etmişlerdir.

Chawanda ve diğerkleri [39] aynı şartlar altında 24 adet Pd/n-Ge Schottky diyet hazırlamışlardır. I-V ölçümlerinden engel yüksekliğı değerklerinin 0,492-0,550 eV ve idealite faktörü değerklerinin 1,14-1,95 arasında olduğunu belirlemişlerdir. Yanal homojen engel yüksekliğini 0,558 eV olarak rapor etmişlerdir. I-V ve C-V ölçümlerinden hesaplanan engel yükseklik değerkleri Gausyen fonksiyonuna fit edilmesiyle ortalama değerkleri sırasıyla $0,529 \pm 0,019$ eV ve $0,463 \pm 0,023$ eV olarak belirlenmişlerdir.

Bu çalışmada kullanılan CZ (Czochralski) tekniğı ile büyütölmüş fosfor katkılı n tipi silisyum kristali, (100) düzleminde kesilmiş, 20 Ω -cm öz dirençli ve 380 μ m kalınlıklığa sahiptir. n-Si yüzeyinde aynı şartlarda termal buharlaştırma tekniğı ile vakum ortamında 50 adet özdeş Au/n-Si/Al Schottky diyetu hazırlanmıştır. Üretilen diyetlerin karakteristik parametrelerini hesaplamak için akım-gerilim (I-V), kapasite-gerilim (C-V) ve iletkenlik-gerilim (G-V) ölçümleri oda sıcaklığında (300 K) ve karanlıkta alınmıştır. Bu ölçümler yardımıyla idealite faktörü (n), Schottky engel yüksekliğı (Φ_B), seri direnç (R_s), arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}), taşıyıcı yoğunluğu (N_A veya N_D), tüketme tabaka genişliğı (W_D), Schottky engel alçalması ($\Delta\Phi_B$), fermi enerjisi (E_F) ve difüzyon potansiyeli (V_D) gibi diyet parametreleri belirlenmiştir.

Schottky diyetler aynı şartlarda hazırlanmış olsa bile hesaplanan her bir parametrenin diyetten diyeta farklı değerklere sahip olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebinin Schottky kontaklarda oluşan engelin homojen olmayışı ile açıklanmıştır. Hesaplanan her bir parametrenin Gausyen analizi istatistiksel olarak yapılmış ve ortalama değerkleri belirlenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

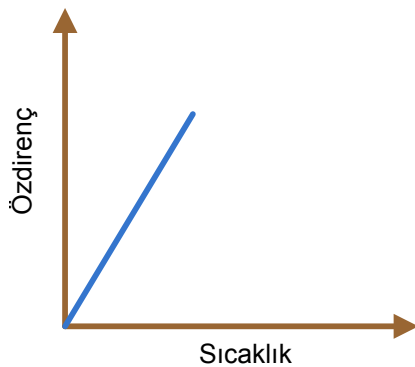
Hayatımızın her alanında kullandığımız malzemeler iletkenliklerine göre; iletkenler (metaller), yarıiletkenler ve yalıtkanlar olmak üzere sınıflandırılırlar. Malzemenin iletkenliğini, örgü yapılarındaki parçacık yoğunluğu ve bunların katı içerisindeki hareket kabiliyetleri belirler [43].

2.1. İletkenler

İletken malzemelerde akım, elektronik geçişli ve iyonik geçişli olmak üzere iki şekilde sağlanır. Elektronik geçişli iletkenlerde akım elektronlar tarafından, iyonik geçişli iletkenlerde ise malzeme iyonları tarafından iletilir. Elektrolitler iyonik geçişli iletkenler grubuna girmektedir [43].

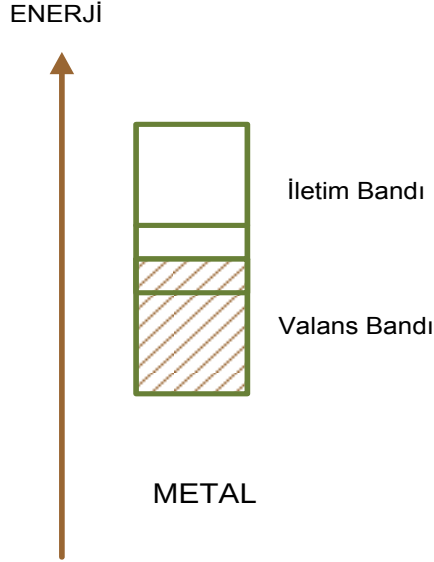
Metallerin iyi veya kötü iletken olmaları son yörüngelerinde bulunan elektron sayılarına göre belirlenir. Atomlarının son yörüngelerinde bir elektronu olan metaller iyi, iki ve üç elektronu olan metaller ise kötü iletken grubuna girer. Altın, gümüş ve bakır iyi iletken sınıfına girerler. Metallerin iletkenlikleri (G) yüksek, dirençleri düşüktür ($G=1/R$).

İletken malzemelerin öz dirençleri sıcaklıkla doğru orantılı olarak değişmektedir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Metallerin öz direncinin sıcaklıkla değişimi

Malzemelerin iletkenlikleri arasındaki fark, enerji-bant diyagramları incelendiğinde daha iyi açıklanabilecektir. Metallerin enerji band diyagramını incelediğimizde iletim ve valans bantlarının iç içe olduğunu görürüz (Şekil 2.2).



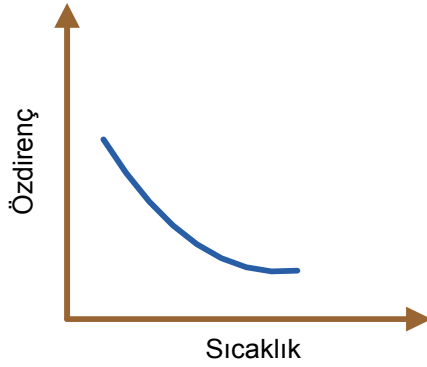
Şekil 2.2. Metallerin enerji-bant diyagramı

2.2. Yarıiletkenler

İletkenlikleri metallere oranla düşüktür. Dış etki (ısı, ışık, gerilim) sayesinde bir miktar valans elektronları serbest hale geçerek iletkenlik özelliği kazanırlar. Ayrıca çok az miktarda katkı atomlarının eklenmesiyle de iletkenlikleri değişir. Yarıiletkenlerin öz dirençleri sıcaklıkla üstel olarak azalır (Şekil 2.3). Katkısız bir yarıiletkende öz direncin (ρ) sıcaklığa bağlı ifadesi;

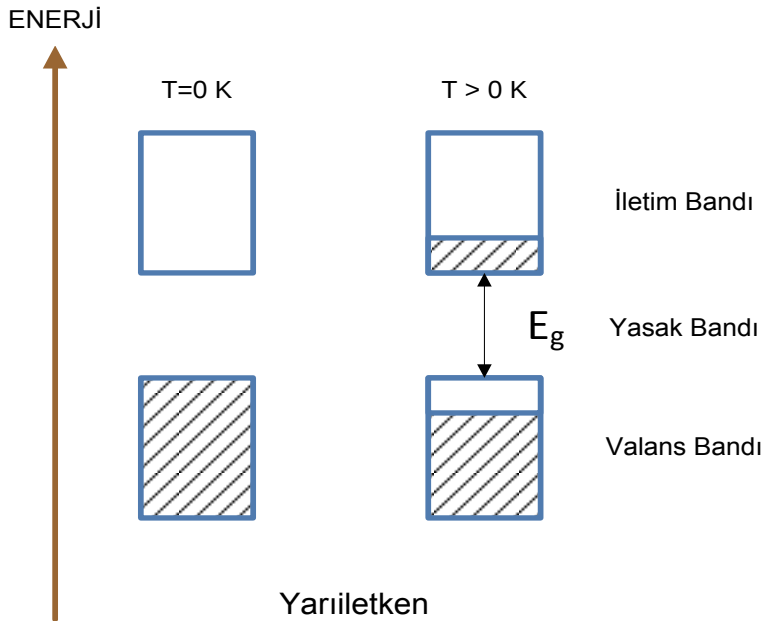
$$\rho = A \exp(E_g/kT) \quad (2.1)$$

şeklinde dir. Şekil 2.4’de yarıiletkenin iletkenlik ve değerlik bantlarından oluşan enerji bant diyagramı görülmektedir. Değerlik bandının maksimum enerjisi E_v , iletkenlik bandının minimum enerjisi E_c ve bu iki parametrenin arasındaki bölge olan E_g ise enerji bant aralığı olarak isimlendirilir.



Şekil 2.3. Yarıiletkenlerin özdirencinin sıcaklıkla değişimi

Saf bir yarıiletken için fermi enerji seviyesi (E_F) enerji bant aralığının ortasında kabul edilir. Sıfır derece kelvinde değerlik bandı elektronlarla tamamen dolu, iletkenlik bandı ise tamamen boştur (Şekil 2.4). Yalıtkanlarda da durum aynıdır. Metal malzemelerde ise Fermi seviyesi enerji bantlarından birinin içerisinde bulunur.

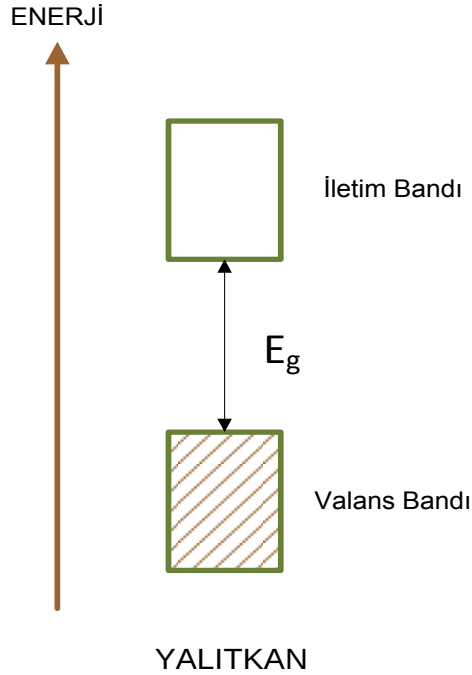


Şekil 2.4. Bir yarıiletkenin $T=0\text{ K}$ ve $T>0\text{ K}$ 'de enerji-bant diyagramı

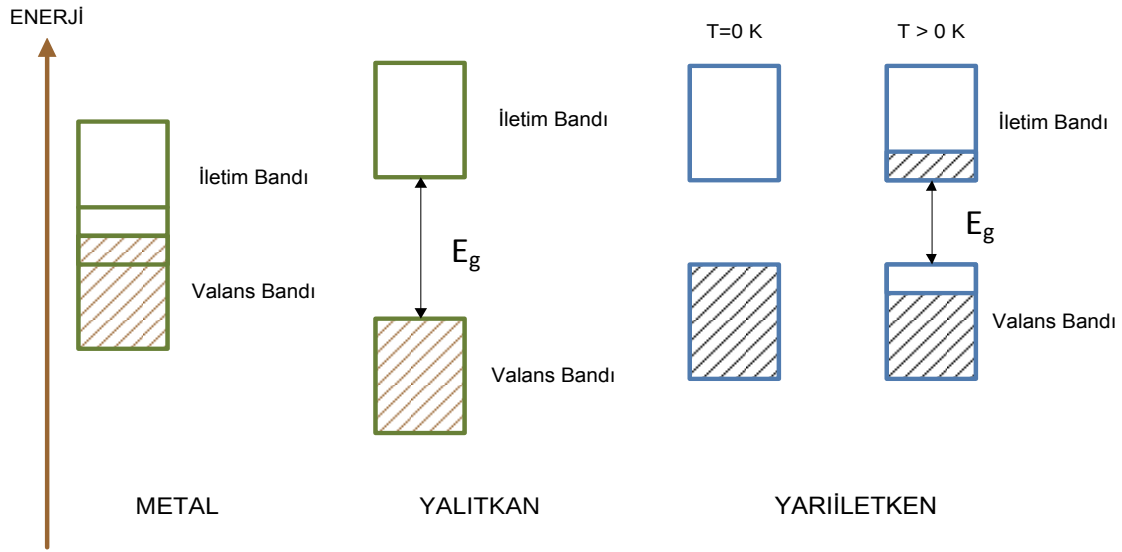
Bir yarıiletken ile yalıtkan arasındaki fark bant aralığına dayanır. Yarıiletkende bant aralığı 2 eV'dan küçüktür. Bu yüzden oda sıcaklığındaki termal enerji ve görünür bölge fotonları yarıiletkenin değerlik bandındaki elektronları uyararak iletkenlik bandına doğru atlamasına sebep olabilir. En çok kullanılan yarıiletkenlerin bant aralıkları: 1,12 eV (silisyum), 0,67 eV (germanyum) 1,42 eV (galyumarsenit) şeklindedir.

2.3. Yalıtkanlar

Yalıtkan malzemelerin elektronları atomlarına sıkı sıkıya bağlı olduğu için, elektron alıp verme gibi istekleri yoktur. Bu nedenle yalıtkan malzemeler elektrik akımını iletmezler. Cam, mika, kağıt, kauçuk, lastik ve plastik gibi maddeler örnek olarak gösterilebilir. Yalıtkan maddeler iletken maddelerin yalıtımında kullanılır. Bu malzemelerde oda sıcaklığındaki termal enerji, değerlik bandındaki bir elektronu iletkenlik bandına atlatamaz. Enerji bantları tamamen dolu veya tamamen boştur (Şekil 2.5). Metallerdeki enerji diyagramına kıyasla yalıtkanlarda, iletim ve valans bandı birbirinden ayrılmış ve aralarında elektronların bulunmadığı yasak bölge oluşmuştur. Yalıtkanların yasak enerji bant aralığı (5,47 eV – 9,0 eV) arasındadır (Şekil 2.6).



Şekil 2.5. Yalıtkanların enerji-bant diyagramı



Şekil 2.6. Malzemelerin toplu halde enerji-bant diyagramı

2.4. Yarıiletkenlerin Sınıflandırılması

Yarıiletken malzemelerin, saf yarı iletkenler ve katkılı yarıiletkenler olmak üzere iki kategoride incelenmesi mümkündür.

2.4.1. Saf yarıiletkenler

Katkısız yarıiletkenlerde akım, o yarıiletkeni oluşturan atomların elektronları ve deşikleri tarafından sağlanır [43]. Çeşitli yöntemlerle dış etki altında kalan elektronlar, yeterli termal enerjiyi kazanarak değerlik bandından iletkenlik bandına doğru atlama yapar. Atlama yapan her elektron arkasında bir boşluk (deşik) bırakır. Böylece değerlik bandındaki her boşluk, iletkenlik bandındaki bir elektrona karşılık geleceğinden, değerlik bandındaki boşluk sayısı iletkenlik bandındaki elektron sayısına eşittir [43].

$$p = n = n_i \quad (2.2)$$

Şeklinde gösterilir. Burada n_i , gerçek taşıyıcı yoğunluğudur. Bir yarıiletkende denge durumunda, elektron ve deşik yoğunluklarının çarpımı,

$$np = N_c \exp \left[-\frac{E_c - E_F}{kT} \right] N_v \exp \left[-\frac{E_F - E_v}{kT} \right] = N_c N_v \exp \left(-\frac{E_g}{kT} \right)$$

$$= 32 \left(\frac{\pi^2 k^2 m_e^* m_h^*}{h^4} \right)^{3/2} T^3 \exp \left(-\frac{E_g}{kT} \right) = n_i^2 \quad (2.3)$$

İfadesini verir. Denge durumunda,

$$pn = n_i^2 \quad (2.4)$$

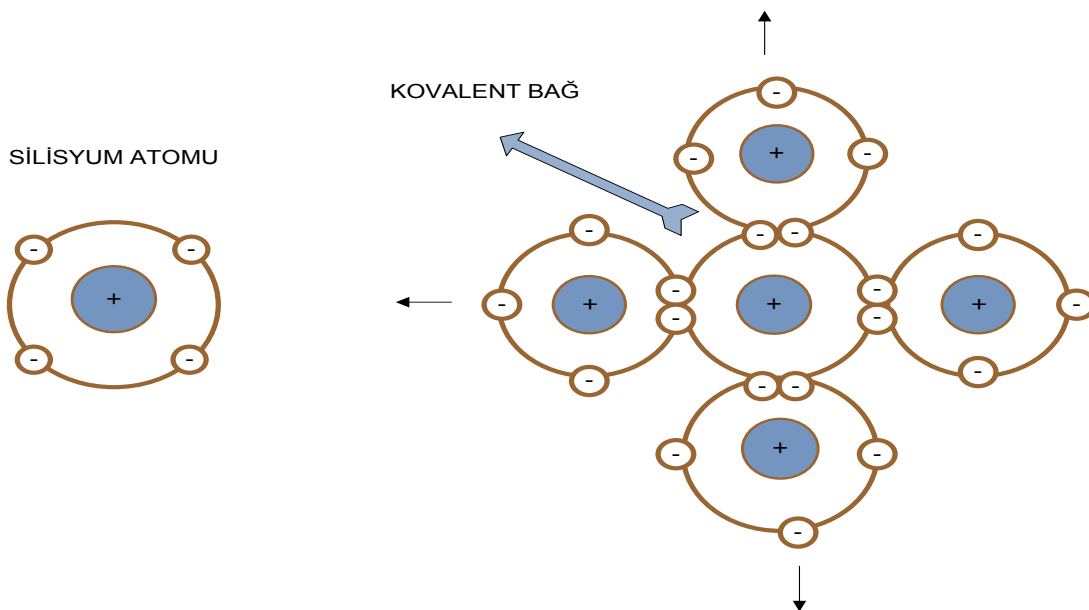
İfadesi elde edilir. Gerçek bir yarıiletkende Fermi enerji seviyesi [9],

$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{3}{4} kT \ln \left(\frac{m_h^*}{m_e^*} \right) = E_i \quad (2.5)$$

Şeklindedir. Eğer $m_e^* = m_h^*$ alınırsa Eş. 2.5

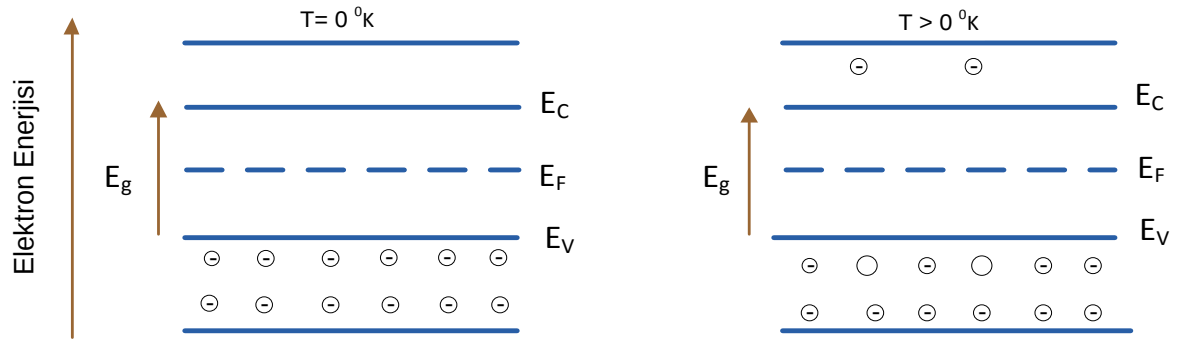
$$E_i = \frac{E_c + E_v}{2} \quad (2.6)$$

Olur. Burada E_i saf yarıiletkenin fermi enerji seviyesidir. Periyodik cetvelin 4A grubunda bulunan Si ve Ge elementleri katkısız yarıiletkenlerdir. Şekil 2.7’de Si atomunun bağ yapısı görülmektedir. Si atomunun son yörüngesinde dört elektron olduğundan bu elektronlar dört kovalent bağ yapabilmektedir.



Şekil 2.7. Silisyum atomu ve kovalent bağlı valans elektronları [44]

Katkısız yarıiletkenlerde fermi enerji seviyesinin enerji bant aralığının ortasında olduğu kabul edilir. Oda sıcaklığında silisyum malzemesindeki gerçek taşıyıcı yoğunluğu $1,45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 'dür. Sıcaklık artırıldığında ise değerlik bandındaki elektronlar yeterli termal enerjiyi kazanarak yarıiletken atomlarından ayrılır ve iletkenlik bandına doğru hareket ederler (Şekil 2.8). Kristal içerisinde hareket ederek akım iletimine katkıda bulunan bu elektronlara serbest elektronlar denir. Aynı zamanda elektronlara eşit sayıda olan ve serbest hareket eden deşiklerde akım iletimine katkıda bulunur.



Şekil 2.8. $T= 0 \text{ K}$ 'de ve $T > 0 \text{ K}$ durumunda katkısız yarıiletkenin bant yapısı [44]

Bir malzemenin iletkenliği, serbest elektron ve boşluk taşıyıcılarının sayısı ile doğru orantılıdır. Katkısız yarıiletkende taşıyıcı yoğunluğu,

$$n_i = N_c \exp \left[-\frac{E_c - E_i}{kT} \right] = N_v \exp \left[-\frac{E_F - E_v}{kT} \right] \quad (2.7)$$

Elde edilir. Burada N_c iletkenlik bandındaki N_v ise valans bandındaki durum yoğunluğudur ve

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (2.8)$$

$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (2.9)$$

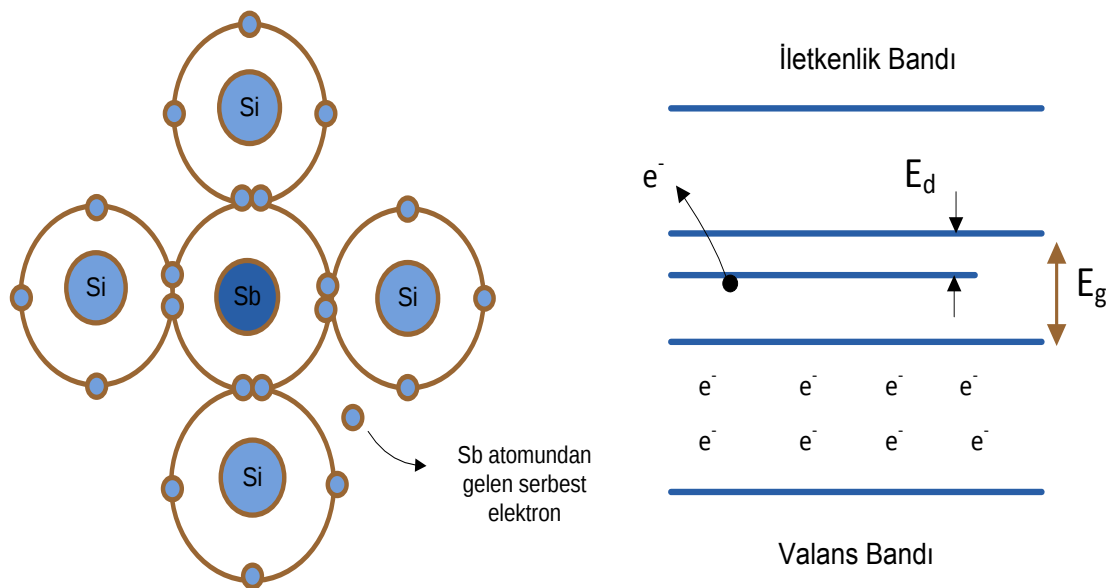
şeklinde ifade edilmektedir.

2.1. Katkılı yarıiletkenler

Saf yarıiletkenlere katkı (bor, fosfor, arsenik vb.) yapılarak elektron ve deşik sayılarını değiştirmek mümkündür. Böylece çalışılan malzemenin elektriksel özellikleri de değiştirilmiş olur. Katkı atomlarının eklenmesiyle oluşan yarıiletkenlere katkılı yarıiletkenler denir. Katkılı yarıiletkenler, saf germanyum veya silisyum gibi maddelere periyodik cetvelin beşinci yada üçüncü kolonunda bulunan maddelerin eklenmesiyle oluşur. Katkılı yarıiletkenler eklenen katkı maddesine göre n-tipi veya p-tipi olarak iki gruba ayrılırlar.

N-tipi yarıiletkenler

Saf kristallere periyodik cetvelin 5A grubunda bulunan elementlerin katkılanmasıyla n-tipi yarıiletkenler oluşur. Dört değerlik elektrona sahip Si kristalinin örgü noktalarına beş değerlik elektrona sahip antimon (Sb) atomunun eklenmesi sonucu oluşan kovalent bağda dört elektron kullanılır (Şekil 2.9 a). Antimonun bağ yapma imkanı olmayan bir elektronu diğer Si atomlarının etkisi altındadır. Si atomunun termal enerji değeri antimonun beşinci elektronunu dış kabuktan sökebilecek kadar yüksek olduğundan elektron iletkenlik bandına yerleşir ve kristal içinde serbestçe hareket eder.



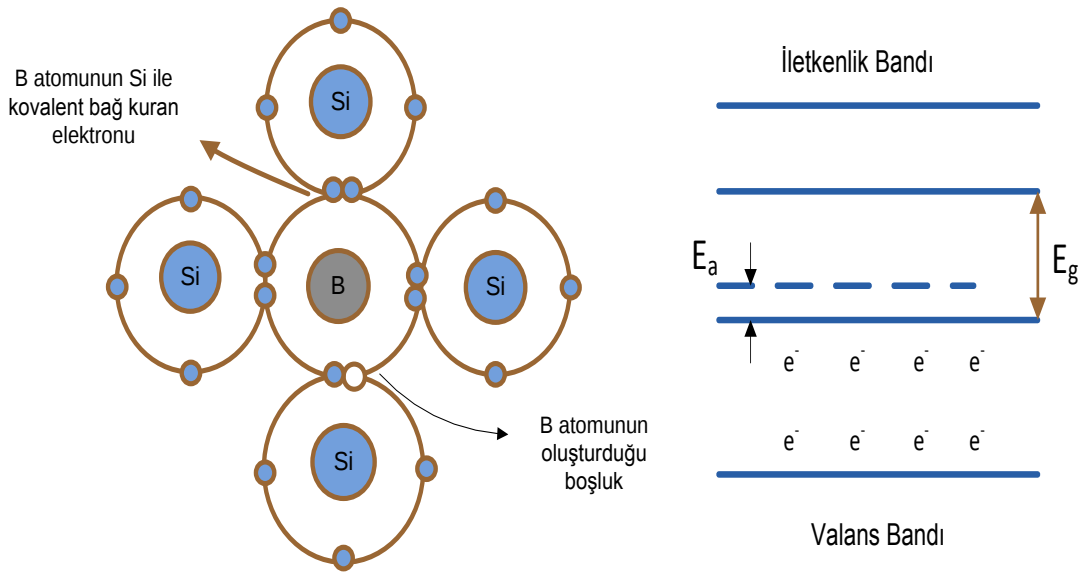
Şekil 2.9. a) N-tipi Si yarıiletken (Antimon, Sb katkılı) b) Verici atom enerji seviyesi [44]

Sb atomu, fazla olan elektronunu Si kristaline verdiği için pozitif iyon haline gelir. Katıldığı kristale elektron veren böyle atomlara verici (donör) adı verilir. Kristale yerleştirilen her katkı atomu bir elektron verecektir. Böylece kristalde oluşan serbest elektronlar iletkenliğe katkıda bulunacaktır [44].

Bir n-tipi yarıiletkende çoğunluk taşıyıcıları negatif yükler yani elektronlardır. Kristale yerleştirilen donör atomları, iletkenlik bandının hemen altında yasak enerji bandının içinde izin verilmiş enerji düzeyinin (E_d) oluşmasına neden olur (Şekil 2.9 b). E_d enerji seviyesi elektronlarla doludur ve enerji değeri birkaç meV civarındadır. Oda sıcaklığında E_d enerji seviyesinden kopan bu elektronlar geride iyonize olmuş pozitif yükler bırakarak iletkenlik bandına doğru hareket ederler [43].

P-tipi yarıiletkenler

Si kristaline periyodik cetvelin üçüncü kolonunda bulunan bir atom (örneğin Bor) katılırsa, katılan üç elektronlu bu Bor atomu, silisyum atomlarıyla dördüncü bağı tamamlayabilmek için bir elektron yakalayacaktır (Şekil 2.10 a). B atomu Si kristalinden elektron aldığı için negatif iyon haline gelir. Bu tür katkı atomlarına alıcı (akseptör), alıcı safsızlıklara sahip kristale de p-tipi yarıiletken adı verilir [44].



Şekil 2.10. a) P-tipi Si yarıiletken (Bor katkılı) b) Alıcı atom enerji seviyesi [44]

Kristale yerleştirilen acceptör atomları, valans bandının hemen üstünde yasak enerji bandının içinde izin verilmiş enerji düzeyinin (E_a) oluşmasına neden olur (şekil 2.10 b). Oda sıcaklığında değerlik bandında bulunan elektronlar geride boşluklar bırakarak, E_a enerji seviyesini elektronlarla doldurur. Valans bandındaki artan deşikler kristalde serbestçe hareket edebilir. Bu durumda çoğunluk yük taşıyıcıları (deşikler) boşluklardır [43].

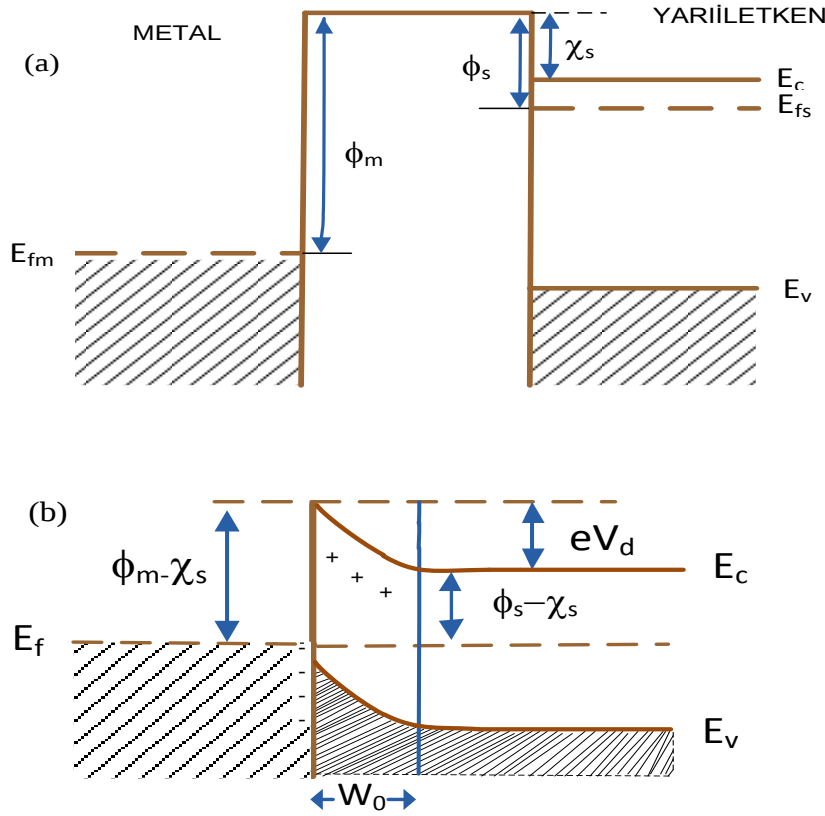
Yarıiletkende santimetre küpte olmak üzere (cm^{-3}) alıcı yoğunluğu N_A , verici yoğunluğu ise N_D ile ifade edilir.

2.5. Metal/Yarıiletken (Schottky) Kontaklar

Metal, yarıiletken ve yalıtkan maddelerin iletkenlik özelliklerinin incelenmesi, uygun kontakların yapılması ile mümkündür [45]. Metal-yarıiletken yapı, bir metal ile bir yarıiletkenin aralarında başka bir madde olmadan kontak edilmesi sonucunda oluşur. Metal-yarıiletken doğrultucu kontaklara Schottky diyot adı verilir. Metal ile yarıiletken temas ettiğinde meydana gelecek durum kullanılan malzemelerin iş fonksiyonlarına bağlı olarak değişmektedir. Metalin iş fonksiyonunun yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyük olması durumunda ($\Phi_m > \Phi_s$) doğrultucu kontak, metalin iş fonksiyonunun yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçük olması durumunda ise ($\Phi_m < \Phi_s$) omik kontak oluşur [9].

2.5.1. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar

şekil 2.11a'da n-tipi bir yarıiletken ve bir metal malzemenin kontak yapılmadan önceki enerji bant diyagramı görölmektedir. Kontak oluşturulmadan önce metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyüktür. Yarıiletkenin fermi seviyesi metalin fermi seviyesinden ($\Phi_m - \Phi_s$) kadar yukarıdadır. Bu durum, serbest elektronların sayısının metalde daha az, yarıiletkende daha fazla olduğunu gösterir [9,10].



Şekil 2.11. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji-bant diyagramı:
a) Kontakdan önceki b) Kontakdan sonraki durumları [9,10]

Şekil 2.11 b’de bir metal/n-Si yapının kontak sonrası enerji bant diyagramı görülmektedir. Kontak oluştuktan sonra yük alışverişi başlar ve yarıiletkenden metale doğru elektron geçişleri olur. Yarıiletkenin yüzey tabakasından hareket eden elektronlar, geride iyonize olmuş donörler bırakırlar. Yarıiletken tarafındaki elektron sayısı azalırken, Metal malzemenin bulunduğu kısımda pozitif yüzey yükleri artar. Yük alışverişi tamamlandıktan sonra yarıiletkenin enerji seviyesi ($\Phi_m - \Phi_s$) kadar alçalmış olur [10,46]. Termodinamik denge durumunda her iki sistemin Fermi seviyeleri aynı hizaya gelir.

Yarıiletken tarafındaki uzay yükleriyle metal tarafında oluşan yüzey yüklerinin oluşturduğu dipol tabakası kontakta bir potansiyel engelinin oluşmasına sebep olur. Potansiyel engelinin yarıiletken tarafındaki değeri [9,10];

$$eV_d = (\Phi_m - \Phi_s) \quad (2.10)$$

Şeklinde ifade edilir. Burada V_d difüzyon potansiyelidir. Schottky-Mott teorisine göre metal tarafındaki engel yüksekliği ise;

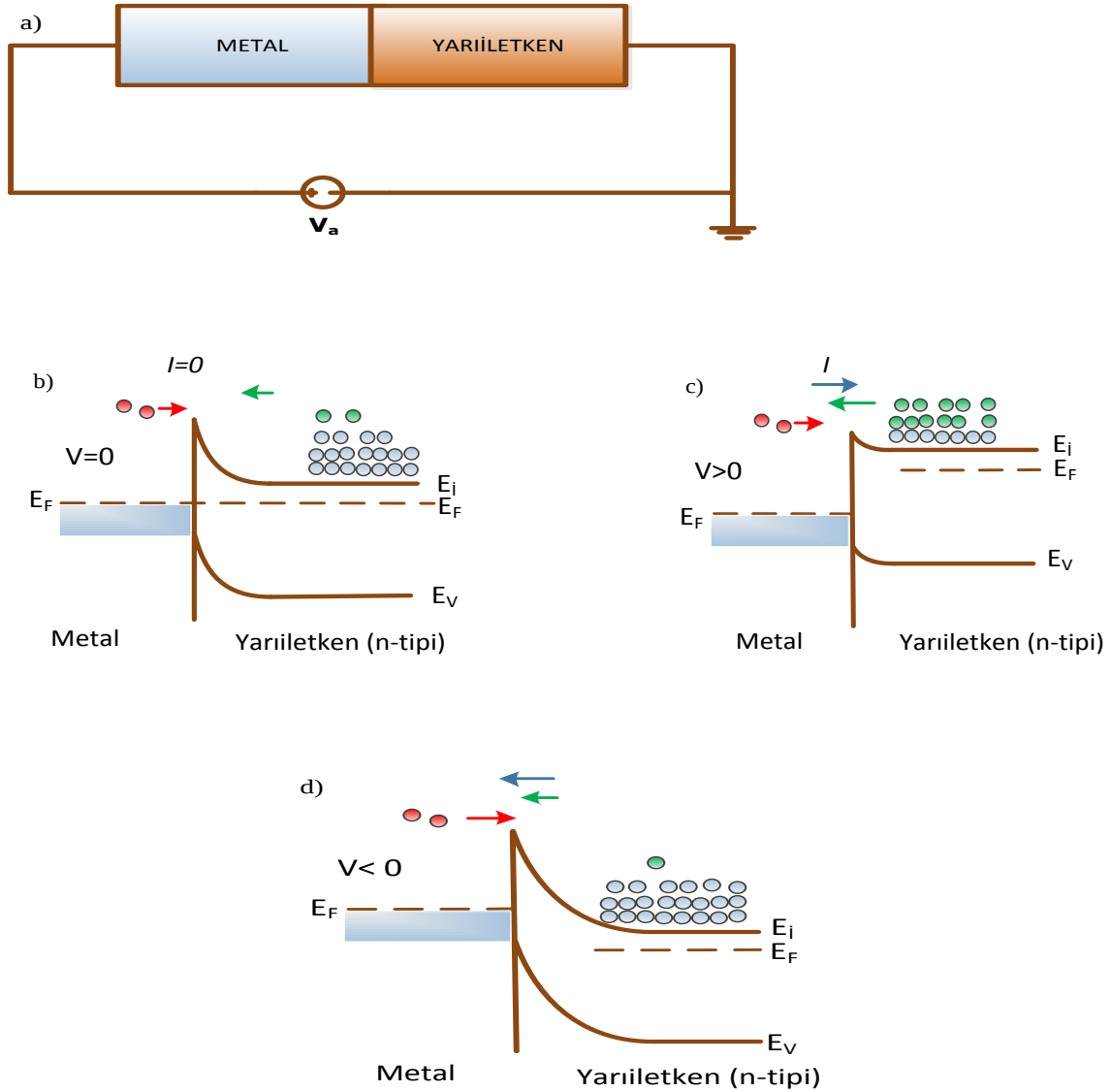
$$e\Phi_B = \Phi_m - \chi_s \quad (2.11)$$

İle verilir. Burada χ_s yarıiletkenin elektron yakınlığıdır. Metal tarafında dik olarak yükselen potansiyel engeli, yarıiletken tarafında d genişliğine sahiptir. Yarıiletken tarafında d genişliğinde yüklerden arınmış bir bölge yani ‘Schottky bölgesi’ oluşur [9,10]. Bu ara bölge sığa özelliği gösterir ve bir kondansatör gibi davranır. Bu yüzden bu bölgeye Schottky kapasitesi de denir. Schottky kapasitesi bu tabakanın kalınlığına, tabaka kalınlığı da iyonize olmuş donör yoğunluğuna ve difüzyon potansiyelinin değerine bağlıdır [10].

Denge durumunda metal-yarıiletken yapıdaki elektronlar, potansiyel engelini aşabilecek enerjiye sahip olduklarında kontakten eşit ve zıt yönde I_0 sızıntı akımı geçer (Şekil 2.12). Yarıiletkene negatif gerilim uygulandığında, yarıiletken tarafındaki iletkenlik bandı eV kadar yükseleceği için yarıiletkenden metale geçecek olan elektronlar için engel yüksekliği eV kadar azalacaktır. Dolayısıyla metalden yarıiletkene doğru akan akım $\exp(eV/kT)$ faktörü kadar artacaktır. Bu durumda oluşan net akım [47],

$$I = I_0 [\exp(eV/kT) - 1] \quad (2.12)$$

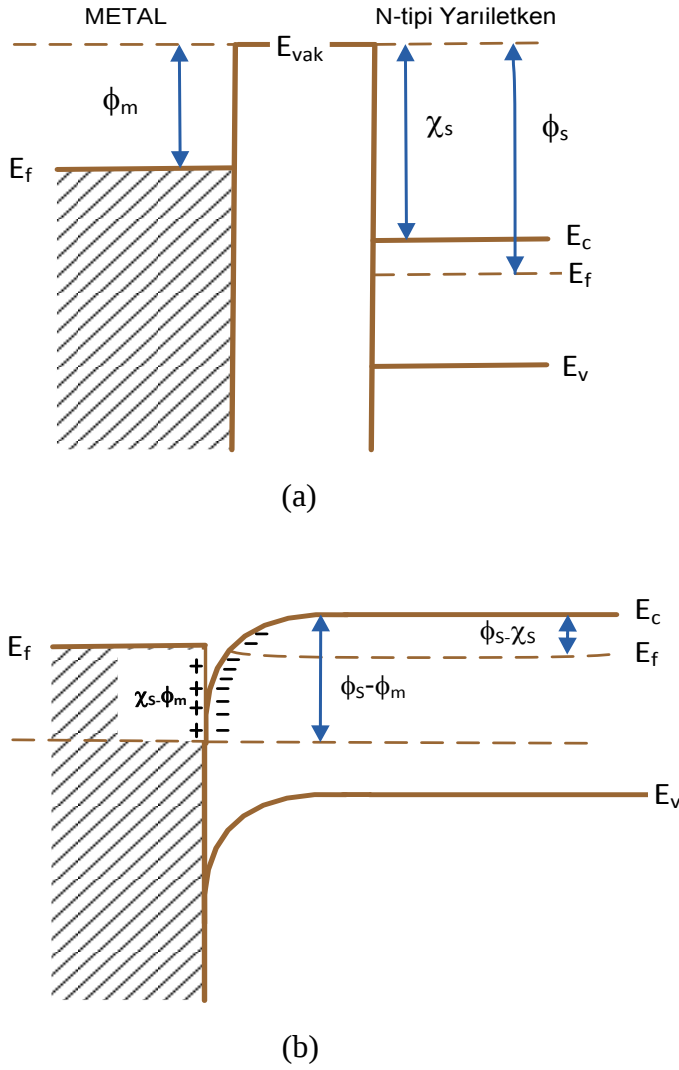
İle verilir [4,46]. Burada I net akımı pozitifdir. Bu duruma düz beslem (yarıiletkene negatif gerilim, metale pozitif gerilim) durumu denir. Yarıiletken tarafına pozitif gerilim uygulandığında iletkenlik bandı eV kadar alçalır ve yarıiletken tarafındaki eV yüksekliği kadar artar. Oluşan net akım $-I_0$ değerine yaklaşır. Bu beslem durumuna ters beslem durumu (yarıiletkene pozitif gerilim, metale negatif gerilim) denir [4,46].



Şekil 2.12. a) Metal/yarıiletken kontak şeması b) Termal denge durumu taşıyıcı akışı c) Düz beslem durumu taşıyıcı akışı d) Ters beslem durumu taşıyıcı akışı [47]

2.5.2. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontaklar

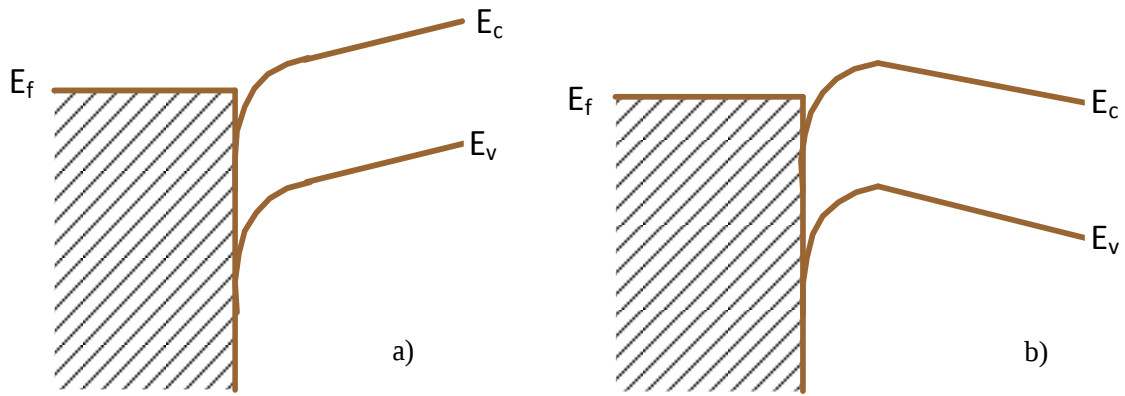
Şekil 2.13’de bir metalin n-tipi bir yarıiletkenle yapmış olduğu omik kontak görülmektedir. Kontak yapılmadan önce metalin Fermi seviyesi, yarıiletkenin fermi seviyesinden ($\Phi_s - \Phi_m$) kadar yukarıdadır (Şekil 2.13 a).



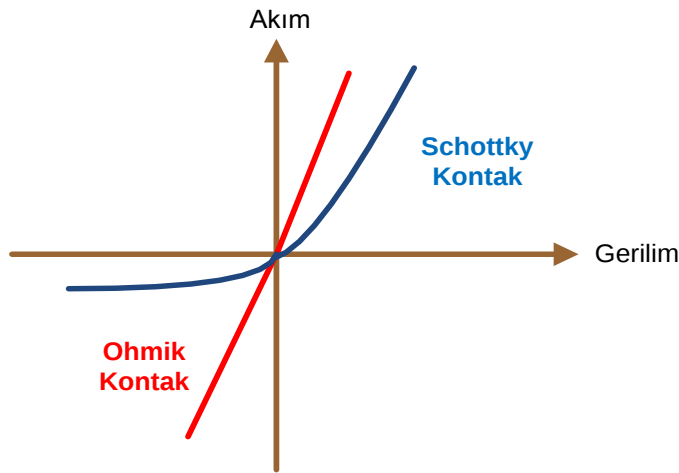
Şekil 2.13. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontağın enerji-bant diyagramı:
a) Kontakta önceki b) Kontakta sonraki durumları [10]

Kontak anında elektronlar metalden yarıiletkene doğru geride pozitif yüzey yükleri bırakarak geçerler. Bu durum Fermi seviyeleri eşit oluncaya kadar devam eder. Denge durumuna ulaşıldığında yarıiletken tarafındaki fermi enerji düzeyi ($\Phi_s - \Phi_m$) kadar yukarı bükülür (Şekil 2.13 b). Metal üzerinde pozitif ve yarıiletken üzerinde negatif yüzey yükleri oluşur. Böyle bir kontakta potansiyel engel yüksekliği oluşmaz ve kontakta her iki yönde kolayca yük geçişi olur.

Bir V voltajı uygulanırsa, bu potansiyel farkı kontak bölgesinde yarıiletken boyunca dağılacaktır. Yarıiletkene pozitif ve metale negatif gerilim uygulanırsa metalde var olan elektronlar yarıiletken tarafına geçerler (Şekil 2.14 a).



Şekil 2.14. Ters ve düz beslem durumlarında omik kontağın enerji-bant diyagramları:
a) $V < 0$ durumu b) $V > 0$ durumu [9,10]



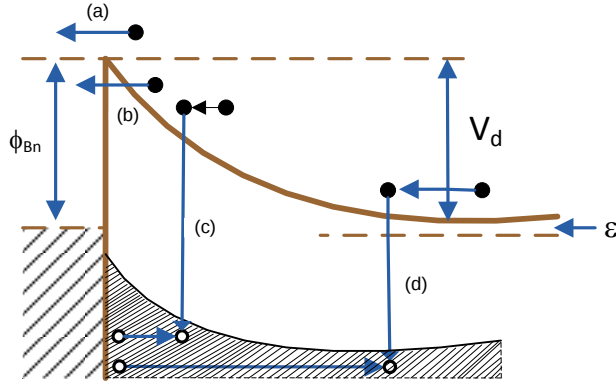
Şekil 2.15. Schottky ve omik kontak akım-gerilim karakteristiği

Şekil 2.15’de schottky ve omik kontağın akım gerilim karakteristiği gösterilmiştir. Doğrultucu kontaklarda akım taşıyıcılarının bir yöndeki akışı diğer yöndekine göre daha kolaydır. Omik kontaklarda ise akım taşıyıcılarının hızı her iki yönde de aynıdır [48].

2.6. Metal/Yarıiletken Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları

Metal/yarıiletken kontaklarda akım iletim mekanizmaları; Termoiyonik Emisyon (TE), difüzyon (D), Termoiyonik Emisyon-Difüzyon (TED), Termoiyonik Alan Emisyonu (TAE), Alan Emisyonu (AE), azınlık taşıyıcı enjeksiyonu, üretilme-yeniden birleşme ve çok katlı tünelleme şeklindedir. Schottky Kontaklarda akım iletimi çoğunluk taşıyıcıları ile gerçekleşir.

Şekil 2.16'da bir metal/n-Si eklem yapısında akım iletim mekanizmalarının şematik gösterimi görülmektedir [9,10,43].



Şekil 2.16. Bir metal/n-Si eklem yapısında akım iletim mekanizmalarının şematik gösterimi

Temelde dört farklı akım iletim mekanizması mevcuttur. Bunlar;

- Engel yüksekliğini aşıp metale gelen elektronların oluşturduğu akım
- Elektronların engel içinden doğrudan kuantum-mekaniksel tünellemeleri (orta derecede katkılandırılmış yarıiletkenler için) ile oluşan akım
- Uzay yük bölgesinde yeniden birleşme işleminin oluşturduğu akım
- Metalden yarıiletkene olan deşik enjeksiyonunun oluşturduğu akımdır.

2.6.1. Termioyonik emisyon teorisi

Metal/yarıiletken kontaklarda Termioyonik Emisyon teorisi taşıyıcıların yeterli termal enerjiyi kazanarak metalden yarıiletkene ve yarıiletkeniden metale doğru geçerek oluşturdukları bir akım mekanizmasıdır [9,10,43]. Metal n-tipi yarıiletken yapılarda bu olay elektronlar, metal p-tipi yarıiletken yapılarda ise holler tarafından sağlanır.

Bu akım mekanizmasının kabul ettiği bazı varsayımlar şunlardır:

- Termal denge kurulmuş olup, net akımın akması bu dengeye etki etmez.
- Engel bölgesinde taşıyıcı çarpışmaları olmaz. Buna göre taşıyıcıların ortalama serbest yolları Schottky bölgesinin kalınlığından daha büyüktür.
- Engel yüksekliği, kT enerjisinden çok büyüktür.
- Görüntü kuvvetlerin etkisi ihmal edilmektedir.
- Engel görüntüsünün biçimi önemsiz olup, akım engel yüksekliğine bağlıdır.

Diyot ters beslemdeyken yarıiletkenin omik tarafındaki elektron yoğunluğu gövdeye göre daha az olduğundan omik tarafından yapıya taşıyıcı giremez. Ters beslem akımı sadece doğrultucu kontak (metal tarafından) yapıya giren boşluklar ile sağlanır. Diyotun metal tarafı uygulanan gerilimden bağımsızdır. Potansiyel engelini geçmeye yetecek kadar enerjiye sahip olan ve yarıiletkenden metale doğru akan elektronların oluşturduğu akım yoğunluğu,

$$J_{sm} = \int_{E_F + q\phi_B}^{\infty} q V_x d_n \quad (2.13)$$

şeklinde ifade edilir. Burada V_x elektronların hızı, d_n , küçük bir enerji aralığındaki elektron yoğunluğu ve $(E_F + q\phi_B)$ metalden TE için gerekli minimum enerjidir. Bu ifade yardımıyla yarıiletkenden metale doğru geçen elektronlar için akım yoğunluğu

$$J_{sm} = \left(\frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[\frac{-q(\phi_B)}{kT} \right] \exp \left(\frac{qV}{kT} \right) \quad (2.14)$$

şeklinde ifade edilir. Burada m^* taşıyıcının etkin kütlesi, k ve h sırasıyla Boltzmann ve Planck sabitidir. A^* Richardson sabiti olarak adlandırılır. Gerekli düzenlemeler yapıldığında ifade

$$J_{sm} = A^* T^2 \exp \left[\frac{-q\phi_B}{kT} \right] \exp \left(\frac{qV}{kT} \right) \quad (2.15)$$

şeklini alır. Diğer taraftan metal tarafındaki engel yüksekliği aynı kaldığından yarıiletkene geçen elektronların oluşturduğu akım yoğunluğu uygulanan gerilime bağlı olmayıp,

$$J_{ms} = -A^* T^2 \exp \left[\frac{-q\phi_B}{kT} \right] \quad (2.16)$$

şeklinde ifade edilir. Isısal denge durumunda ($V=0$) metalden yarıiletkene doğru olan akım yoğunluğu yarıiletkenden metale doğru olan akım yoğunluğuna eşittir ve böylece toplam akım yoğunluğu,

$$J_n = \left[A^* T^2 \exp \left[\frac{-q\phi_B}{kT} \right] \right] \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.17)$$

şeklinde ifade edilir. Eş. 2.17 ifadesindeki parantezli ilk terim doyma akımı yoğunluğudur. Böylece toplam akım yoğunluğu;

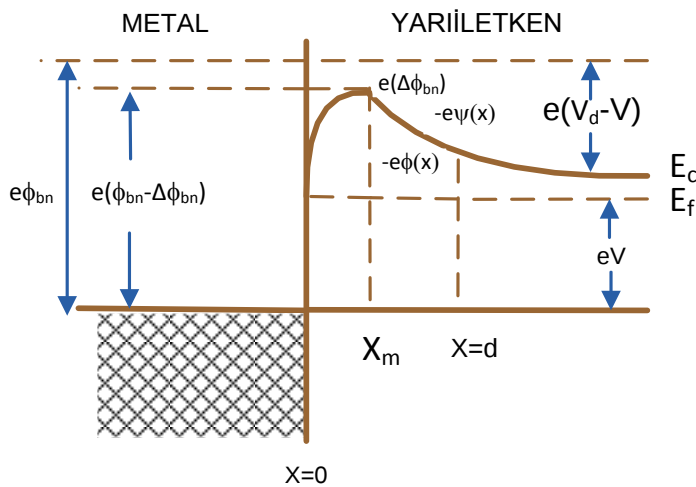
$$J_n = J_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.18)$$

2.7. Görüntü Kuvvet Etkisi (Schottky Alçalması)

Bir metal ile yarıiletken kontak edildiğinde metal-yarıiletken ara yüzeyinde bir potansiyel engeli oluşur. Schottky engel alçalması olayı, elektrik alan uygulandığında oluşan potansiyel engelinin, hayali kuvvet indüklemesiyle $e(\Delta\phi_{bn})$ kadar alçalması olarak tarifedilir [49]. Metalden belirli bir uzaklıkta bulunan bir elektron metal içerisinde pozitif bir görüntü yükü oluşturacaktır. Oluşan bu iki yük bir elektrik alanı ve çekim kuvveti meydana getirecektir. Bu kuvvet görüntü kuvveti olarak adlandırılır ve

$$F = \frac{-e^2}{4\pi(2x)^2 \epsilon_0} = -eE \quad (2.19)$$

şeklinde ifade edilir. Bu etki şekil 2.17’de görülmektedir. Burada x elektronun metale olan uzaklığı, e elektronun yükü, ϵ_0 boşluğun elektriksel geçirgenliği ve E oluşan elektrik alanıdır.



Şekil 2.17. Schottky etkisinin varlığında, metal n-tipi yarıiletken kontağının enerji-bant gösterimi [49]

Yapıya bir harici elektrik alan uygulandığı zaman toplam potansiyel enerji uzaklığın fonksiyonu olarak

$$\phi(x) = \frac{e}{16\pi\epsilon_0 x} + eEx \quad (2.20)$$

şeklinde ifade edilir. Schottky engel yüksekliğindeki azalma miktarı $\Delta\phi$ ve engelin tepe noktasının yeri X_m , $d\phi(x)/dx=0$ şartından bulunur.

$$X_m = \sqrt{\frac{e}{16\pi\epsilon_0 E}} \quad (2.21)$$

$$\Delta\phi = \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_s\epsilon_0}} \quad (2.22)$$

şeklinde ifade edilir.

2.8. İdeallik Faktörü

Malzemenin yapım aşamalarında çeşitli nedenlerden dolayı ideal olan durumdan sapmalar meydana gelmektedir. ‘ideallik faktörü’ ideal olan yapıdan ne kadar sapıldığını belirlemek için tanımlanmış olan parametredir. Bu parametre arayüzey durumlarının yoğunluğuna (N_{ss}) ve kalınlığına bağlı olup [9,10,43],

$$n = 1 + \frac{\left(\frac{d_{ox}}{\epsilon_i}\right)\left(\frac{\epsilon_s}{W_D + qN_y}\right)}{1 + \left(\frac{d_{ox}}{\epsilon_i}\right)qN_m} \quad (2.23)$$

şeklinde ifade edilir. Burada N_m metal ile dengede olan arayüzey durumlarının, N_y ise yarıiletken ile dengede olan durumların yoğunluğudur. ϵ_s yarıiletkenin geçirgenliği, ϵ_i oksit tabakasının geçirgenliği, W_D tüketme bölgesinin genişliği, d_{ox} ise arayüzey tabakasının kalınlığıdır. Arayüzey durumlarının yoğunluğu küçük ise Eş. 2.23 ifadesi

$$n = 1 + \frac{d_{ox}\epsilon_s}{W_D\epsilon_i} \quad (2.24)$$

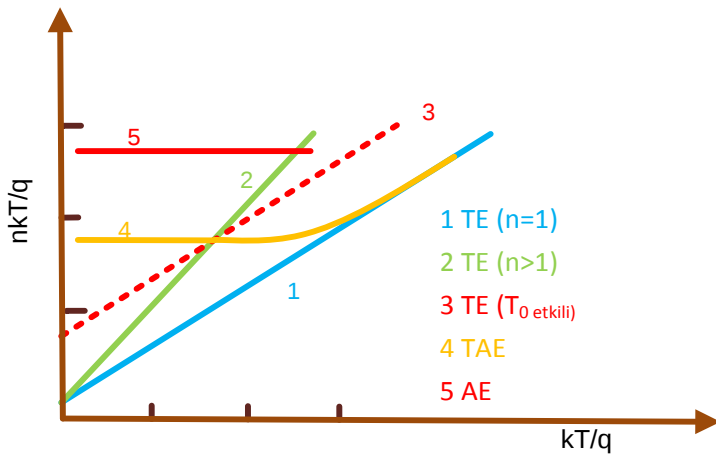
şeklini alır. Arayüzey durumları metal ile dengede ise Eş. 2.23 ifadesi,

$$n = 1 + \frac{d_{ox}\epsilon_s}{W_D(\epsilon_i + d_{ox}qN_m)} \quad (2.25)$$

şeklini alır. Bu iki durumda arayüzey durumlarının ve oksit tabakasının ideallik faktörüne katkısı küçüktür ve bu yüzden metal/yarıiletken yapı ideal davranır. Eğer arayüzey durumları yarıiletken ile dengede ise Eş. 2.23 ifadesi,

$$n = 1 + \left(\frac{d_{ox}}{\epsilon_i}\right)\left(\frac{\epsilon_s}{W_D + qN_y}\right) \quad (2.26)$$

şeklini alır. İdealite faktörü, arayüzey tabakasının kalınlığı ve arayüzey durumları ile doğru orantılı olarak değişmektedir [9,10,43]. İdealite faktörü sıcaklığın bir fonksiyonu olarak çizildiğinde bir eklem için farklı akım mekanizmaları tanımlanabilir (Şekil 2.18). Yapıda termoiyonik emisyon mekanizması etkin olduğu zaman 1 ($n=1$ için), 2 ($n>1$ için) ve 3 (T_0 etkili) numaralı eğriler elde edilir. Şekil 2.18’de görülen 4 numaralı eğri termoiyonik alan emisyonunu, 5 numaralı eğri ise alan emisyonunu tanımlar.



Şekil 2.18. Akım-İletim mekanizmaları için $nkT/q - kT/q$ eğrileri [9,10,43]

2.9. Seri Direnç Etkisi ve Ölçme Yöntemleri

Seri direnç, diyodun iyi yada kötü olmasında rol oynayan etkenlerden biridir. Bir yapıda meydana gelen seri direnç 5 farklı kaynaktan oluşur.

Bunlar [9,43];

- a) Yarıiletken gövde içerisindeki düzgün olmayan katkı dağılımından meydana gelen
- b) Yarıiletken tüketme tabakası ve arka kontak arasındaki gövde direncinden meydana gelen
- c) Yarıiletken gövde ile kontak arasına yerleşmiş kirli bir film tabakası veya bir parçacıktan meydana gelen
- d) Yarıiletken kristale temas ettirilmiş arka (omik) kontakta meydana gelen
- e) Kontaklardan elektriksel ölçüm için alınmış tellerden meydana gelen direnç şeklindedir.

Yarıiletken gövdesinden gelen seri direnç etkisi küçüktür ve ihmal edilebilir. Mazemenin yapım aşamasında yahut ölçüm aşamasında seri direnç etkisi bir miktar azaltılabilir.

Bir metal/yarıiletken diyotun I-V ölçüm verileri kullanılarak seri direnci tayin edilebilir. Seri direnç tayini için birçok yöntem vardır.

2.9.1. Norde yöntemi

Norde [50] yöntemi $n=1$ durumu için seri direnç ve engel yüksekliğini orijinal bir $F(V)$ fonksiyonu yardımıyla elde etmeyi amaçlar. Bu parametreleri elde etmek için fonksiyonun minimum noktasından faydalanılır. Bu yöntem, engel yüksekliği ve seri direnç parametrelerinin sıcaklıkla değişmediği durumlarda uygulandığı için, sadece tek bir sıcaklıktaki I-V eğrisini kullanmak yeterlidir. TE Teorisinden bulunan akım yoğunluğu ifadesi diyotun etkin alanıyla çarpıldığında toplam I akımı ($qV \gg 3kT$);

$$I = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.27)$$

olur. Schottky dioduna uygulanan V geriliminin bir kısmı da seri direnç üzerine düşeceğinden dolayı Eş. 2.27 ifadesi,

$$I = AA^*T^2 \exp\left(\frac{q\phi_B}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{q(V - IR)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.28)$$

şeklini alır. Burada $(V-IR)$ terimi diyot üzerine düşen gerilimdir. Yüksek seri dirençli numunelerde I-V eğrisinin lineer bölgesi sınırlanır ve eğrinin değerlendirilmesi daha karışık bir hal alır. Bu durumda Norde [50], seri direnç hesaplamaları için;

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (2.29)$$

şeklinde bir ifade tanımlamıştır. Eş. 2.28 ifadesinin her iki tarafının Ln'i alınıp Eş. 2.29 ifadesinde yerine konursa,

$$F(V) = \left(\frac{n-2}{2n}\right)V + \frac{IR}{n} + \Phi_B \quad (2.30)$$

ifadesi elde edilir. Burada $R=0$ ideal durumu olduğunda $F(V)$ - V grafiğinin eğimi $(n-2)/2n$ olur ve $F(V)$ lineer doğrusu voltaj eksenini sıfırda kestiği nokta engel yüksekliğini verir. Fakat seri direnç sıfırdan farklı ise $F(V)$ fonksiyonu bir minimumdan geçer ve

$$F(V) = F_R(V) = \frac{V}{2} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{V}{AA^*T^2R}\right) \quad (2.31)$$

şeklini alır. Eş. 2.27 ifadesinin V 'ye göre türevi alınıp Eş. 2.31 ifadesinde yerine konursa,

$$\frac{\partial F(V)}{\partial V} = \frac{n-2+\beta IR}{2(n+\beta IR)} \quad (2.32)$$

elde edilir. Burada $\beta = kT/q$ 'dur. $\partial F(V)/\partial V = 0$ olması durumunda,

$$n-2+\beta IR=0 \quad (2.33)$$

elde edilir. Buradan seri direnç ve engel yüksekliği,

$$R_s = \frac{(2-n)kT}{Iq} \quad (2.34)$$

$$\Phi_B = F(V)_{min} + \left(\frac{2-n}{2n}\right)\frac{V_0}{2} - \frac{kT}{q} \quad (2.35)$$

olur. Burada V_0 , $F(V)$ fonksiyonunun minimumdaki değerine karşılık gelmektedir. 1986'da Bohlin [51] ideallik faktörünün 1'den büyük olması durumunda Norde fonksiyonunu yeniden düzenledi. $F(V)$ fonksiyonun ilk terimi olan $V/2$ ifadesi yerine V/γ terimini

kullanmıştır. Burada γ , ideallik faktöründen küçük olmamak üzere ($1 < n < \gamma$) ilk büyük tam sayıdır. Böylece ideallik faktörü büyük olan diyotlar için I-V ölçümlerinden elde edilen R_s , Φ_B ve n 'in daha doğru olarak belirlenmesini mümkün kılar. Buna göre modifiye edilmiş yeni Norde fonksiyonu,

$$F(V, \gamma) = F_R(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{I}{AA^* T^2} \right) \quad (2.36)$$

Eş. 2.28 ifadesinin iki tarafının $\ln$ 'i alınıp Eş. 2.36 ifadesinde yerine yazılırsa,

$$F(V, \gamma) = F_R(V) = \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n} \right) V + \Phi_{Bn} + \frac{IR}{n} \quad (2.37)$$

elde edilir. Seri direnç sıfır ise $F(V)$ - V eğrisi eğimi $(n - \gamma/\gamma)$ olan bir doğru olur. Seri direnç sıfırdan farklıysa ve Eş. 2.36 denklemindeki akım ifadesinin açık şekli yazılırsa,

$$F(V, \gamma) = F_R(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{V}{RAA^* T^2} \right) \quad (2.38)$$

Elde edilir. Eş. 2.37 ifadesinin V 'ye göre türevi alınıp gerekli düzenlemeler yapılırsa,

$$\Phi_B = F(V_0, \gamma) - \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n} \right) V_0 - \frac{(\gamma - n)}{(\beta n)} \quad (2.39)$$

$$R_s = \left(\frac{\gamma - n}{\beta I_0} \right) \quad (2.40)$$

ifadeleri elde edilir.

2.9.2. Cheung yöntemi

1986 yılında Cheung tarafından [52] Metal-yarıiletken kontakların seri direnç hesaplarında yapıların I-V karakteristikleri kullanılarak farklı bir yöntem geliştirilmiştir. Bunun için Eş. 2.27 ifadesinin her iki tarafının $\ln$ 'i alınıp düzenlendiğinde,

$$V = \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) + n\Phi_B + IR_s \quad (2.41)$$

elde edilir. Bu ifadenin her iki tarafının $\ln I$ 'ya göre türevi alınır,

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (2.42)$$

elde edilir. $dV/d(\ln I)$ ifadesi I 'ya karşı çizilirse bir doğru elde edilir. Elde edilen bu doğrunun eğimi seri direnci (R_s), eğrinin düşey eksenini kestiği nokta ise diyodun idealite faktörünü (n) verir [52]. Cheung, yapının engel yüksekliğini bulmak için,

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (2.43)$$

şeklinde bir $H(I)$ fonksiyonu tanımlamıştır. Eş. 2.41 ve Eş. 2.42 ifadelerini kullanarak engel yüksekliği için,

$$H(I) = n\Phi_B + IR_s \quad (2.44)$$

şeklinde bir ifade elde edilir. Eş. 2.44 ifadesinden de görüldüğü gibi $H(I)$ 'nın I 'ya göre grafiği çizildiğinde bir doğru elde edilecektir. Bu doğrunun eğimi seri direnç değerini, $H(I)$ eksenini kestiği nokta ise engel yüksekliği verecektir.

2.10. Akım-Gerilim Karakteristikleri

Metal-yarıiletken yapılarda akım, çoğunluk taşıyıcıları ile iletilir. Yüksek mobiliteli yarıiletkenlerin oluşturduğu Schottky diyotlarında düz beslem çok yüksek olmadıkça akım iletim mekanizması termoiyonik emisyon teorisine uyar. Buna göre yapının akım-gerilim ilişkisi [9,43, 53-55],

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.45)$$

şeklindedir. Burada I_0 , doyma akımı olup,

$$I_0 = AA^*T^2 \exp \left[\frac{-q(\Phi_{B0})}{kT} \right] \quad (2.46)$$

ifadesi ile verilir. Burada A kontak alanı ve Φ_{B0} sıfır beslem engel yüksekliğidir. A^* Richardson sabitidir ve

$$A^* = \frac{4\pi qm^*k^2}{h^3} \quad (2.47)$$

Eş. 2.45 ifadesi ideal bir diyodu tanımlar. Ancak yapıya etki eden birçok faktörden dolayı her zaman ideallikten sapma vardır. Arayüzey tabakasının varlığı veya tüketim bölgesindeki yeniden birleşme durumları ideallikten sapmanın birkaç örneğidir. Bu yüzden Eş. 2.45 ifadesi bir düzeltme faktörü ile yeniden ifade edildiğinde [9,10,43],

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (2.48)$$

elde edilir. $V \gg 3kT/q$ olduğundan -1 terimi ihmal edilir.

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) \right] \quad (2.49)$$

Burada n, gerilime ve sıcaklığa bağlı olabilen ve değeri 1'den büyük olan ideallik faktörüdür. İdeal bir diyot için $n=1$ 'dir.

Eş. 2.49 ifadesinin her iki tarafının logaritması alındıktan sonra V parametresine göre türevi alınırsa n idealite faktörü;

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (2.50)$$

olarak elde edilir. Ölçümle elde edilen I-V verilerinden $\ln(I)$ -V grafiği çizildiğinde, grafiğin doğru beslem kısmından elde edilen doğrunun eğimi ve diğer sabitler Eş. 2.50 ifadesinde yerine yazılırsa idealite faktörü hesaplanabilir. Bu doğrunun akım eksenini kestiği nokta doyma akım yoğunluğunu (I_0) verir. Eş. 2.46 ifadesinin her iki tarafının logaritması alınarak Φ_B 'ye göre çözülürse

$$\Phi_B = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (2.51)$$

Denklemini elde edilir.

2.11. Arayüzey Durumları

Metal-yarıiletken diyotların yapım aşamasında kimyasal temizleme işleminde birden çok nedenden dolayı yarıiletken ile kaplanacak metal arasında belirli bir kalınlığı (5~10 Å) olan bir arayüzey tabakasının varlığı sözkonusudur. Bu arayüzey tabakası, ince olsa bile diyotun temel parametrelerine olumsuz yönde etki edebilir [9,10,43]. Böylece oluşturulan Schottky yapısının parametreleri ideallikte sapmalar gösterecektir.

Kontak oluştuktan sonra da ortaya çıkan yüzey durumları sözkonusudur. Bunlar yarıiletkenin yüzeyine yayılmış olan safsızlıkların varlığından dolayı meydana gelir [10,43]. Hem yarıiletkenin yüzeyinde hem de gövdesinde bulunan kusurların oluşturduğu yüzey durumları da vardır.

Bir metal yarıiletkenin yüzeyine buharlaştırma yolu ile kaplandığında metal ile yarıiletken arasında bir kimyasal reaksiyon meydana gelir. Bu reaksiyon sonucu yeni bir bileşik ve dolayısıyla da arayüzey durumları oluşmuş olur [9,10]. Metalden yarıiletkenine doğru yük akışıyla meydana gelen bu yüzey durumlarına metalle uyarılan ara yüzey durumları (metal-induced gap states) adı verilir [9,10,26].

Bir yarıiletken malzemenin arayüzey durumlarının dağılımını belirlemek için değişik yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan kapasite ve iletkenlik yöntemleri en sık kullanılanlardandır. Diğer taraftan yapının I-V karakteristiklerinden yola çıkarak da arayüzey durumlarını tayin etmek mümkündür.

Bilindiği gibi yapının ideallik faktörü arayüzey durumlarına ve arayüzey tabakanın kalınlığına bağlıdır [9,10]. Buna göre ideallik faktörünün arayüzey durumlarına (N_{ss}) bağlılığını gösteren denklem,

$$\frac{1}{n} = \frac{\mathcal{E}_i}{\mathcal{E}_i + q^2 N_{ss} \delta} \quad (2.52)$$

ile ifade edilir.

2.12. Kapasite-Gerilim Karakteristikleri

Bir Schottky diyota düz beslem uygulandığında, diyot direnci ve eklem kalınlığı küçülür. Ters beslem uygulandığında ise eklem kalınlığı ve diyot direnci artar [43,49]. Eklem bölgesindeki kalınlık ve yük dağılımlarının değişimleri oluşan Schottky diyotlarının kapasitesine etki eder. İdeal bir metal yarıiletken kontağın birim yüzey alanı başına deplasyon bölgesinin sığası [9,10,43,49],

$$C = \left(\frac{q\epsilon_s N_d}{2(V_d - V)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.53)$$

ϵ_s yarıiletkenin geçirgenlik katsayısı, N_d donör yoğunluğu (n-tipi yarıiletken için), V_d difüzyon potansiyelini ifade etmektedir. Eşitliğe göre C^{-2} - V grafiğinden bir doğru elde edilir. C^{-2} - V grafiğinde bu doğrunun V eksenini kestiği nokta difüzyon potansiyeli (V_d) değerini verir.

Arayüzey tabakalı bir metal yarıiletken diyot göz önüne alındığında arınma bölgesi sığası, şu şekilde ifade edilebilir:

$$C = C_2 \left(\frac{q\epsilon_s N_d}{2(\phi_{bp} - C_2 V - V_p)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.54)$$

$$C^{-2} = 2 \left(\frac{\phi_{bp} - C_2 V - V_p}{C_2^2 q\epsilon_s N_d} \right) \quad (2.55)$$

Genel olarak yeterince yüksek frekanslarda yarıiletkenle dengede bulunan arayüzey halleri sığaya katkıda bulunmadığı durumda C^{-2} - V grafiği bir doğru verir. Eş. 2.54 ifadesi, yüksek frekanslarda C^{-2} - V grafiğinin eğiminin sabit olduğunu gösterir. C^{-2} - V grafiğinin eğiminden,

$$C_2 = \frac{2}{q\epsilon_s N_d \left(\frac{d(C^{-2})}{dV} \right)} \quad (2.56)$$

Bu grafiğin yatay ekseni kestiği noktadan difüzyon potansiyeli belirlenerek, engel yüksekliği,

$$\phi_{bp} = C_2 V_d + V_p \quad (2.57)$$

Şeklinde bulunur. V_d doğrunun V eksenini kestiği noktadan belirlenen difüzyon potansiyelidir.

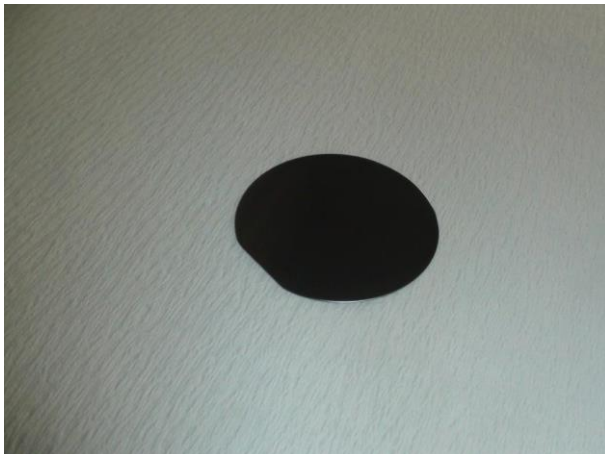
3. MATERYAL VE METOD

3.1. Schottky Diyotların Hazırlanması

Aynı şartlarda hazırlanmış 50 adet özdeş Au/n-Si(100)/Al Schottky diyot üretilmiştir. Bu amaçla, ilk olarak silisyum kristali bir dizi kimyasal temizlik işleminden geçirilmiştir. Kimyasal temizlik aşamasından sonra silisyum kristali üzerinde omik ve doğrultucu kontak oluşturulmuştur. Aşağıdaki bölümlerde Schottky diyotların hazırlanması ve kullanılan cihazlardan ayrıntılı olarak bahsedilecektir.

3.1.1. Silisyum kristali temizleme işlemi

Schottky diyotların üretiminde kullanılan, CZ (Czochralski) tekniği ile büyütülmüş silisyum kristali; fosfor (P) katkılı (yani, n tipi), 20 Ωcm öz dirençli, 380 μm kalınlığında ve (100) düzleminde 5 cm çapında kesilmiştir (Resim 3.1). Bu tez çalışmasında 5 cm çapındaki silisyum kristalin $\frac{1}{4}$ parçası kullanılmıştır. İlk olarak, silisyum yüzeyindeki olası yağları temizlemek için ultrasonic banyoda trikloretilen dolu beherde 10 dakika titreştirildi (Resim 3.2). İkinci olarak, 55 dereceye kadar ısıtılmış aseton dolu beher içerisine atıldı ve ultrasonic banyoda 10 dakika bekletildi. Üçüncü olarak methanol dolu beher içerisine bırakıldı ve ultrasonic banyoda 10 dakika bekletildi. Buraya kadar her kimyasal temizleme aşama arasında deiyonize su sistemi (Resim 3.3) ile üretilen 18 M Ωcm öz dirençli deiyonize su ile ultrasonic banyoda 5 dakika bekletildi. Bu işlemlerden sonra silisyum kristali azot (N_2) gazı ile iyice kurutuldu.



Resim 3.1. Fosfor katkılı n-tipi Silisyum kristali



Resim 3.2. Beher Bandelin Sonorex marka ultrasonik banyo



Resim 3.3. “Innovation Water Purification” marka deiyonize su sistemi

Silikon yüzeyindeki organik ve inorganic artıkları uzaklaştırmak için, beher içerisine H_2O (325 ml) + (27%) NH_4OH (65 ml) karışımı konularak ısıtılmıştır (Resim 3.4). Isıtılan karışıma (30%) H_2O_2 (65 ml) eklenip kabarcıklar oluşuktan sonra silikon kristalleri oluşan yeni karışımın içinde ultrasonic banyoda 15 dakika bekletilmiştir. Daha sonra 18 $M\Omega$ -cm dirençli deiyonize su ile bolca durulanmıştır.

Bu esnada silikon yüzeyinde bir miktar oksit tabakası oluşabileceğinden bu tabakanın etkisini en az düzeye indirebilmek için, teflon beher içerisindeki deiyonize suya (480ml), HF (20ml) eklenmiştir. Oluşan karışıma silisyum kristal konularak 2 dakika çalkalanmış, bolca deiyonize su ile durulanmış ve azot (N_2) gazı ile kurutulmuştur.



Resim 3.4. Kristal temizliği aşamasında kullanılan ısıtıcı düzeneği

3.1.2. Au/n-Si/Al Schottky diyotların hazırlanması

Kimyasal temizlik işleminden hemen sonra, hızlı bir şekilde n-Si kristali buharlaştırma sistemine (Resim 3.5) konulmuştur. 3.1.1. bölümünde n-Si kristalin temizlenmesinde anlatılan ilk üç aşama, omik ve doğrultucu kontakları hazırlamak için kullanılan bütün parçaların ve metallerin temizliğinde kullanılmıştır.



Resim 3.5. Au/n-Si/Al Schottky diyotların hazırlanması için kullanılan “Edwards” marka buharlaştırma sistemi

İlk olarak omik kontak için uygun maske seçilmiştir (Resim 3.6). Maskeye silisyum kristali konularak, buharlaştırma sisteminin numune tutucularına yerleştirilmiştir (Resim 3.7). Omik kontak yapımında kullanılan alüminyum (Al, % 99.999 saflıkta) metali, sistemin elektrotları arasındaki spiral tungsten pota içerisine yerleştirilmiştir (Resim 3.8). Vakum odası basınç değeri 5×10^{-6} Torr olduğunda elektrotlara gerilim uygulanmaya başlanmıştır.

Potadan geçen akımın artmasıyla, metalin buharlaştırılma işlemide başlamıştır. Omik kontak için 150 nm alüminyum kalınlığına ulaştıktan sonra buharlaştırma işlemi sonlandırılmıştır. Oluşturulan film kalınlığı bir kalınlık ölçer ile belirlenmiştir (Resim 3.9). Film oluşturma işlemi tamamlandıktan sonra pota çıkartılarak, yerine tungsten bir levha takılmıştır (Resim 3.10). Bu levha üzerine (alüminyum kaplanmış yüzeyi üste gelecek şekilde) silisyum kristali yerleştirilmiştir. Levhaya gerilim uygulandıktan bir süre sonra alüminyum kaplı yüzey silisyum içerisine çökerek omik kontak oluşmuştur. Ölçümler esnasında elektriksel iletkenliğin daha iyi sağlanabilmesi amacıyla önceki pota takılarak çöktürülen tabaka üzerine tekrar alüminyum ($\approx 1500\text{\AA}$) kaplanmıştır.



Resim 3.6. Omik kontağın oluşturulması için kullanılan metal maske



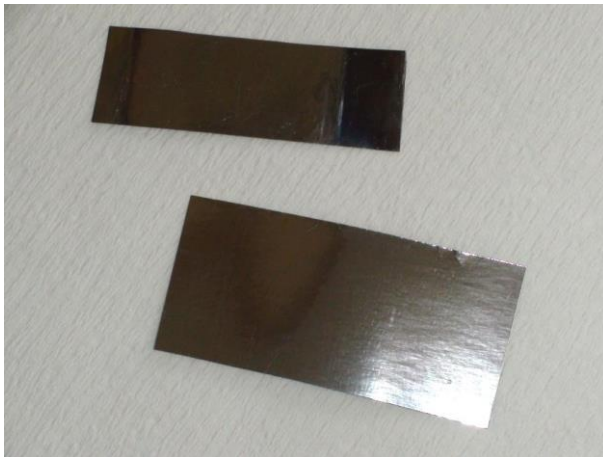
Resim 3.7. Numune tutucu içerisine maske ile yerleştirilmiş silisyum kristali



Resim 3.8. Buharlaştırma işleminde kullanılan tungsten pota



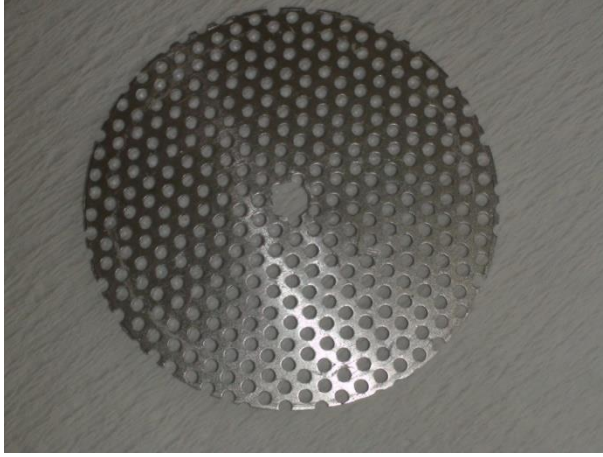
Resim 3.9. “Edwards FTM6” marka kalınlık ölçer



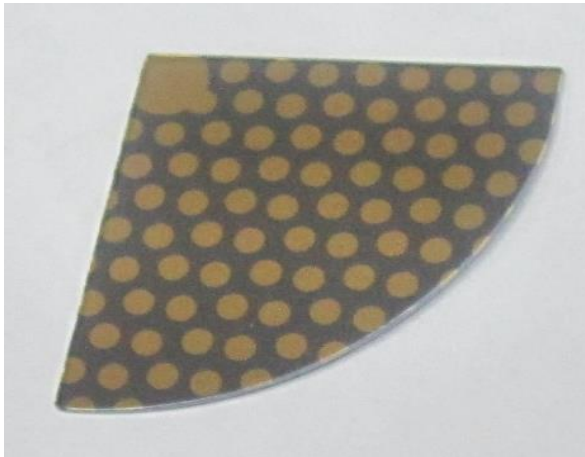
Resim 3.10. Omik kontak oluşumunda kullanılan tungsten levhalar

Doğrultucu kontak oluşturmak için 1,7 mm çaplı deliklere sahip maske seçilmiştir (Resim 3.11). Maskeye silisyum tabakası (metal kaplanmamış yüzeyi alta gelecek şekilde) konularak, buharlaştırma sisteminin numune tutucularına yerleştirilmiştir. Vakum odasında basınç 5×10^{-6} Torr'a ulaşınca doğrultucu kontak için 200 nm kalınlığında altın (Au, %99.99 saflıkta) metali biriktirilmiştir (2000Å).

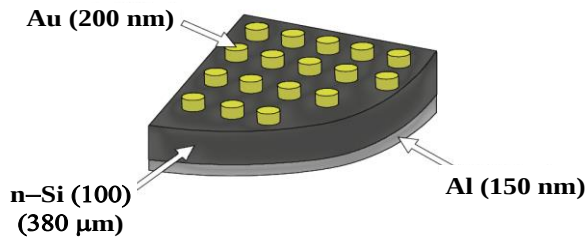
Sonuç olarak, aynı şartlarda hazırlanmış özdeş 50 adet Au (200 nm)/n-Si (380 µm)/Al (150 nm) Schottky diyot yapısı üretilmiş oldu. Resim 3.12 ve 3.13'de, sırasıyla çeyrek silisyum alttabaka üzerinde üretilen Au/n-Si/Al Schottky diyotların görüntüsü ve şematik diyagramı görülmektedir.



Resim 3.11. Doğrultucu kontak oluşumunda kullanılan metal maske



Resim 3.12. Çeyrek silisyum alttabaka üzerinde oluşturulan Au/n-Si/Al Schottky yapılarının görüntüsü



Resim 3.13. Oluşturulan Au/n-Si/Al Schottky yapılarının şematik diyagramı

3.2. Kullanılan Ölçüm Cihazları ve Düzenekleri

Üretilen 50 adet Au/n-Si/Al Schottky diyotun, oda sıcaklığında akım-gerilim ölçümleri için Keithley 2400 Source Meter cihazı, kapasite-gerilim ve iletkenlik gerilim ölçümleri için ise HP Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer cihazı kullanılmıştır (Resim 3.14).



Resim 3.14. Bilgisayar kontrollü HP Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer (soldaki) ve Keithley 2400 Source Meter (sağdaki) cihazları

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Giriş

Aynı şartlar altında üretilen 50 adet özdeş Au/n-Si(100)/Al diyotların akım-gerilim (I-V), kapasite-gerilim (C-V), iletkenlik-gerilim (G-V) eğrileri yardımıyla; doyma akımı (I_0), idealite faktörü (n), engel yüksekliği (Φ_B), difüzyon potansiyeli (V_d), Fermi enerjisi (E_F), tüketim tabakası genişliği (W_D), yüzey durumları (N_{ss}), Schottky alçalması ($\Delta\Phi_B$), maksimum elektrik alan (E_m) gibi diyot parametreleri elde edilmiştir. Norde ve Cheung metodları yardımıyla diyotların seri dirençleri hesaplanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Diyottan diyota engel yüksekliği değerlerinin değişmesinden dolayı engel yüksekliği homojensizliği belirlenmiş ve hesaplanan parametrelerin istatistiksel (Gaussian) dağılımları da ayrıca incelenmiştir.

4.2. Düz Beslem Akım-Gerilim Karakteristikleri

Şekil 4.1 ve 4.2’de 50 adet Au/n-Si/Al Schottky diyota ait sırasıyla düz ve ters beslem akım-gerilim (I-V) ve $\ln(I)$ -V karakteristikleri verilmiştir. Ölçümler -2 V ve 2 V arasında alınmıştır. Termiyonik emisyon teorisine göre, akım ve gerilim arasındaki bağıntı [9,10,43,53-55],

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) \right] \quad (4.1)$$

ile verilir. Burada q elektron yükünü, V diyot gerilimini, k Boltzmann sabitini ve T Kelvin cinsinden sıcaklığı ifade etmektedir. I_0 çoğunluk taşıyıcıları için ters doyum akımı olup,

$$I_0 = AA^*T^2 \exp \left[\frac{-q\Phi_B}{kT} \right] \quad (4.2)$$

ile ifade edilir. Burada A^* , A ve Φ_B sırasıyla Richardson sabiti, diyot alanı, Schottky engel yüksekliğidir. İdeallikten sapmayı belirlemek için Eş. 4.1 ifadesine ideallik faktörü (n) olarak adlandırılan bir ifade eklenir. Bu durumda Eş. 4.1;

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (4.3)$$

şeklinde ifade edilir. Burada ideallik faktörü ara yüzey durumlarına, uygulanan gerilime ve sıcaklığa bağlı olup, değeri 1'den büyüktür. Elde edilen yapıların ideallik faktörleri yarı logaritmik I-V eğrisinin eğiminden hesaplanmıştır (Eş. 4.4).

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4.4)$$

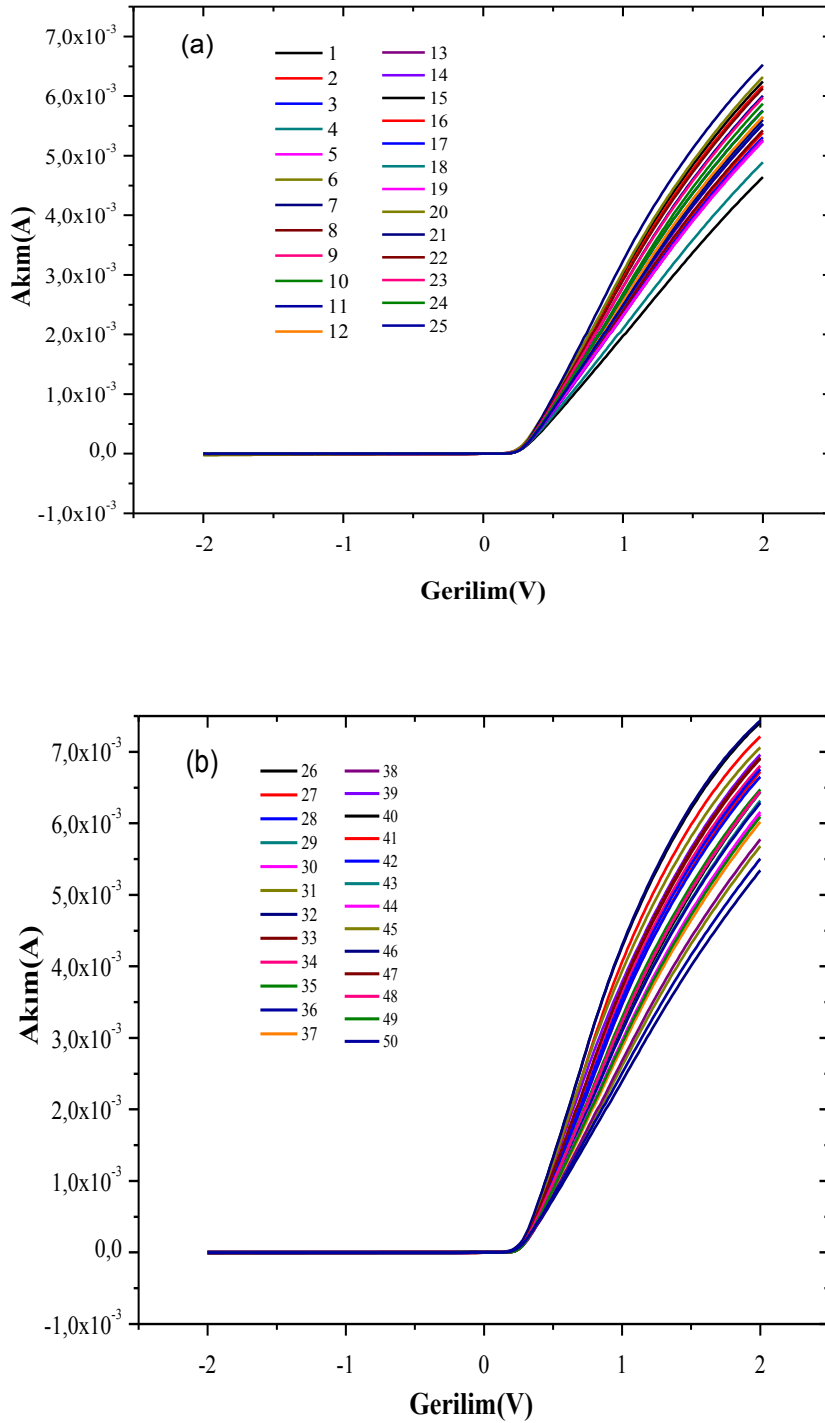
Şekil 4.2'de lineer eğrinin akım eksenini kestiği noktadan I_0 doyma akımının değeri elde edilmiştir. Eş. 4.2 ve Eş. 4.4 ifadeleri kullanılarak Φ_B ve n değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 4.1'de tüm diyotlar için I-V eğrilerinden elde edilen I_0 , Φ_B ve n değerleri verilmiştir. Kristal yüzeyindeki diyotların oluşturduğu homojensizlikler nedeniyle engel yükseklikleri farklı değerler almaktadır.

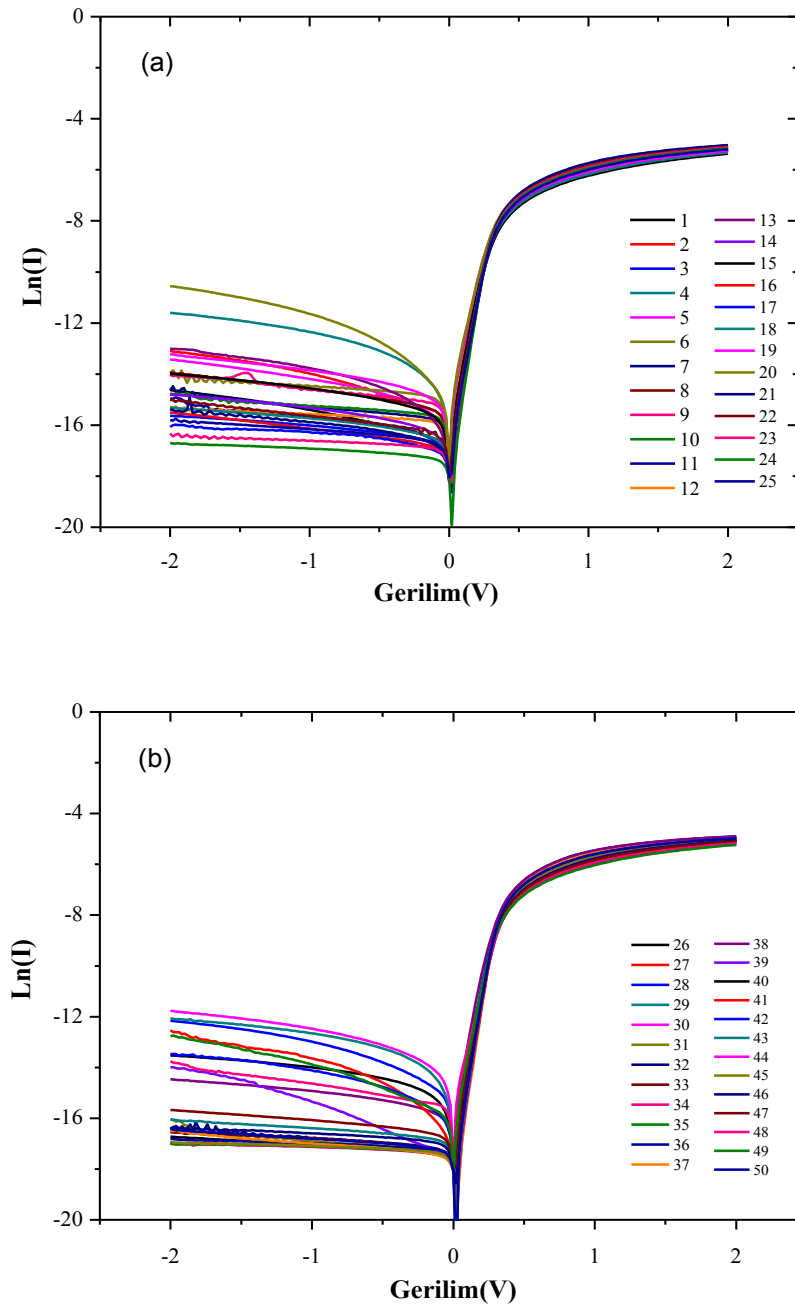
Yapıların seri dirençleri sıfırdan farklı olduğu için, gerilim arttıkça $\ln I$ -V eğrilerinin yüksek gerilim değerlerinde büküldüğü görülmektedir (Şekil 4.2). Bu değişim seri direncin (R_s) etkin olduğu bölgeye karşılık gelir. Bu yüzden R_s değerleri 50 diyot için hesaplanmış, yöntem olarak da Norde ve Cheung metodları kullanılmıştır. Şekil 4.3, 50 adet Au/n-Si/Al Schottky diyot için idealite faktörlerinin fonksiyonu olarak engel yüksekliklerinin eğrisini gösterir. Şekilden görülebildiği gibi, engel yüksekliği azalırken idealite faktörleri artmaktadır. Bu bulgular Au/n-Si kontakta engel yüksekliklerin yanıl homojensizliğine atfedilmiştir [25-33] ve Φ_B 'nin n 'e karşılık ekstrapolasyonundan, yanıl homojen engel yüksekliği değeri 0,802 eV olarak elde edilmiştir. Bu değer, konvansiyonel Au/n-Si Schottky yapılar için belirlenen 0,80 eV'luk değerle [9] aynı bulunmuştur.

Cheung yöntemine göre diyotların seri dirençleri Eş. 2.42, Eş. 2.43 ve Eş. 2.44 denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 4.4 (a) ve (b)'de 50 diyot için $dV/d(\ln I)$ -I eğrileri verilmiştir. Çizilen eğrilerin düşey eksenini kestiği noktadan idealite faktörleri (n), doğruların eğiminden ise seri direnç (R_s) değerleri elde edilmiştir.

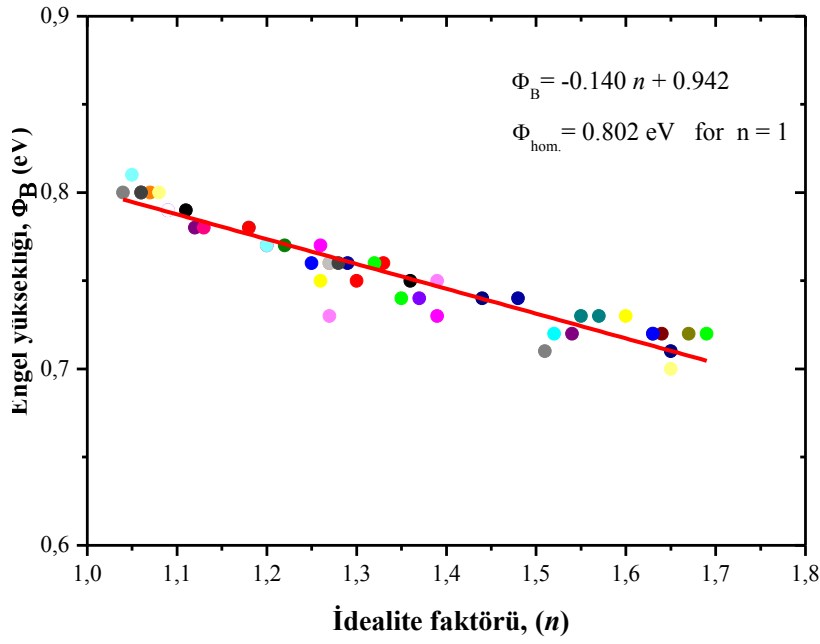
Eş. 2.44 ifadesinden yararlanarak diyotların $H(I)$ - I grafikleri çizilmiştir (Şekil 4.5). Grafiklerden elde edilen doğruların eğimlerinden diyotların seri direnç (R_s) değerleri, $H(I)$ eksenini kestiği noktadan ise engel yüksekliği (Φ_B) değerleri elde edilmiştir. Çizelge 4.2’de Cheung metodu ile elde edilen R_s , n ve Φ_B değerleri verilmiştir.



Şekil 4.1. Tüm Au/n-Si(100)/Al Schottky diyotlarının düz beslem I-V karakteristikleri:
a) 1’den 25 nolu numuneye kadar b) 26’dan 50 nolu numuneye kadar



Şekil 4.2. Tüm Au/n-Si(100)/Al Schottky diyotlarının yarı logaritmik düz beslem I-V karakteristikleri: a) 1'den 25 nolu numuneye kadar b) 26'dan 50 nolu numuneye kadar



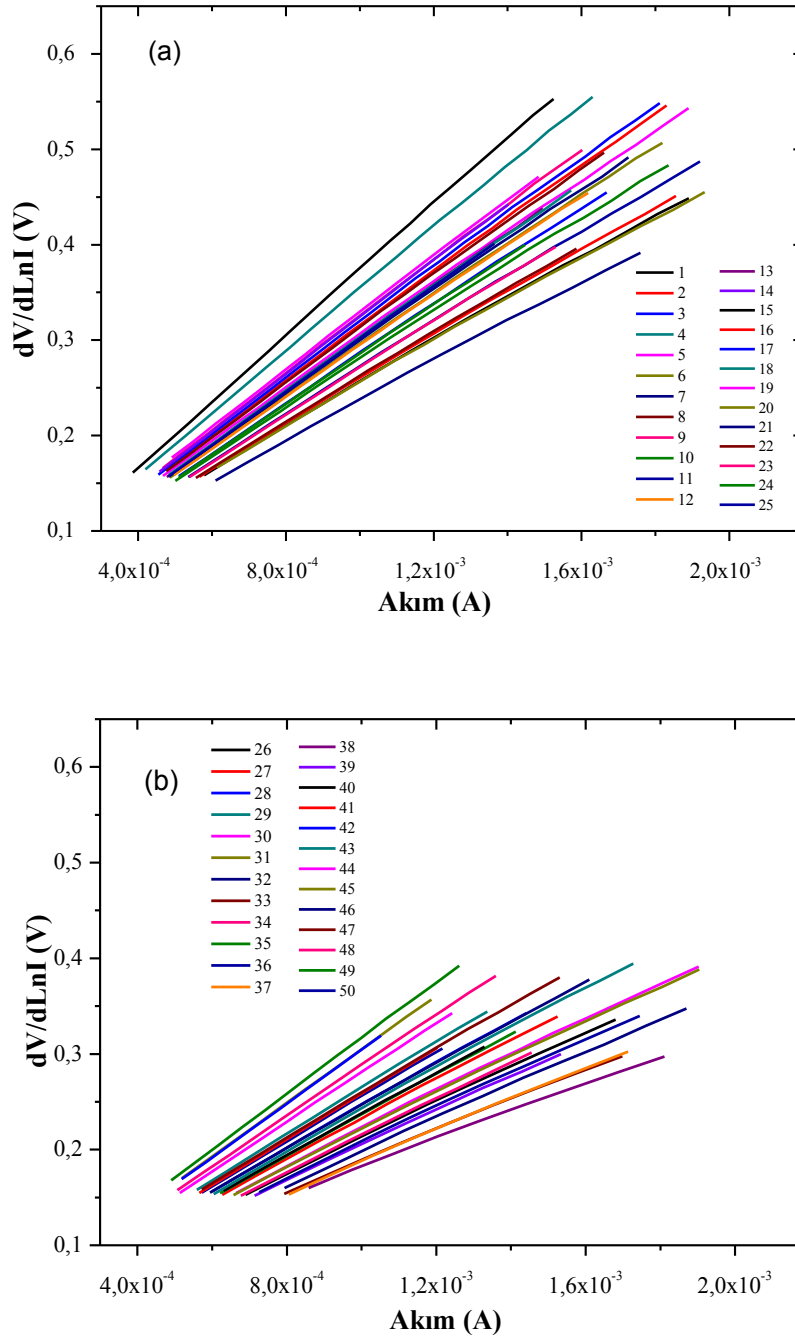
Şekil 4.3. 50 adet Au/n-Si(100)/Al Schottky diyot için idealite faktörünün fonksiyonu olarak engel yüksekliğinin eğrisi

Çizelge 4.1. Au/n-Si(100)/Al Schottky diyotlarının I-V ölçümlerinden elde edilen n , I_0 , Φ_B ve N_{ss} değerleri

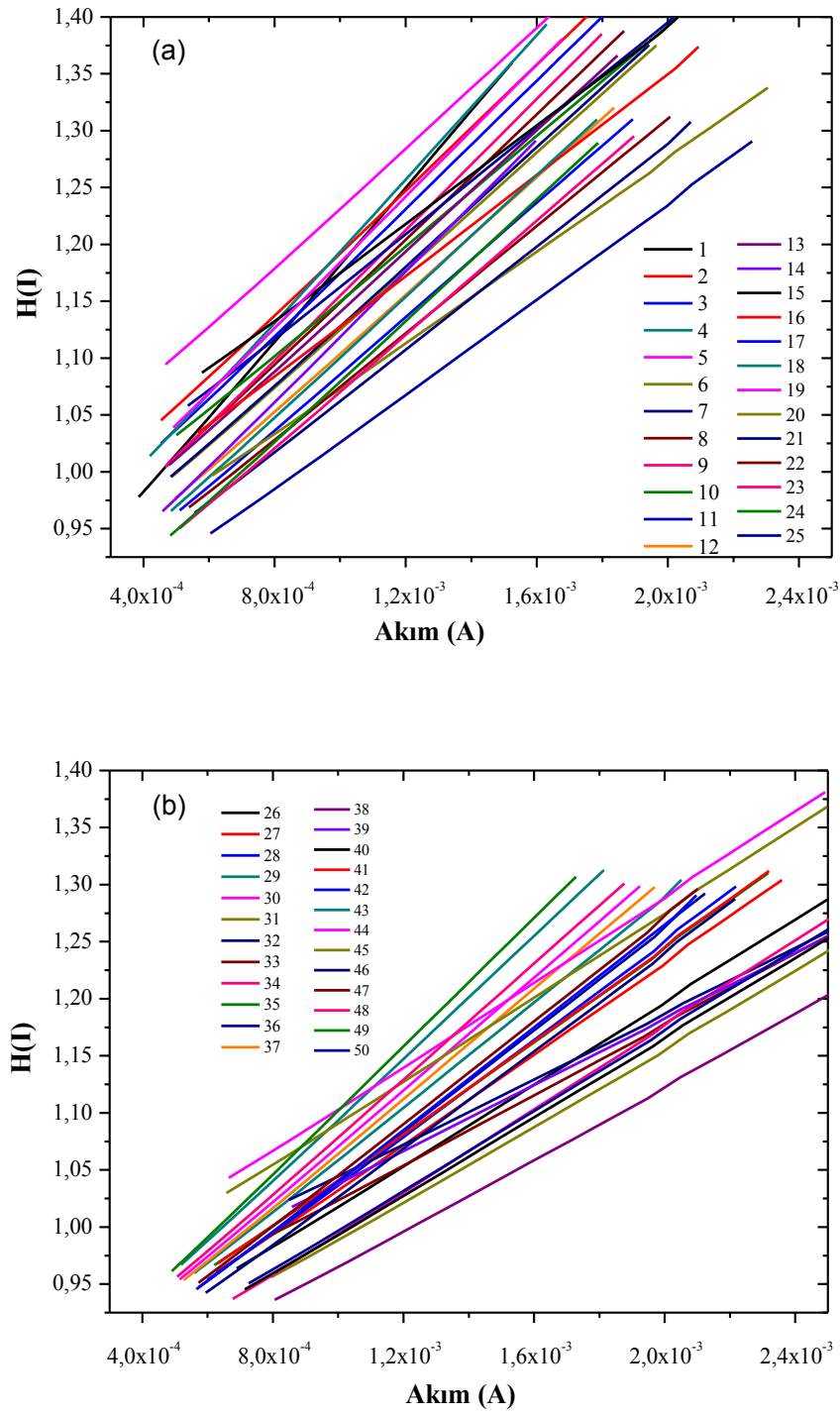
DİYOT SAYISI	n	Φ_B (eV)	I_0 ($\times 10^{-8}$ A)	N_{ss} ($\times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$)	DİYOT SAYISI	n	Φ_B (eV)	I_0 ($\times 10^{-8}$ A)	N_{ss} ($\times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$)
1	1,30	0,75	4,1	6,93	26	1,32	0,76	3,8	6,32
2	1,69	0,72	16,1	15,70	27	1,63	0,72	15,8	14,19
3	1,25	0,76	3,5	2,36	28	1,18	0,78	1,4	5,43
4	1,52	0,72	15,2	10,98	29	1,26	0,77	2,4	8,85
5	1,39	0,73	9,2	8,30	30	1,26	0,75	4,1	8,61
6	1,60	0,73	11,2	12,62	31	1,67	0,72	16,2	18,83
7	1,63	0,72	13,5	15,99	32	1,44	0,74	8,1	9,77
8	1,65	0,71	20,7	14,37	33	1,12	0,78	1,2	2,70
9	1,54	0,72	16,4	10,09	34	1,06	0,80	0,7	1,83
10	1,64	0,72	12,7	16,75	35	1,06	0,80	0,7	1,88

Çizelge 4.1. (devam) Au/n-Si(100)/Al Schottky diyotlarının I-V ölçümlerinden elde edilen n , I_o , Φ_B ve N_{ss} değerleri

DİYOT SAYISI	n	Φ_B (eV)	I_o ($\times 10^{-8}$ A)	N_{ss} ($\times 10^{11}$ eV $^{-1}$ cm $^{-2}$)	DİYOT SAYISI	n	Φ_B (eV)	I_o ($\times 10^{-8}$ A)	N_{ss} ($\times 10^{11}$ eV $^{-1}$ cm $^{-2}$)
11	1,22	0,77	2,4	5,12	36	1,55	0,73	10,4	16,80
12	1,57	0,73	12,2	16,85	37	1,48	0,74	8,0	13,88
13	1,29	0,76	2,8	7,29	38	1,07	0,80	0,7	2,05
14	1,27	0,76	3,8	5,54	39	1,09	0,79	1,0	1,67
15	1,37	0,74	7,2	8,94	40	1,13	0,78	1,3	2,63
16	1,20	0,77	2,2	5,97	41	1,09	0,79	0,9	2,74
17	1,24	0,77	2,4	7,58	42	1,06	0,80	0,7	1,98
18	1,27	0,76	3,4	6,67	43	1,04	0,80	0,6	1,29
19	1,51	0,71	19,3	12,46	44	1,08	0,80	0,8	1,97
20	1,65	0,70	27,8	12,74	45	1,05	0,81	0,5	1,08
21	1,20	0,77	1,9	48,91	46	1,27	0,73	0,9	6,26
22	1,39	0,75	5,3	14,24	47	1,06	0,80	0,7	1,99
23	1,28	0,76	2,7	9,34	48	1,36	0,75	4,6	10,56
24	1,11	0,79	1,0	3,00	49	1,18	0,78	1,4	4,95
25	1,33	0,76	3,7	7,62	50	1,35	0,74	6,8	7,76



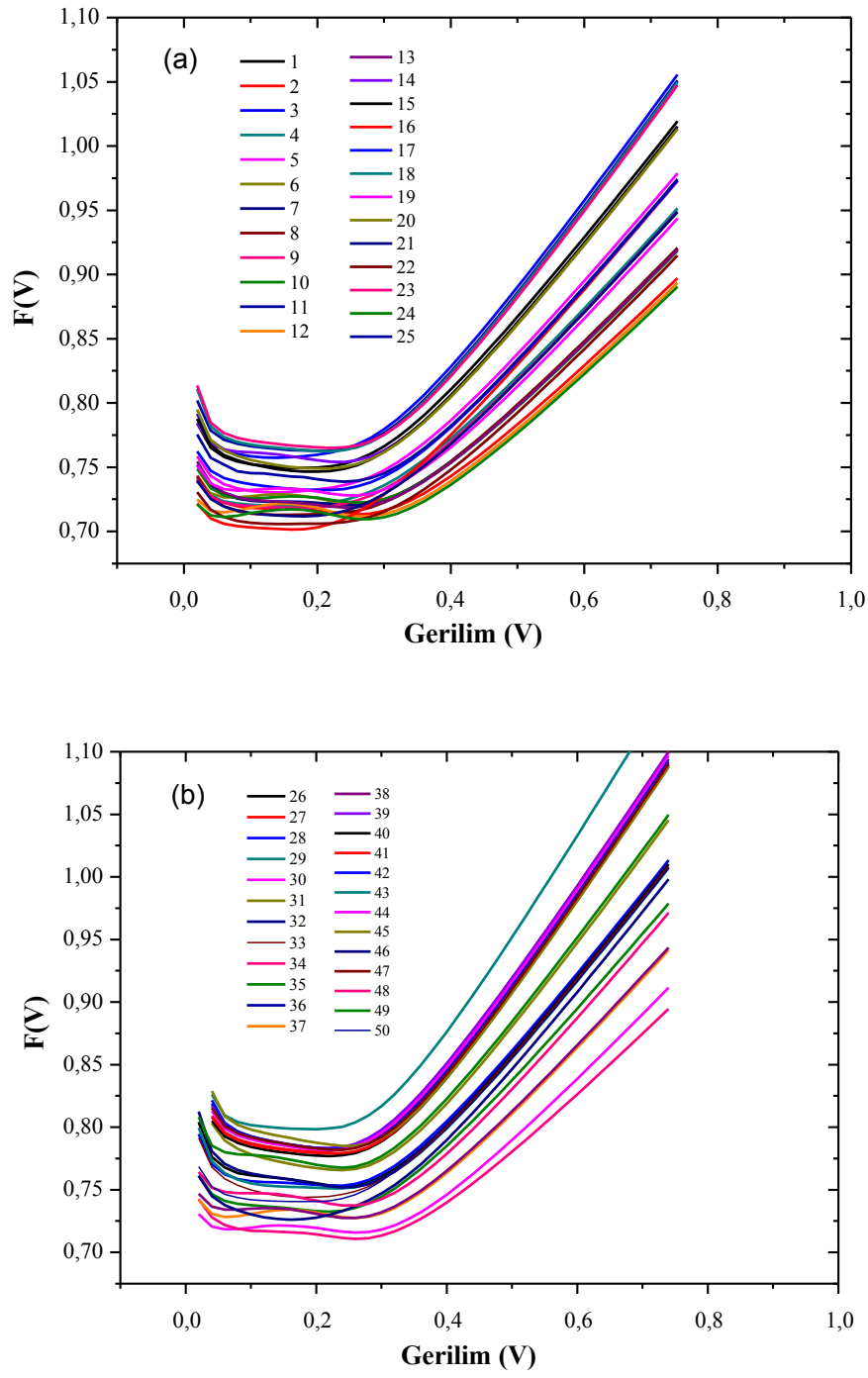
Şekil 4.4. Tüm Au/n-Si(100)/Al Schottky diyotlarının $dV/d\ln(I)$ -I eğrileri:
 a) 1'den 25 nolu numuneye kadar b) 26'dan 50 nolu numuneye kadar



Çizelge 4.2. Cheung metodu ile elde edilen R_s , n ve Φ_B değerleri

Diyot Sayısı	(dv/dlnI)-I		H(I)-I		Diyot Sayısı	(dv/dlnI)-I		H(I)-I	
	R_s (Ω)	n	Φ_B (eV)	R_s (Ω)		R_s (Ω)	n	Φ_B (eV)	R_s (Ω)
1	346,5	1,07	0,791	336,2	26	215,0	1,03	0,792	209,6
2	282,9	1,20	0,759	274,5	27	190,7	1,22	0,746	186,0
3	288,0	1,17	0,765	279,7	28	189,7	1,20	0,754	184,7
4	324,1	1,14	0,769	314,5	29	219,3	1,02	0,795	213,0
5	271,0	1,30	0,742	263,1	30	232,0	1,04	0,789	225,2
6	265,7	1,11	0,777	257,6	31	260,7	1,04	0,792	252,5
7	269,2	1,11	0,776	261,2	32	288,9	1,05	0,783	282,0
8	282,4	1,14	0,768	274,0	33	180,6	1,05	0,781	175,6
9	295,1	1,13	0,768	286,3	34	184,8	1,07	0,780	179,4
10	248,7	1,19	0,763	241,7	35	204,3	1,06	0,784	198,8
11	238,6	1,24	0,748	232,6	36	218,9	1,04	0,786	215,3
12	265,6	1,08	0,783	257,2	37	236,7	1,05	0,786	229,7
13	272,2	1,13	0,772	267,6	38	252,9	1,03	0,795	244,9
14	296,3	1,05	0,789	287,6	39	277,8	1,02	0,786	268,8
15	221,5	1,30	0,735	215,8	40	173,3	1,06	0,767	169,5
16	227,9	1,20	0,755	220,5	41	159,3	1,14	0,762	154,7
17	257,7	1,06	0,787	249,7	42	192,0	1,02	0,795	185,5
18	274,4	1,05	0,789	265,7	43	208,0	1,07	0,780	203,0
19	297,8	1,20	0,745	288,7	44	228,1	1,03	0,793	222,0
20	218,4	1,40	0,713	213,0	45	161,4	1,02	0,782	160,0
21	207,4	1,13	0,769	201,9	46	149,3	1,19	0,748	144,6
22	233,6	1,06	0,787	226,3	47	178,0	1,03	0,788	173,0
23	242,7	1,07	0,785	236,4	48	208,8	1,07	0,776	203,9
24	257,8	1,03	0,796	251,6	49	230,8	1,02	0,794	224,2
25	274,7	1,01	0,801	267,9	50	275,9	1,05	0,781	267,5

Norde [50] yöntemine göre diyotların seri direnç değerleri Eş. 2.38 ifadesi yardımıyla çizilen $F(V)$ - V eğrilerinden elde edilmiştir. Eş. 2.38 ifadesinde bulunan keyfi sabit değeri, her bir diyot için o diyotun ideallik faktöründen büyük ve ilk tam sayı olacak şekilde alındı. Şekil 4.6'da tüm Au/n-Si(100)/Al Schottky diyotların $F(V)$ - V eğrileri görülmektedir. Şekil 4.6 incelendiğinde her diyota ait $F(V)$ fonksiyonu bir minimumdan geçmektedir. Eğrilerin minimum noktaları kullanılarak Eş. 2.39 ve Eş. 2.40 denklemlerinden Φ_B ve R_s değerleri belirlenmiştir ve Çizelge 4.3 de verilmiştir. Norde yönteminden elde edilen veriler ile Cheung yöntemiyle [52] elde edilen verileri kıyasladığımızda uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

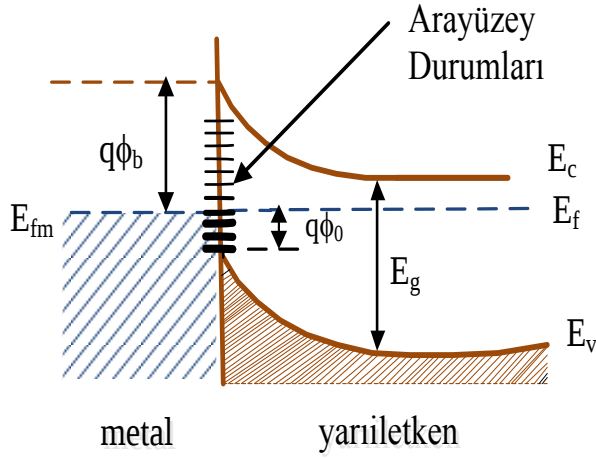


Şekil 4.6. Tüm Au/n-Si(100)/Al Schottky diyotlarının $F(V)$ - V eğrileri:
 a) 1'den 25 nolu numuneye kadar b) 26'dan 50 nolu numuneye kadar

Çizelge 4.3. F(V) fonksiyonu yardımıyla elde edilmiş Φ_B ve R_s değerleri

Diyot Sayısı	R_s (Ω)	Φ_B (eV)	Diyot Sayısı	R_s (Ω)	Φ_B (eV)
1	315,4	0,852	26	88,3	0,882
2	44,2	0,832	27	20,9	0,843
3	462,5	0,839	28	67,7	0,924
4	219,2	0,794	29	66,4	0,897
5	593,4	0,798	30	255,6	0,846
6	41,9	0,849	31	38,4	0,829
7	40,3	0,848	32	45,9	0,853
8	212,4	0,769	33	117,3	0,936
9	95,6	0,805	34	69,3	0,956
10	26,1	0,850	35	72,0	0,957
11	145,3	0,890	36	36,6	0,864
12	77,0	0,834	37	36,5	0,864
13	77,2	0,899	38	141,9	0,941
14	210,6	0,864	39	406,9	0,872
15	102,4	0,853	40	110,4	0,934
16	108,3	0,906	41	119,4	0,936
17	63,0	0,908	42	71,9	0,957
18	218,0	0,866	43	268,1	0,954
19	112,8	0,798	44	132,9	0,939
20	150,1	0,762	45	78,8	0,959
21	120,0	0,908	46	223,2	0,815
22	66,5	0,872	47	70,1	0,956
23	83,7	0,898	48	35,3	0,885
24	215,3	0,921	49	72,8	0,926
25	80,3	0,885	50	224,3	0,843

Schottky diyotların kimyasal temizleme aşamaları sırasında kalınlığı genelde 10-20 Å olan [9,10], yarıiletken yüzeyinde bir arayüzey tabakasının oluşması mümkündür [25-27]. Şekil 4.7, metal/yarıiletken kontaklarda arayüzey durumlarının yerini gösterir. Arayüzey tabakası veya arayüzey durumları, yarıiletken yasak enerji bant aralığında olup belirli bir yoğunluğa sahiptir. I-V eğrileri kullanılarak Schottky yapılarının arayüzey tuzak yoğunlukları (N_{ss}) yeterince ince bir arayüzey tabakası için Eş. 2.52 ifadesinden elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Metal/yarıiletken kontaklarda arayüzey durumlarının yeri [9,10]

Arayüzey tabakasının veya arayüzey durumlarının varlığında uygulanan gerilime bağlı olarak engel yüksekliğinin değişimi,

$$\frac{d\Phi_e}{dV} = \Gamma = \left(1 - \frac{1}{n(V)}\right) \quad (4.5)$$

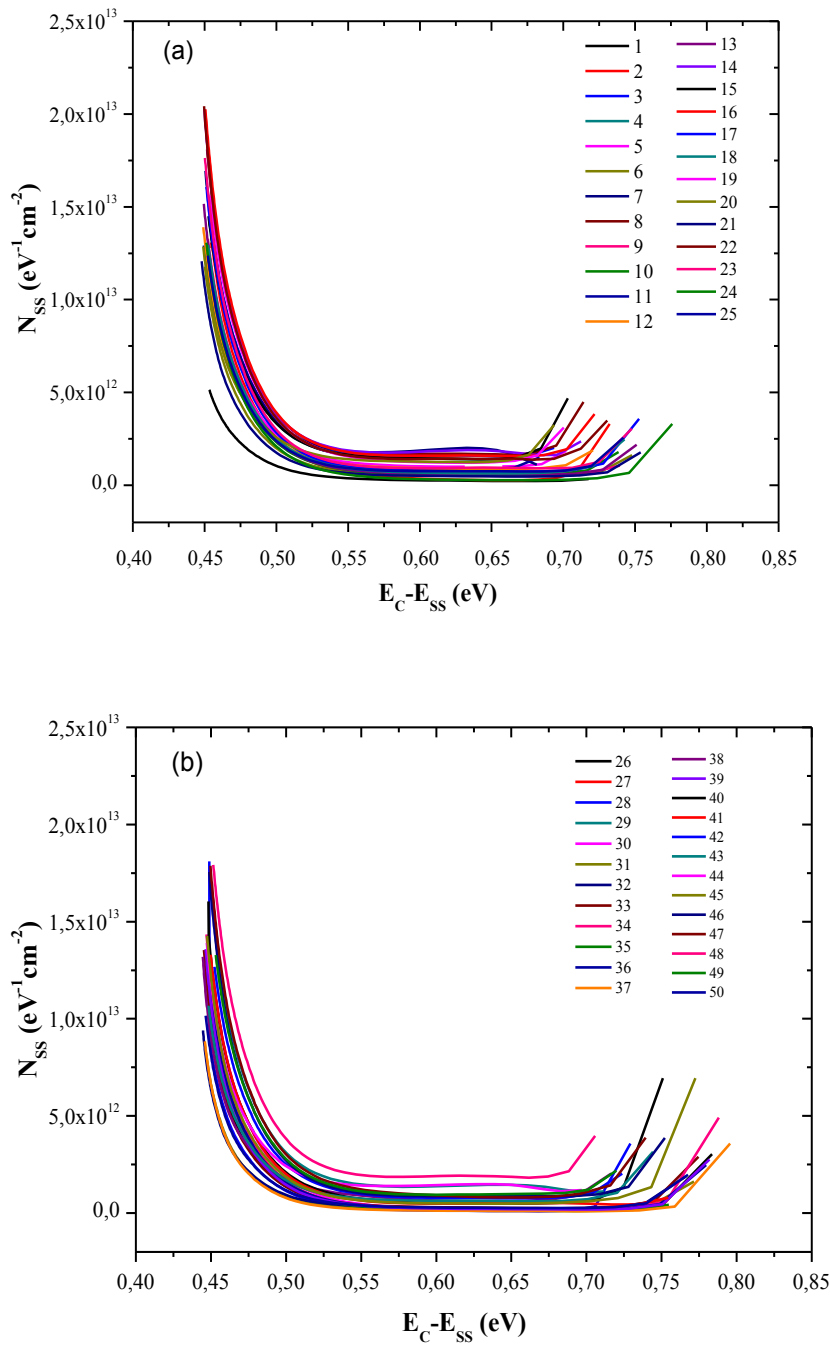
ile verilir. Burada Φ_e etkin engel yüksekliği ve Γ , etkin engel yüksekliğinin gerilim katsayısıdır. Gerilime bağlı etkin engel yüksekliği,

$$\Phi_e = \Phi_{bo} + \Gamma V \quad (4.6)$$

olarak ifade edilir. n-tipi bir yarıiletken için iletim bandının alt seviyesine göre arayüzey durumlarının enerjileri (E_{ss});

$$E_c - E_{ss} = q(\Phi_e - V) \quad (4.7)$$

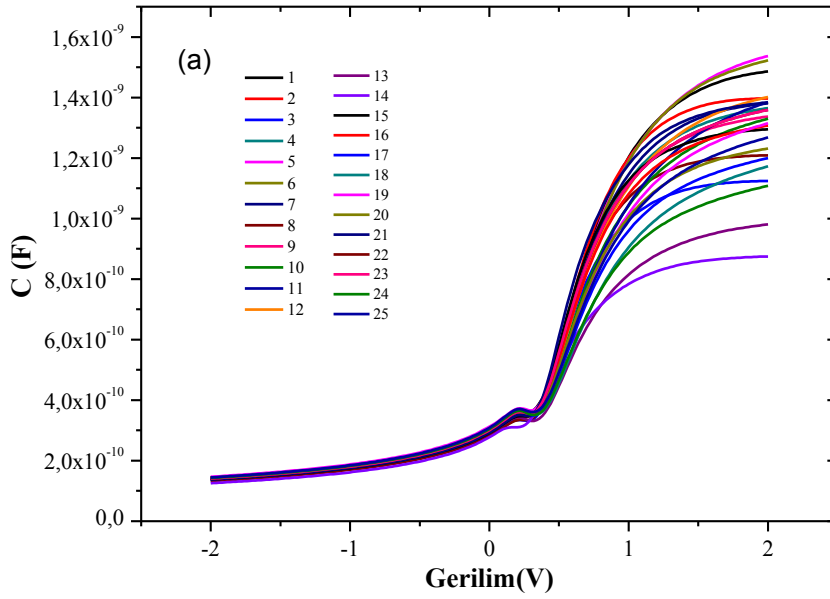
ile verilir. Arayüzey durum yoğunluklarının enerjiye bağlı dağılımları Şekil 4.8’de verilmiştir. Yasak enerji bant aralığının ortasından başlayarak bir minimumdan geçen arayüzey durumları, iletim bandının alt seviyesine doğru artış göstermektedir. Çizelge 4.1’de 50 adet diyot için hesaplanan ortalama arayüzey durumlarının değerleri verilmiştir.



Şekil 4.8. Düz beslem I-V eğrileri kullanılarak elde edilmiş arayüzey durum yoğunluklarının enerjiye bağlı dağılımları; a) 1'den 25 nolu numuneye kadar b) 26'dan 50 nolu numuneye kadar

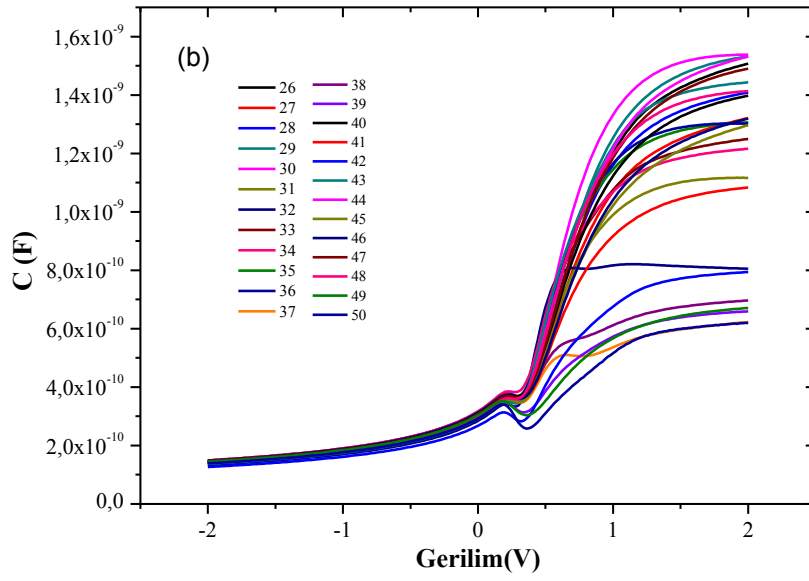
4.3. Kapasite-Gerilim ve İletkenlik-Gerilim Karakteristikleri

Aynı şartlar altında üretilen 50 adet özdeş Au/n-Si(100)/Al Schottky diyotlarının kapasite-gerilim (C-V) ve iletkenlik-gerilim (G-V) ölçümleri -2V ile 2V gerilim aralığında, 1 MHz frekansta ve oda sıcaklığında yapılmıştır. Arayüzey durumlarının diyot parametrelerine olan etkisini ihmal edebilmek için yüksek frekansta ($f \geq 500$ kHz) diyot ölçümleri alınmaktadır [9,10,56,57]. C-V ölçümleri sonucunda yapıların difüzyon potansiyeli (V_d), engel yüksekliği (Φ_B), taşıyıcı yoğunluğu (N_d), Fermi enerji seviyesi (E_f), elektrik alan (E_m), tüketim tabakası genişliği (W_d), Schottky engel alçalması ($\Delta\Phi_B$) ve maksimum elektrik alan (E_m) gibi elektriksel parametreleri hesaplanmıştır. Au/n-Si/Al Schottky diyotlar için C-V ve G-V eğrileri Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmiştir.

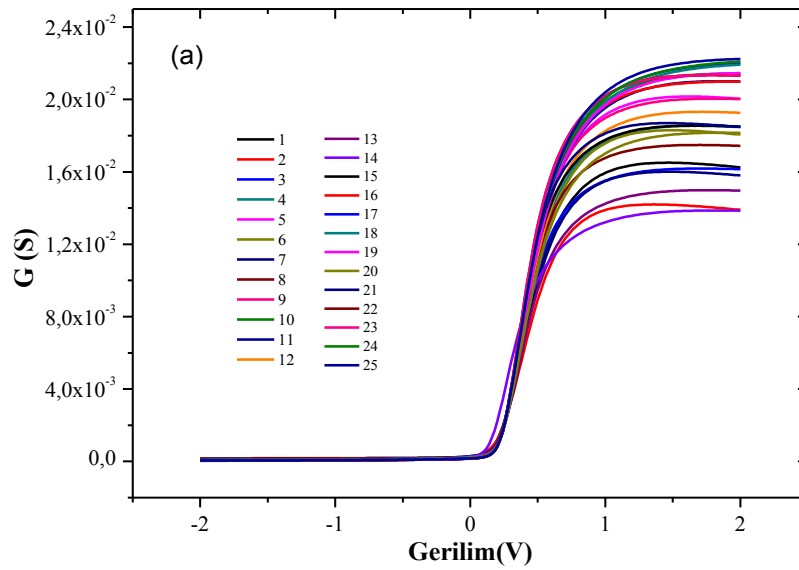


Şekil 4.9. Tüm Au/n-Si(100)/Al Schottky diyotlarının C-V eğrileri:

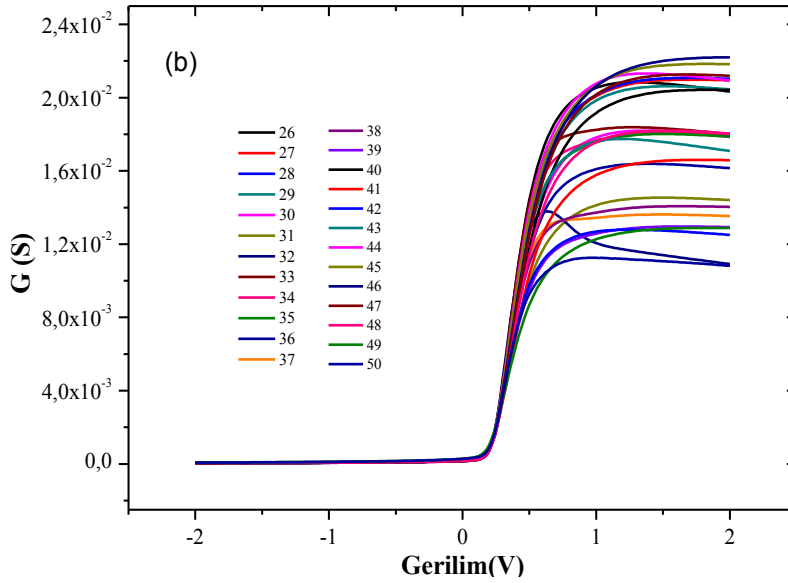
a) 1'den 25 nolu numuneye kadar b) 26'dan 50 nolu numuneye kadar



Şekil 4.9. (devam) Tüm Au/n-Si(100)/Al Schottky diyotlarının C-V eğrileri:
a) 1'den 25 nolu numuneye kadar b) 26'dan 50 nolu numuneye kadar



Şekil 4.10. Tüm Au/n-Si(100)/Al Schottky diyotlarının G-V eğrileri:
a) 1'den 25 nolu numuneye kadar b) 26'dan 50 nolu numuneye kadar



Şekil 4.10. (devam) Tüm Au/n-Si(100)/Al Schottky diyotlarının G-V eğrileri:
a) 1'den 25 nolu numuneye kadar b) 26'dan 50 nolu numuneye kadar

50 adet diyot için kapasite-gerilim eğrileri sıfır beslem yakınlarında arayüzey durumlarının lokalize olması nedeniyle pikler vermektedir (Şekil 4.9). İletkenlik-gerilim eğrileri incelenirse, artan beslemle arttığı görülmektedir (Şekil 4.10). Diyotların elektriksel karakteristiklerine etki eden seri direnç (R_s) etkisini ortadan kaldırmak için admittans tekniği kullanılarak [9,10,57],

$$R_s = \frac{G_{m,acc}}{(G_{m,acc}^2 + \omega^2 C_{m,acc}^2)} \quad (4.8)$$

ifadesi yardımıyla seri direnç değerleri hesaplanmıştır. Burada $C_{m,acc}$ ve $G_{m,acc}$ biriktirme (akümülayon) bölgesindeki ölçülmüş kapasite ve iletkenlik değerleridir. Şekil 4.11'de seridirenç-gerilim eğrileri görülmektedir. 50 adet diyot için arayüzey durumlarının yoğun olduğu sıfır beslem yakınlarında R_s değerleri pikler vermektedir.

50 adet diyot için Eş. 4.8 yardımıyla hesaplanan seri direnç (R_s) değerleri Çizelge 4.4'de verilmiştir. Çizelgeyi incelediğimizde R_s değerlerinin diyottan diyota değiştiği ve biriktirme bölgesinde elde edilen değerlerin 39,426-81,806Ω arasında değiştiği görülmüştür.

Seri direnç etkisi dikkate alırsa [57];

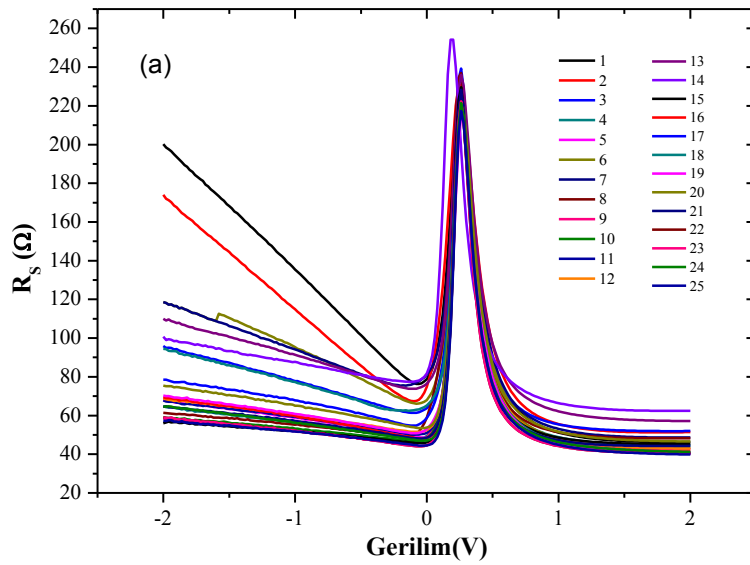
$$C_c = \frac{(G_m^2 + w^2 C_m^2) C_m}{a^2 + w^2 C_m^2} \quad (4.9)$$

$$G_c = \frac{(G_m^2 + w^2 C_m^2) a}{a^2 + w^2 C_m^2} \quad (4.10)$$

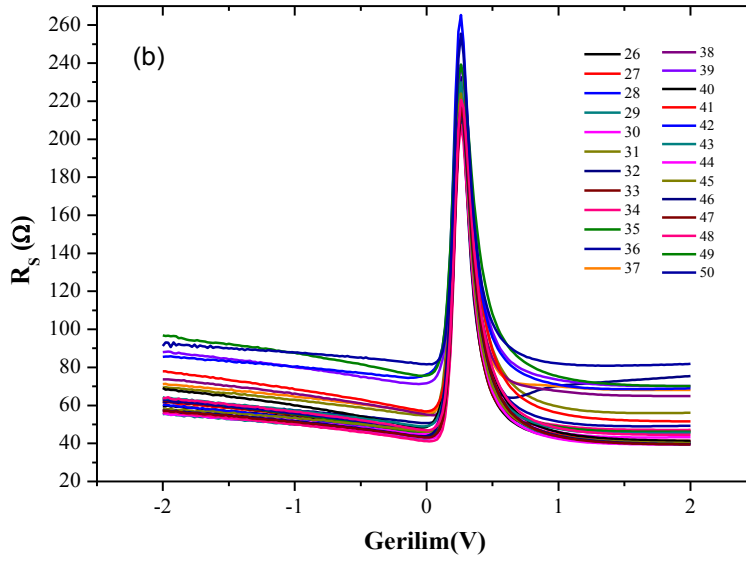
Kapasite ve iletkenlik eğrileri doğrultma ifadeleri yardımıyla yeniden çizildi. Burada a parametresi,

$$a = G_m - (G_m^2 + w^2 C_m^2) R \quad (4.11)$$

olup, C_m ölçülen kapasite, G_m ölçülen iletkenlik ve w , açısal frekanstır.



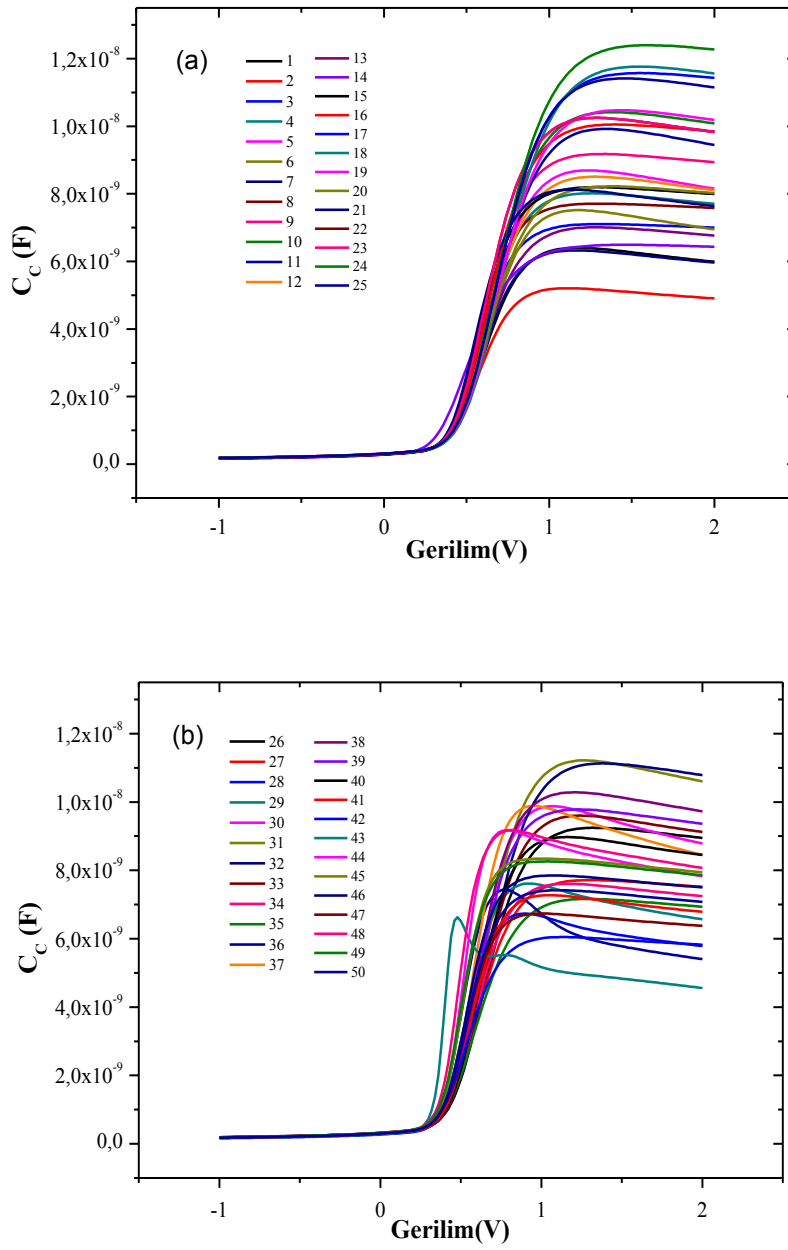
Şekil 4.11. Tüm Au/n-Si(100)/Al Schottky diyotlarının uygulanan gerilime bağlı seri direnç eğrileri: a) 1'den 25 nolu numuneye kadar
(b) 26'dan 50 nolu numuneye kadar



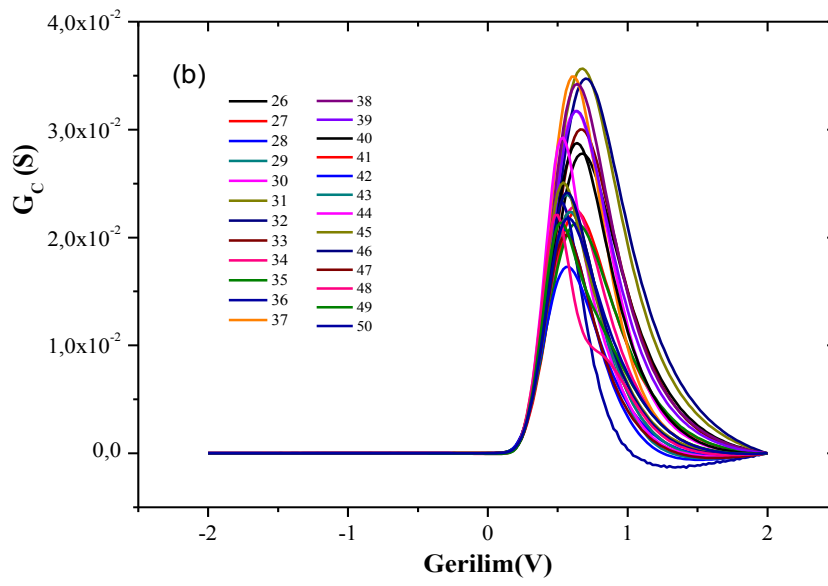
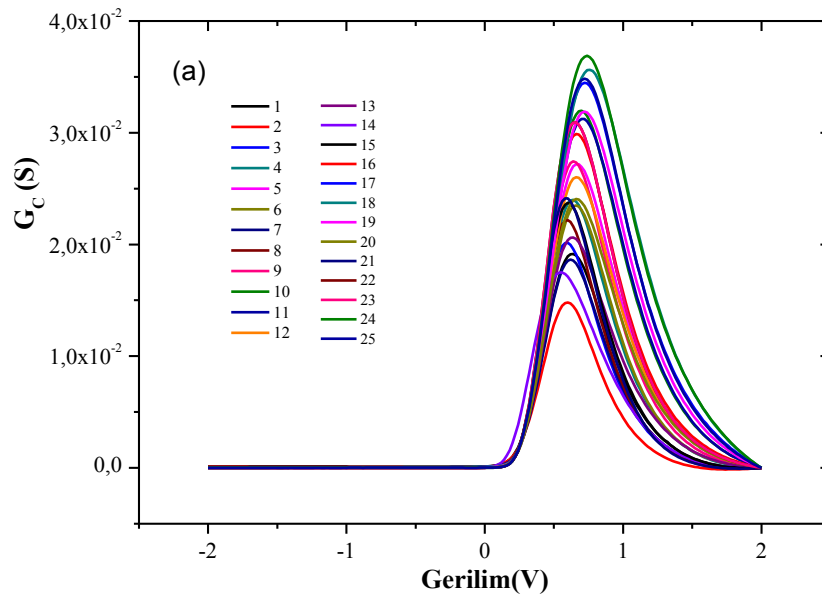
Şekil 4.11. (devam) Tüm Au/n-Si(100)/Al Schottky diyotlarının uygulanan gerilime bağlı seri direnç eğrileri: a) 1'den 25 nolu numuneye kadar
b) 26'dan 50 nolu numuneye kadar

Şekil 4.12 ve 4.13'de düzeltilmiş kapasite-gerilim ile iletkenlik-gerilim eğrileri verilmektedir. Düzeltilmiş iletkenlik eğrilerinin her birinde yapıların tüketme bölgesinde pikler meydana gelmiştir. Şekil 4.13'ü incelediğimizde arayüzey durumlarının yarıiletkenin yasak enerji bant aralığı boyunca dağılmış olduğunu görürüz.

Metal/yarıiletken yapılarda arayüzey tabakasındaki tuzaklanmış dipoller veya yarıiletken tarafında gövdede bulunan görüntü yükleri arayüzey durumlarını meydana getirerek C-V karakteristiklerine etki edebilir [43,58]. Arayüzey tabakasının kalınlığı, tünelleme engelini ve idealite faktörünü minimize ederken engel yüksekliğini maksimum yapacak bir kalınlık olmalıdır [43,59]. Bunun için optimal arayüzey tabakası kalınlığı 20 Å'dan daha az olmalıdır [43,60]. Yapıların arayüzey tabakası kalınlığı ortalama olarak 7,5 Å mertebesinde elde edilmiştir



Şekil 4.12. Seri direnç etkisi dikkate alınarak düzeltilmiş kapasite-gerilim eğrileri:
a) 1’den 25 nolu numuneye kadar b) 26’dan 50 nolu numuneye kadar



Şekil 4.13. Seri direnç etkisi dikkate alınarak düzeltilmiş kapasite-gerilim eğrileri:
 a) 1'den 25 nolu numuneye kadar b) 26'dan 50 nolu numuneye kadar

Oksit kapasitesi, biriktirme bölgesindeki C_c -V ve G_c -V ölçümlerinden (Şekil 4.12 ve 4.13),

$$C_{ox} = C_{c,acc} \left[1 + \left(\frac{G_{c,acc}}{WC_{c,acc}} \right)^2 \right] \quad (4.12)$$

ifadesi yardımıyla hesaplanmıştır. Arayüzey tabakasının kalınlığı yüksek frekans (1 MHz) C_c -V ölçümlerinden güçlü biriktirme bölgesi için ifadesi yardımıyla hesaplanmıştır. Burada $\epsilon_{ox} = 3,8\epsilon_0$ [9,10] arayüzey tabakasının dielektrik geçirgenliğidir.

Şekil 4.13'de görülen pik değerlerinden yapıların herbiri için arayüzey durum yoğunluk (N_{ss}) değerleri belirlenebilir. C-V ölçümlerinden tek frekans yaklaşımı kullanılarak arayüzey durumlarını tayin etmek mümkündür. Bu, hızlı ve güvenilir arayüzey durumları tayin etmede kullanılan Hill-Coleman metodudur [61]. Bu metotta,

$$N_{ss} = \left(\frac{2}{qA} \right) \left[\frac{\frac{G_{c,max}}{w}}{\left(\frac{G_{c,max}}{wC_{ox}} \right)^2 + \left(1 - \frac{C_c}{C_{ox}} \right)^2} \right] \quad (4.13)$$

ifadesi kullanılır. Burada q , elektrik yükü, w , açısal frekans, A , diyot alanı, C_{ox} biriktirme bölgesindeki oksit tabakası kapasitesi (geometrik kapasite), $G_{c,max}$ ve C_c , G-V ve C-V ölçümlerindeki maksimum iletkenlik ve kapasite değerleridir. Bu metot kullanılarak hesaplanmış arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}), $G_{c,max}$ ve C_c değerleri Çizelge 4.4'de 50 adet diyot için verilmiştir. Çizelgeyi incelediğimizde diyottan diyota bu parametrelerin farklı değerler aldığı görülmüştür. Bu parametrelerden bazıları, $G_{c,max}$, C_c ve N_{ss} parametre değerleri sırasıyla; 0,015-0,037 S, 2,988-6,652 nF ve $3,566$ - $6,848 \times 10^{12}$ eV cm⁻² olarak elde edilmiştir.

Şekil 4.14'de seri direnç etkisinin kapasite değerleri üzerine etkisi bertaraf edilerek çizilen C^{-2} -V eğrileri verilmiştir. Eğrileri incelediğimizde geniş bir gerilim aralığında lineer olduğunu görürüz. Arayüzey durumları yokken V_0 ile difüzyon potansiyeli (V_d) arasındaki bağıntı,

$$V_0 = \frac{E_g - \Phi_m + \chi}{q - \Phi_F - V_i} = V_d - \frac{kT}{q} \quad (4.14)$$

şeklindedir. Burada, E_g yasak enerji bant aralığı, Φ_m metal iş fonksiyonu, χ elektron yatkınlığı, Φ_F Fermi enerjisi ve V_i arayüzey üzerinde düşen potansiyeldir. Arayüzey durumları mevcutken V_o ile V_d arasındaki ilişki,

$$V_o = \left(V_d - \frac{kT}{q} \right) (1 + \alpha) \quad (4.15)$$

ile verilir [9,10]. Burada $\alpha = qN_{ss}d_{ox}/\epsilon_i$ ve $d_{ox} = \epsilon_{ox}A_{ox}/C_{ox}$ 'dır. Eğrilerin voltaj eksenini kesme gerilimleri (V_o) elde edilerek yapıların difüzyon potansiyelleri hesaplandı. Arayüzey durumlarının etkileri dikkate alındığında C^{-2} -V doğrularının eğimi,

$$\frac{dC^{-2}}{dV} = \frac{2}{q\epsilon_s A^2 N_D} \frac{1}{(1 + \alpha)} \quad (4.16)$$

şeklinde ifade edilir. $\frac{1}{(1+\alpha)} = C_2$ olarak tanımlandığında C_2 denklemi Eş. 4.16 yardımıyla,

$$C_2 = \frac{2}{q\epsilon_s N_{DT} \left(\frac{dC^{-2}}{dV} \right)} \approx \frac{N_{DD}}{N_{DT}} = \frac{\epsilon_i}{\epsilon_i + qN_{ss}d_{ox}} \quad (4.17)$$

şeklinde ifade edilir. Burada N_{DT} , n tipi yarıiletken için teorik taşıyıcı yoğunluğu, N_D ise $1/C^2$ -V eğrilerinin eğimlerinden hesaplanan taşıyıcı yoğunluğudur. Yapıların tüketme tabakası genişliği [56],

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 V_d}{qN_d}} \quad (4.18)$$

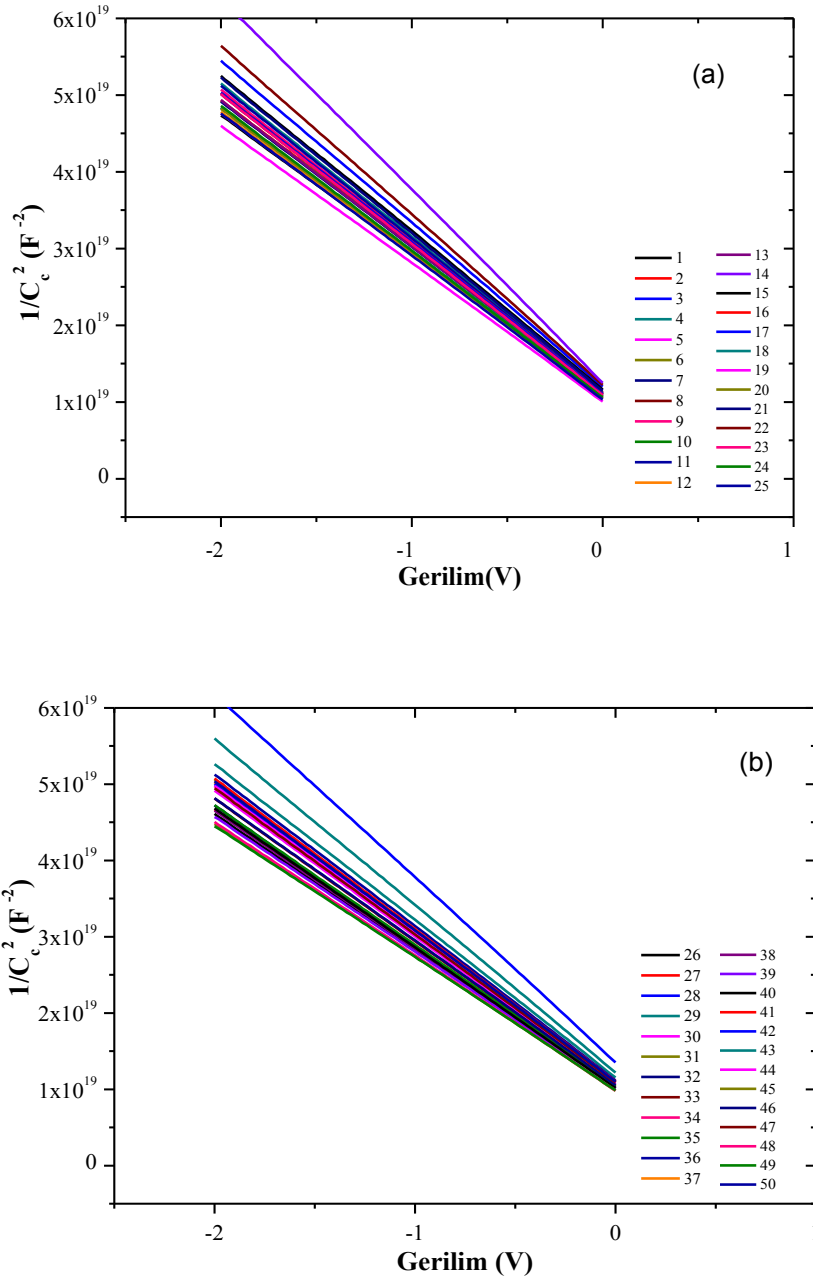
ifadesinden hesaplanmıştır. Fermi seviyesi,

$$\Phi_F = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_c}{N_d} \right) \quad (4.19)$$

bağıntısından hesaplanmıştır. Burada N_c , iletim bandındaki etkin durumların yoğunluğu olup sıcaklığa,

$$N_c = 4,82 \times 10^{15} T^{\frac{3}{2}} \left(\frac{m_e^*}{m_0} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (4.20)$$

ifadesiyle bağılıdır. Burada m_e^* elektronların etkin kütlesi olup değeri $m_e^*=0,98 m_0$ 'dır [38].



Şekil 4.14. Tüm Au/n-Si(100)/Al Schottky diyotlarının C^{-2} -V eğrileri:
a) 1'den 25 nolu numuneye kadar b) 26'dan 50 nolu numuneye kadar

Yapılarda oluşan maksimum elektrik alanı (E_m) ve Schottky engel alçalması ($\Delta\Phi_B$) sırasıyla [56],

$$E_m = \sqrt{\frac{2qN_dV_d}{\epsilon_s\epsilon_0}} \quad (4.21)$$

$$\Delta\Phi_B = \sqrt{\frac{qE_m}{4\pi\epsilon_s\epsilon_0}} \quad (4.22)$$

ifadelerinden elde edilmiştir. Yapıların engel yükseklikleri, Φ_B , V_d sıcaklığa bağlı difüzyon ifadesi, Φ_F Fermi enerjisi ve $\Delta\Phi_B$ Schottky engel alçalması cinsinden,

$$\Phi_B = V_d + \Phi_F - \Delta\Phi_B \quad (4.23)$$

olarak ifade edilir. Burada, Φ_F , E_i gerçek Fermi enerji seviyesi ile E_F Fermi seviyesi arasındaki enerji farkıdır. Arayüzey tabakası göz önüne alındığında Eş. 4.23 ifadesi,

$$\Phi_B = q(C_2V_0 + \Phi_F) \quad (4.24)$$

şeklinde ifade edilir [9,10,56].

Aynı şartlar altında üretilen özdeş 50 adet Au/n-Si(100)/Al Schottky diyotların C^{-2} -V eğrileri kullanılarak elde edilen parametreler Çizelge 4.5’de verilmiştir. Çizelgeyi incelediğimizde diyottan diyota bu parametrelerin farklı değerler aldığı görülmüştür. Bu parametrelerden bazıları, difüzyon potansiyeli (V_d), donör taşıyıcı yoğunluğu (N_d) ve Schottky engel yüksekliği (Φ_B) parametre değerleri sırasıyla; 0,520-0,602 V, $1,034-1,482 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ve 0,772-0,845 eV olarak elde edilmiştir. Ayrıca arayüzey oksit tabaka kalınlığı (d_{ox}) değerleri diyottan diyota 6,3-14,2 nm arasında değişmektedir ve Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Hill-Coleman metodu ile elde edilen parametreler

Diyot sayısı	R_s (Ω)	V_{max} (V)	$C_{c,max}$ ($\times 10^{-9}$ F)	$G_{c,max}$ (S)	N_{ss} ($\times 10^{12}$ eVcm $^{-2}$)
1	46,267	0,64	3,749	0,019	4,473
2	51,436	0,60	2,988	0,015	3,566
3	51,978	0,60	3,989	0,020	4,733
4	44,534	0,60	4,522	0,024	5,355
5	40,497	0,66	4,740	0,027	5,565
6	43,241	0,66	4,303	0,023	5,081
7	48,628	0,62	3,576	0,019	4,241
8	48,197	0,60	4,270	0,022	5,050
9	42,463	0,64	4,958	0,027	5,831
10	40,499	0,70	5,807	0,032	6,848
11	40,650	0,70	5,358	0,031	6,283
12	42,943	0,66	4,683	0,026	5,515
13	57,141	0,64	4,015	0,021	4,777
14	62,373	0,54	3,377	0,017	3,931
15	45,289	0,60	4,358	0,024	5,116
16	41,313	0,66	5,309	0,030	6,228
17	40,665	0,72	6,110	0,034	7,167
18	40,979	0,76	6,455	0,036	7,603
19	40,591	0,72	5,712	0,032	6,720
20	46,607	0,66	4,443	0,024	5,229
21	44,294	0,58	4,289	0,024	5,030
22	40,422	0,66	5,749	0,031	6,796
23	40,422	0,66	5,749	0,031	6,796
24	41,168	0,74	6,652	0,037	7,818
25	39,853	0,72	6,133	0,035	7,202
26	41,347	0,68	5,189	0,028	6,137
27	51,607	0,64	4,394	0,022	5,225
28	68,960	0,54	3,781	0,021	4,461
29	45,663	0,56	4,330	0,024	5,103
30	39,426	0,62	5,418	0,032	6,347
31	40,220	0,68	6,338	0,036	7,452
32	39,529	0,70	6,018	0,035	7,061
33	39,481	0,66	5,150	0,030	6,038
34	44,615	0,62	4,353	0,023	5,168
35	70,137	0,64	4,090	0,021	4,857
36	81,806	0,52	4,260	0,023	5,029
37	40,421	0,62	6,170	0,035	7,104
38	41,276	0,64	5,889	0,034	6,875
39	40,398	0,64	5,609	0,032	6,582
40	40,028	0,64	5,104	0,029	5,999
41	43,320	0,58	3,928	0,022	4,613
42	56,108	0,56	3,273	0,017	3,853
43	75,408	0,40	4,008	0,016	4,898
44	46,656	0,54	5,658	0,029	6,730
45	47,138	0,54	4,899	0,025	5,843
46	46,206	0,56	4,394	0,024	5,183
47	49,278	0,56	3,920	0,020	4,667
48	68,195	0,50	5,065	0,022	5,914
49	64,955	0,52	4,490	0,021	5,263
50	70,144	0,58	4,429	0,022	5,322

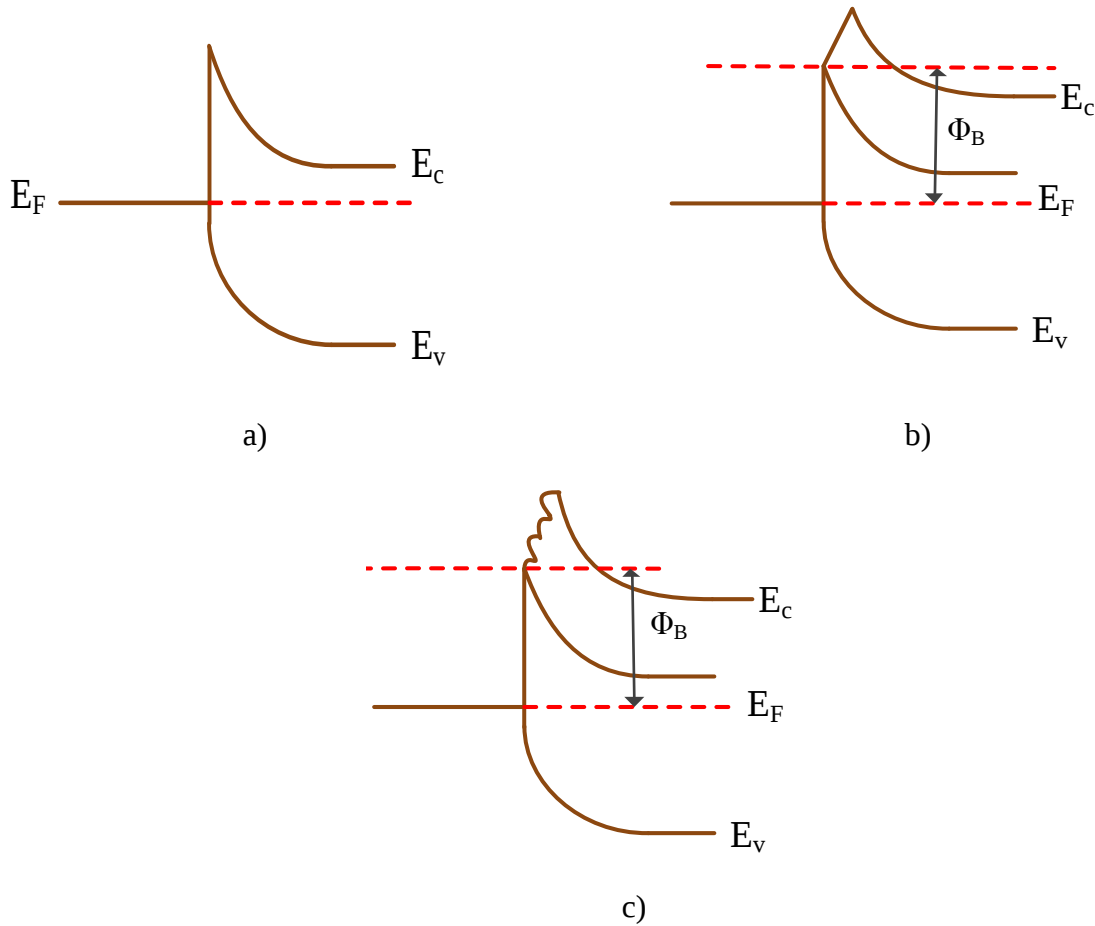
Çizelge 4.5. Au/n-Si(100)/Al Schottky diyotlarının C^{-2} -V eğrilerinden elde edilen parametreler

Diyot sayısı	V_0 (V)	V_d (V)	N_d ($\times 10^{15} \text{cm}^{-3}$)	E_f (V/cm)	Φ_B (eV)	E_m (V/cm)	$\Delta\Phi_B$ (eV)	W_d ($\times 10^{-5} \text{Å}^0$)	C_{ox} ($\times 10^{-9}$)	d_{ox} (nm)
1	0,567	0,593	1,387	0,256	0,836	15883,08	0,013	7,477	6,43	11,5
2	0,576	0,602	1,339	0,257	0,845	15720,42	0,014	7,664	5,20	14,2
3	0,555	0,581	1,213	0,259	0,828	14700,88	0,013	7,912	7,10	10,4
4	0,552	0,578	1,281	0,258	0,823	15073,71	0,014	7,678	8,01	9,2
5	0,553	0,579	1,385	0,256	0,822	15684,12	0,014	7,391	8,69	8,5
6	0,558	0,584	1,334	0,257	0,827	15451,79	0,014	7,559	7,52	9,8
7	0,563	0,588	1,345	0,257	0,832	15578,62	0,014	7,560	6,32	11,7
8	0,552	0,578	1,176	0,260	0,825	14435,97	0,013	8,010	7,71	9,6
9	0,551	0,577	1,308	0,258	0,822	15215,78	0,014	7,593	9,18	8,0
10	0,546	0,572	1,363	0,256	0,815	15457,01	0,014	7,403	10,40	7,0
11	0,546	0,572	1,286	0,258	0,817	15019,8	0,014	7,625	10,00	7,4
12	0,553	0,579	1,381	0,256	0,822	15660,63	0,014	7,399	8,51	8,7
13	0,565	0,591	1,351	0,257	0,835	15648,42	0,014	7,562	7,01	10,5
14	0,494	0,520	1,034	0,264	0,772	12847,94	0,013	8,107	6,49	11,4
15	0,559	0,585	1,258	0,259	0,830	15019,93	0,013	7,795	8,20	9,0
16	0,557	0,583	1,312	0,257	0,827	15314,03	0,014	7,611	10,10	7,3
17	0,555	0,581	1,313	0,257	0,825	15300,11	0,014	7,604	11,60	6,4
18	0,557	0,583	1,363	0,256	0,826	15616,54	0,014	7,476	11,80	6,3
19	0,552	0,578	1,439	0,255	0,820	15975,02	0,014	7,246	10,50	7,0
20	0,558	0,584	1,373	0,256	0,827	15684,09	0,014	7,455	8,22	9,0
21	0,553	0,578	1,262	0,258	0,824	14965,29	0,014	7,737	8,12	9,0
22	0,549	0,574	1,319	0,257	0,819	15242,67	0,014	7,544	10,20	7,2
23	0,549	0,575	1,319	0,257	0,819	15248,23	0,014	7,544	10,20	7,2
24	0,548	0,574	1,356	0,257	0,817	15450,95	0,014	7,435	12,40	5,9
25	0,547	0,573	1,387	0,256	0,816	15610,85	0,014	7,346	11,40	6,4
26	0,553	0,579	1,432	0,255	0,820	15940,25	0,014	7,267	9,25	7,9
27	0,557	0,583	1,413	0,255	0,825	15899,44	0,014	7,343	7,71	9,5
28	0,55	0,576	1,066	0,263	0,826	13716,12	0,013	8,400	6,74	11,0
29	0,553	0,579	1,256	0,259	0,825	14932,66	0,013	7,762	7,61	9,7
30	0,553	0,578	1,351	0,257	0,822	15479,15	0,014	7,479	9,88	7,4
31	0,546	0,572	1,305	0,258	0,817	15132,89	0,014	7,566	11,20	6,5
32	0,547	0,573	1,404	0,256	0,816	15708,51	0,014	7,304	11,10	6,6
33	0,550	0,576	1,373	0,256	0,819	15575,89	0,014	7,402	9,60	7,6
34	0,553	0,578	1,328	0,257	0,822	15347,22	0,014	7,544	7,61	9,7
35	0,554	0,580	1,397	0,256	0,822	15757,80	0,014	7,361	7,16	10,3
36	0,547	0,573	1,282	0,258	0,818	15006,21	0,014	7,638	7,44	9,9
37	0,544	0,569	1,311	0,257	0,814	15133,28	0,014	7,532	9,89	7,4
38	0,549	0,575	1,419	0,256	0,818	15817,39	0,014	7,280	10,30	7,1
39	0,554	0,580	1,443	0,255	0,821	16014,39	0,014	7,246	9,78	7,5
40	0,547	0,573	1,409	0,256	0,815	15728,50	0,014	7,288	8,97	8,2
41	0,551	0,577	1,305	0,258	0,821	15194,52	0,014	7,599	7,27	10,1
42	0,553	0,579	1,320	0,257	0,823	15311,64	0,014	7,569	6,05	12,2
43	0,550	0,576	1,182	0,260	0,823	14445,87	0,013	7,976	6,63	11,1
44	0,545	0,571	1,322	0,257	0,815	15218,15	0,014	7,511	9,17	8,0
45	0,552	0,578	1,473	0,254	0,819	16156,49	0,014	7,158	8,34	8,8
46	0,550	0,576	1,365	0,256	0,819	15525,36	0,014	7,422	7,85	9,4
47	0,553	0,579	1,333	0,257	0,823	15384,13	0,014	7,535	6,73	11,0
48	0,551	0,577	1,158	0,261	0,825	14308,31	0,013	8,068	9,18	8,0
49	0,559	0,584	1,482	0,254	0,825	16297,38	0,014	7,177	8,26	8,9
50	0,549	0,575	1,307	0,258	0,820	15181,75	0,014	7,584	7,42	9,9

4.4. Engel Yüksekliği Homojensizliği

I-V ve C-V'den elde edilen deneysel sonuçları incelediğimizde, silisyum kristali üzerinde aynı şartlarda üretilen 50 adet diyota ait parametre değerlerinin bir diyottan diğerine aynı olmadığı görülmüştür. Farklı tekniklerle elde edilen engel yükseklikleri, ölçüm tekniklerinin kendine has özelliklerinden dolayı farklı olabilmektedir [9,10,56].

Metal/Yarıiletken doğrultucu kontaklarda eklemde ortaya çıkan potansiyel engelinin Şekil 4.15 b'deki gibi tek düze olmayıp, Şekil 4.15 c'deki gibi değişken karakterde olması potansiyel engelin homojensizliği olarak bilinir. Akım-Gerilim ölçümünden bulunan bariyer yüksekliği ile Kapasite-Gerilim ölçümünden bulunan bariyer yüksekliği arasındaki fark homojensizliğin göstergesidir.



Şekil 4.15. Bariyer yüksekliğinin görünümü

a) İki boyutlu b) Üç boyutlu homojen c) Üç boyutlu homojen olmayan durum

Engel yüksekliğinin homojen olmayan bir yapı sergilemesine neden olan durumlar şöyle sıralanabilir;

1. Seri direnç etkisi
2. Görüntü-yük etkisi
3. Arayüzey tabakasının kalınlığı
4. Uzun yük bölgesinde tekrardan birleşim mekanizmaları
5. Uzun yük bölgesinde tekrardan oluşum mekanizmaları
6. Yüksek katkılı yarıiletkenlerde tünelleme

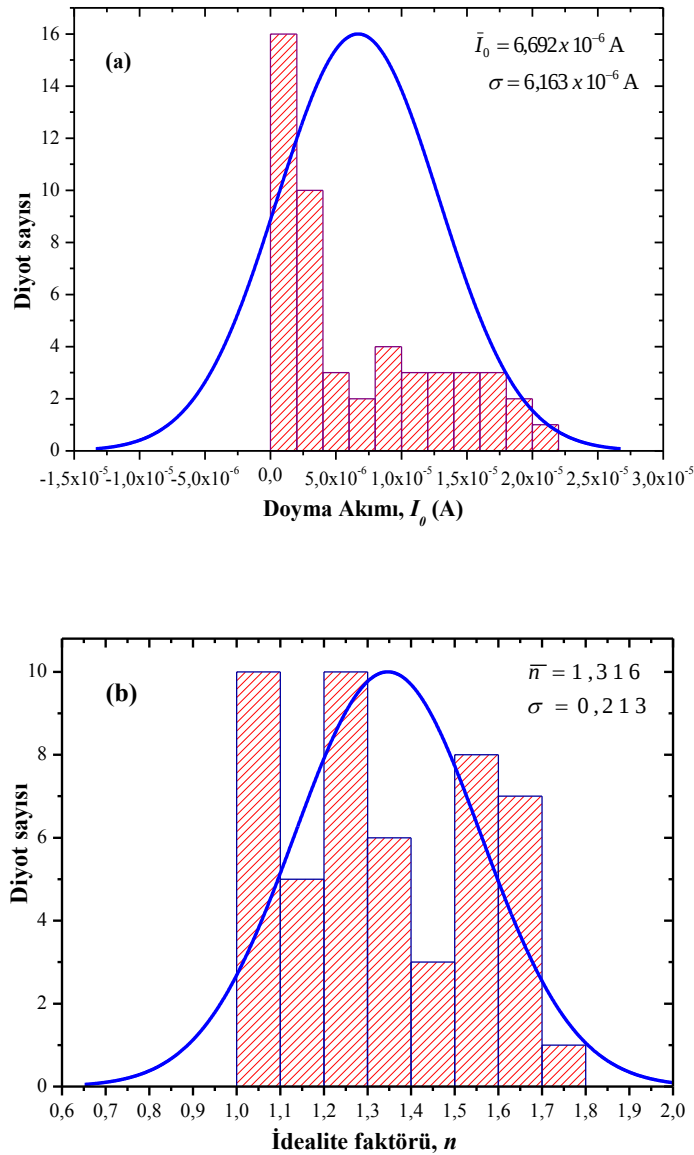
4.4.1. Akım-gerilim parametrelerinin gauss metoduyla istatistiksel analizi

Akım-gerilim metodundan belirlenen engel yüksekliği (Φ_B) değerleri, farklı sebeplerden dolayı oluşabilecek engel düşmelerini de içerir. I-V'den ortalama engel yüksekliği değerleri hesaplanır. Kapasite-gerilim metodunda ise, dc bir beslem üzerine küçük bir ac sinyali bindirilerek uyarılan tüketim bölgesi kapasitesi ölçülmüş olur. Böylece sadece tüketim tabakası bölgesinin kenarları modüle edilmiş olur. C-V eğrileri kullanılarak elde edilen C^{-2} -V grafiği, bant bükülmelerine sebep olan engel alçalması etkilerini içermez [28-30]. Başka bir deyişle, Schottky kontaklarda homojen bir engel oluşumu düşünülerek temel fiziksel özellikler belirlenirken son zamanlarda Schottky kontakların homojen olmadığı kabul edilmiş ve çalışmalar homojen olmayan kontaklar üzerinde yoğunlaşmıştır [25-40]. Literatür incelendiğinde akım iletiminde beklenmeyen birçok davranışın Schottky diyotların değişken olan engel yükseklikleri ile ilişkili olabileceğini göstermiştir. Kısaca, metal ile yarıiletken arasındaki arayüzeyde sürekli bir engel dağılımı vardır. Böyle durumlarda ortalama değerler alınarak engel yüksekliklerinin deneysel dağılımları bir Gaussian fonksiyonu ile istatistiksel olarak hesaplanır [25-40]. Bu model, yalnız kapasite ve akımlardan oluşan engel farkını değil aynı zamanda sıcaklığa bağımlılığının yanında idealite faktörlerinin neden 1'den büyük olduğunu da açıklar. Engel yüksekliği olasılığı, $P(\Phi_B)$,

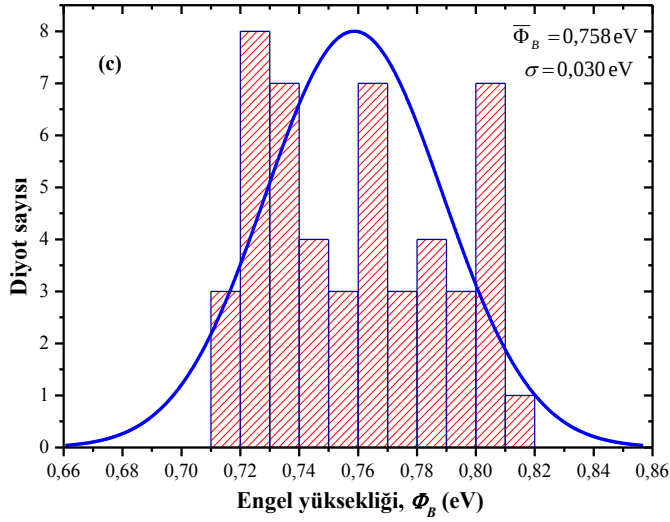
$$P(\Phi_B) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} e^{-(\bar{\Phi}_B - \Phi_B)^2 / 2\sigma_s^2} \quad (4.25)$$

şeklinde ifade edilir. Burada $\bar{\Phi}_B$ engel yüksekliğinin ortalama değeridir, σ_s engel yüksekliğinin standart sapması ve $1/\sigma_s \sqrt{2\pi}$ normalizasyon sabitidir. Şekil 4.16 a, b ve

c’de I-V ölçümlerinden elde edilen 50 adet Au/n-Si/Al Schottky diyot için sırasıyla doyma akımı (I_0), idealite faktörü (n) ve engel yüksekliğinin (Φ_B) istatistiksel dağılımları görülmektedir. I_0 , n ve Φ_B parametrelerinin istatistiksel analizlerinden sırasıyla ortalama doyma akımı $\bar{I}_0=6,692 \times 10^{-6} \text{ A}$ ve standart sapması $\sigma=6,163 \times 10^{-6} \text{ A}$, ortalama idealite faktörü $\bar{n}=1,316$ ve standart sapması $\sigma=0,213$ ve ortalama engel yüksekliği $\bar{\Phi}_B=0,758 \text{ eV}$ ve standart sapması $\sigma=0,030 \text{ eV}$ olarak elde edilmiştir.



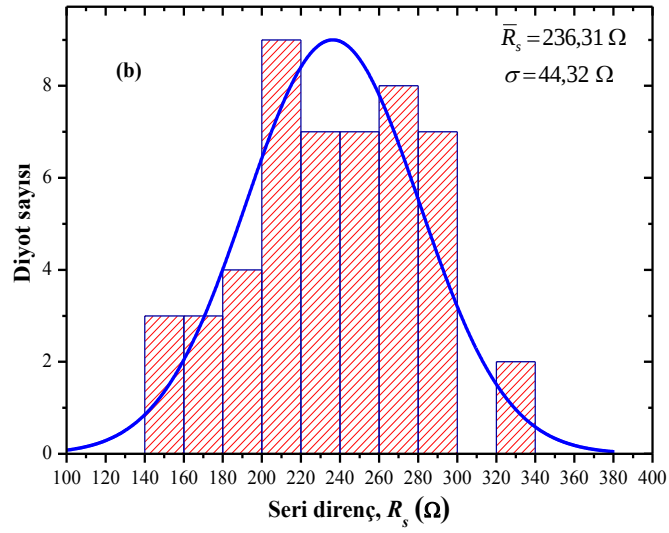
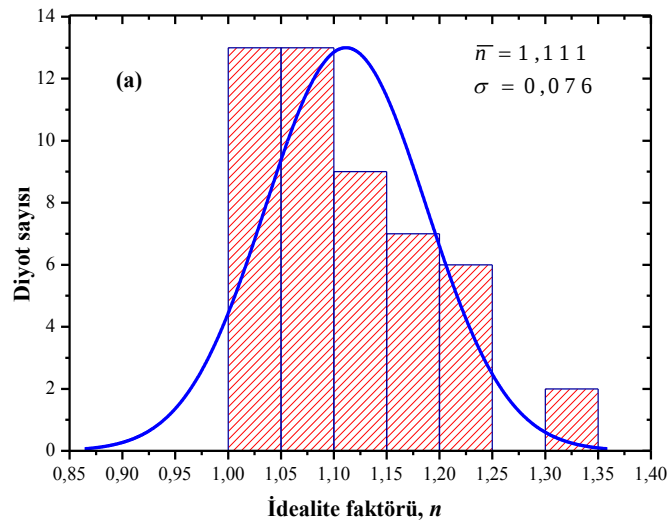
Şekil 4.16. 50 adet Schottky diyot için I-V ölçümlerinden elde edilen parametrelerin istatistiksel dağılımları: a) I_0 için Gaussian dağılımı b) n için Gaussian dağılımı ve c) Φ_B için Gaussian dağılımı



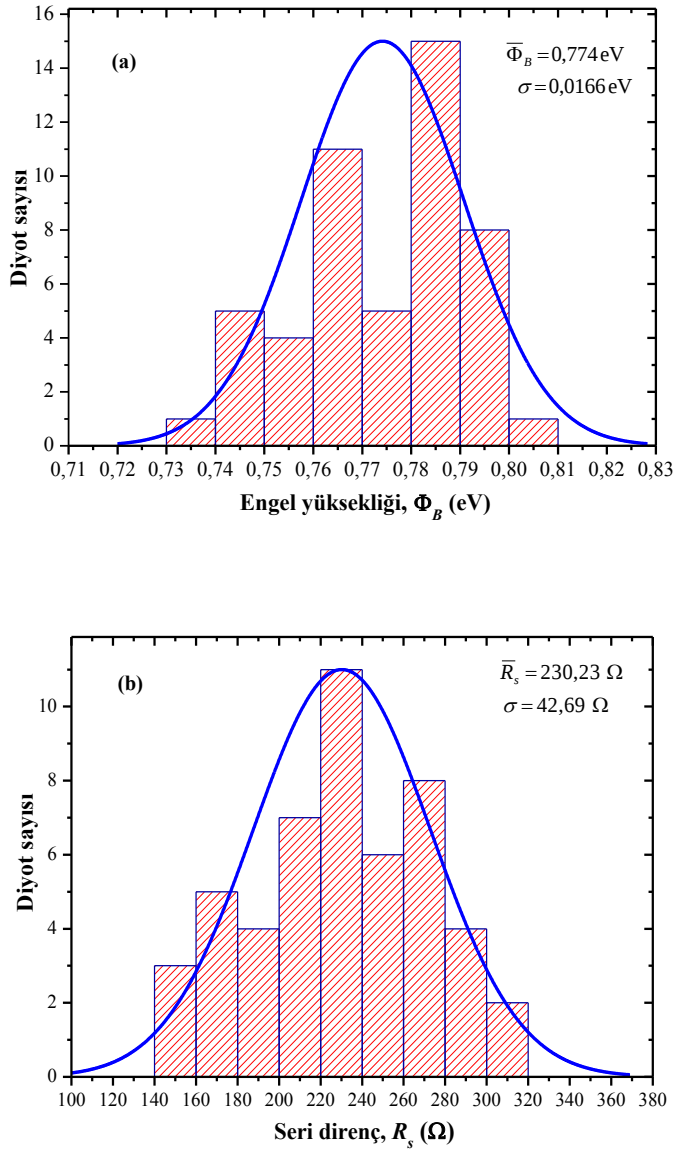
Şekil 4.16. (devam) 50 adet Schottky diyot için I - V ölçümlerinden elde edilen parametrelerin istatistiksel dağılımları: a) I_0 için Gaussian dağılımı b) n için Gaussian dağılımı ve c) Φ_B için Gaussian dağılımı

Şekil 4.17 a ve b de 50 adet Au/n-Si/Al Schottky diyot için Cheung'in $dV/d(\ln I)$ - I grafiğinden elde edilen ideallik faktörlerinin (n) ve seri dirençlerinin (R_s) istatistiksel dağılımları görülmektedir. n ve R_s parametrelerinin istatistiksel analizlerinden sırasıyla ortalama ideallik faktörü $\bar{n}=1,111$ ve standart sapması $\sigma=0,076$, ortalama seri direnci $\bar{R}_s=236,31 \Omega$ ve standart sapması $\sigma=44,32 \Omega$ olarak elde edilmiştir.

Şekil 4.18 a ve b de 50 adet Au/n-Si/Al Schottky diyot için Cheung'in $H(I)$ - I grafiğinden elde edilen engel yüksekliklerinin (Φ_B) ve seri dirençlerinin (R_s) istatistiksel dağılımları görülmektedir. Φ_B ve R_s parametrelerinin istatistiksel analizlerinden sırasıyla ortalama engel yüksekliği $\bar{\Phi}_B=0,774 \text{ eV}$ ve standart sapması $\sigma=0,0166 \text{ eV}$, ortalama seri direnci $\bar{R}_s=230,23 \Omega$ ve standart sapması $\sigma=42,69 \Omega$ olarak elde edilmiştir.

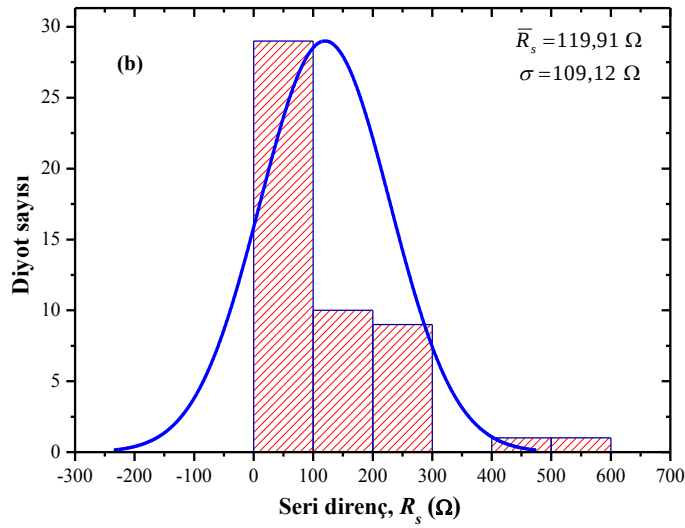
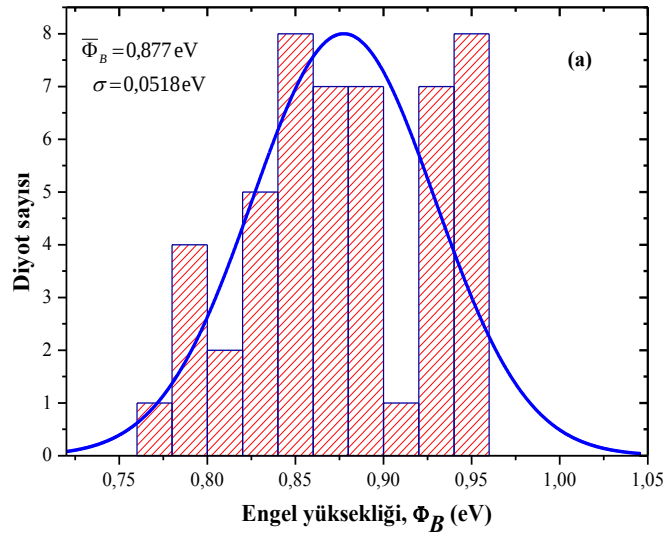


Şekil 4.17. 50 adet Schottky diyot için Cheung'in $dV/d(\ln I)$ -I grafiğinden elde edilen
a) İdealite faktörlerinin b) Seri dirençlerinin istatistiksel dağılımları



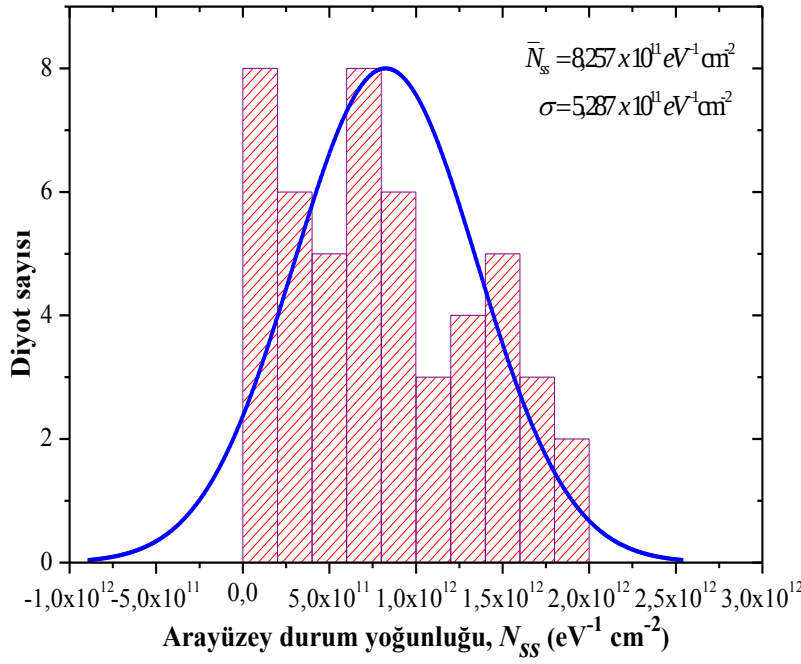
Şekil 4.18. 50 adet Schottky diyot için Cheung'ın H(I)-I grafiğinden elde edilen a) Engel yüksekliklerinin b) Seri dirençlerinin istatistiksel dağılımları

Şekil 4.19 a ve b de 50 adet Au/n-Si/Al Schottky diyot için Norde'un F(V)-V grafiğinden elde edilen engel yüksekliklerinin (Φ_B) ve seri dirençlerinin (R_s) istatistiksel dağılımları görülmektedir. Φ_B ve R_s parametrelerinin istatistiksel analizlerinden sırasıyla ortalama engel yüksekliği $\bar{\Phi}_B=0,877$ eV ve standart sapması $\sigma=0,0518$ eV , ortalama seri direnci $\bar{R}_s=119,91$ Ω ve standart sapması $\sigma=109,12$ Ω olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.19. 50 adet Schottky diyot için Norde'un F(V)-V grafiğinden elde edilen a) Engel yüksekliklerinin b) Seri dirençlerinin istatistiksel dağılımları

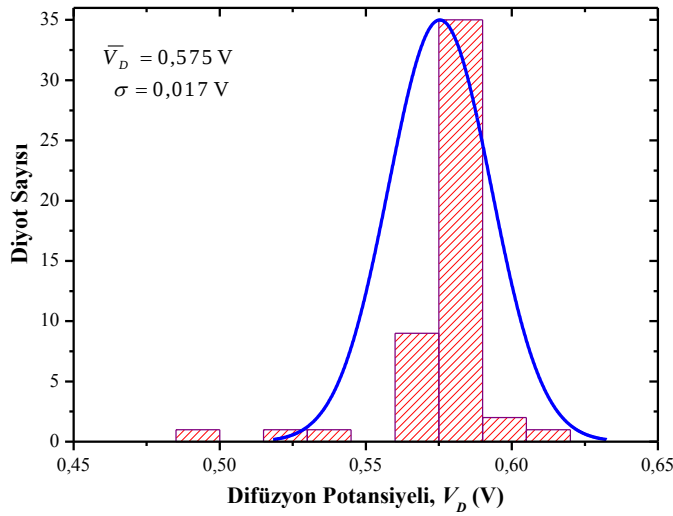
Şekil 4.20 a ve b de 50 adet Au/n-Si/Al Schottky diyot için I-V ölçümlerinden elde edilen arayüzey durum yoğunluklarının (N_{ss}) istatistiksel dağılımı görülmektedir. N_{ss} parametresinin istatistiksel analizlerinden ortalama arayüzey durum yoğunluklarının $\bar{N}_{ss} = 8.257 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ve standart sapması $\sigma = 5.287 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ olarak elde edilmiştir.



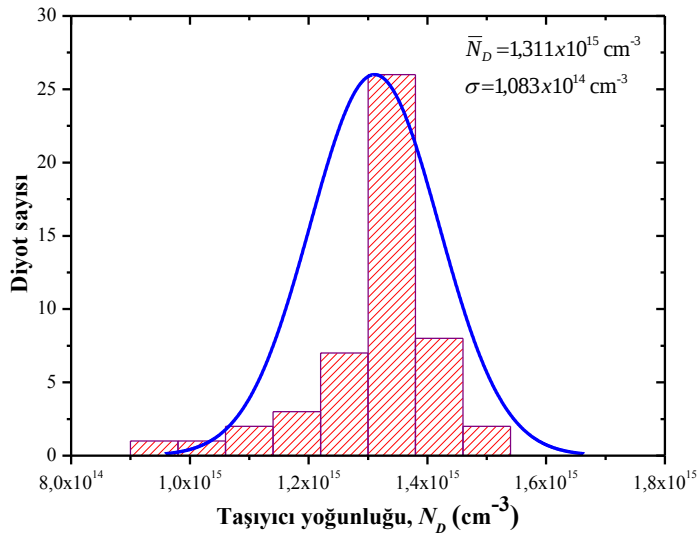
Şekil 4.20. 50 adet Au/n-Si/Al Schottky diyet için I-V ölçümleri yardımıyla elde edilmiş arayüzey durum yoğunluklarının istatistiksel dağılımı

4.4.2. Kapasite-iletkenlik-gerilim parametrelerinin Gauss metoduyla istatistiksel analizi

Şekil 4.14 a ve b'den $(1/C^2-V)$ 50 adet Schottky diyet için elde edilen difüzyon potansiyelinin (V_D) deneysel değerleri Gaussyen fonksiyonuna fit edilmiştir. Şekil 4.21'de V_D 'nin Gaussyen dağılımı görülmektedir. Bu parametrenin istatistik analizlerinden ortalama difüzyon potansiyeli $\bar{V}_D = 0,575$ eV ve standart sapması $\sigma = 0,017$ eV olarak elde edilmiştir. Çizelge 4.4'de 50 adet Schottky diyet için verilmiş donör taşıyıcı yoğunluğu (N_D) deneysel değerleri Gaussyen fonksiyonuna fit edilmiştir. Şekil 4.22'de N_D 'nin Gaussyen dağılımı görülmektedir. Bu parametrenin istatistik analizlerinden ortalama donör taşıyıcı yoğunluğu $\bar{N}_D = 1,311 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ve standart sapması $\sigma = 1,083 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ olarak elde edilmiştir.

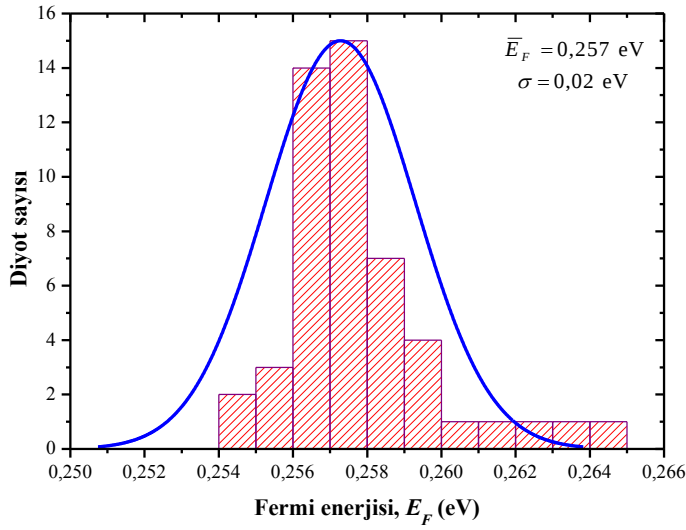


Şekil 4.21. 50 adet Schottky diyot için $1/C^2$ -V eğrileri kullanılarak elde edilmiş difüzyon potansiyeli değerlerinin istatistiksel dağılım grafiği



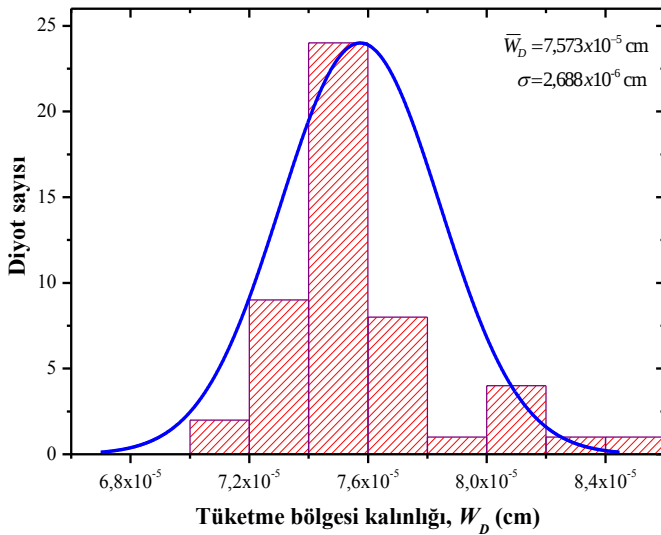
Şekil 4.22. 50 adet Schottky diyot için elde edilmiş donör taşıyıcı yoğunluğu değerlerinin istatistiksel dağılım grafiği

50 adet Schottky diyot için Fermi enerji (E_F) değerleri Eş. 4.19 yardımıyla hesaplanmış ve Gausyen fonksiyonuna fit edilmiştir. Şekil 4.23’de E_F ’nin Gausyen dağılımı görülmektedir. Bu parametrenin istatistik analizlerinden ortalama Fermi enerjisi $\bar{E}_F=0,257$ eV ve standart sapması $\sigma=0,002$ eV olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.23. 50 adet Schottky diyot için elde edilmiş fermi enerji değerlerinin istatistiksel dağılım grafiği

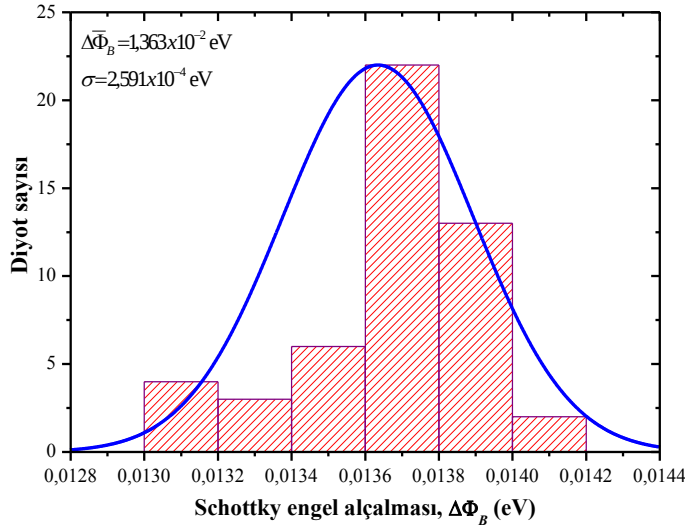
50 adet Schottky diyot için tüketme tabakası genişliği (W_D) değerleri Eş. 4.18 yardımıyla hesaplanmış ve Gausyen fonksiyonuna fit edilmiştir. Şekil 4.24’de W_D ’nin Gausyen dağılımı görülmektedir. Bu parametrenin istatistik analizlerinden ortalama tüketme tabakası genişliği $\bar{W}_D = 7,573 \times 10^{-5}$ cm ve standart sapması $\sigma = 2,688 \times 10^{-6}$ cm olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.24. 50 adet Schottky diyot için elde edilmiş tüketme tabakası genişliği değerlerinin istatistiksel dağılım grafiği

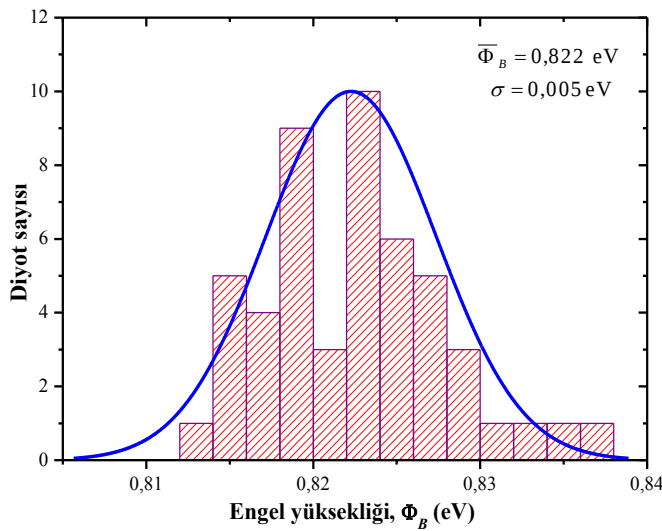
50 adet Schottky diyot için Schottky engel alçalması ($\Delta\Phi_B$) değerleri Eş. 4.22 yardımıyla hesaplanmış ve Gausyen fonksiyonuna fit edilmiştir. Şekil 4.25’de $\Delta\Phi_B$ ’nin Gausyen

dağılımı görülmektedir. Bu parametrenin istatistik analizlerinden ortalama Schottky engel alçalması $\Delta\bar{\Phi}_B=1,363\times10^{-2}$ eV ve standart sapması $\sigma=2,591\times10^{-4}$ eV olarak bulunmuştur.



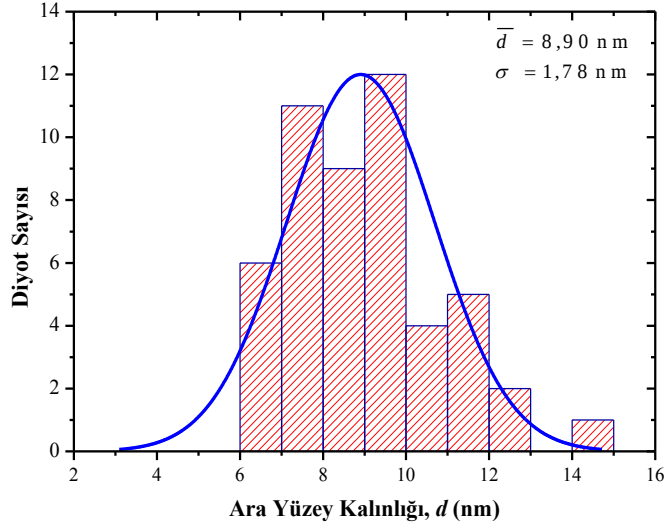
Şekil 4.25. 50 adet Schottky diyot için elde edilmiş Schottky engel alçalması değerlerinin istatistiksel dağılım grafiği

50 adet Schottky diyot için engel yüksekliği (Φ_B) değerleri Eş. 4.23 yardımıyla hesaplanmış ve Gaussyen fonksiyonuna fit edilmiştir. Şekil 4.26’da Φ_B ’nin Gaussyen dağılımı görülmektedir. Bu parametrenin istatistik analizlerinden ortalama engel yüksekliği $\bar{\Phi}_B=0,822$ eV ve standart sapması $\sigma=0,005$ eV olarak bulunmuştur.



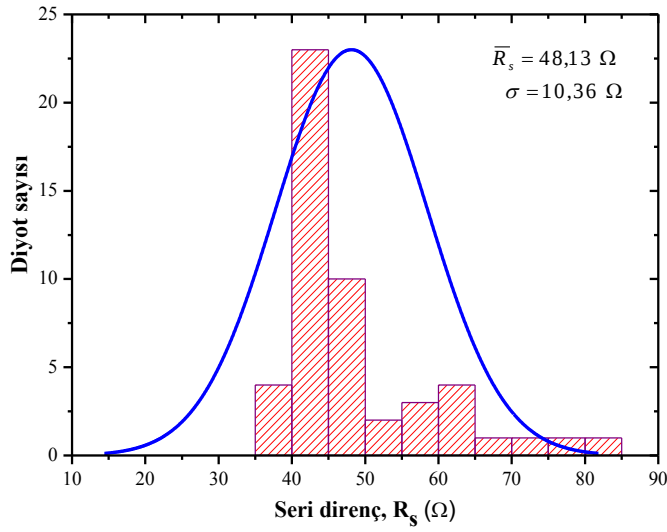
Şekil 4.26. 50 adet Schottky diyot için elde edilmiş Schottky engel yüksekliği değerlerinin istatistiksel dağılım grafiği

50 adet Schottky diyot için arayüzey tabaka kalınlığı (d) değerleri Gausyen fonksiyonuna fit edilmiştir. Şekil 4.27’de d ’nin Gausyen dağılımı görülmektedir. Bu parametrenin istatistik analizlerinden ortalama arayüzey tabaka kalınlığı $\bar{d}=8,90$ nm ve standart sapması $\sigma=1,78$ nm olarak bulunmuştur.



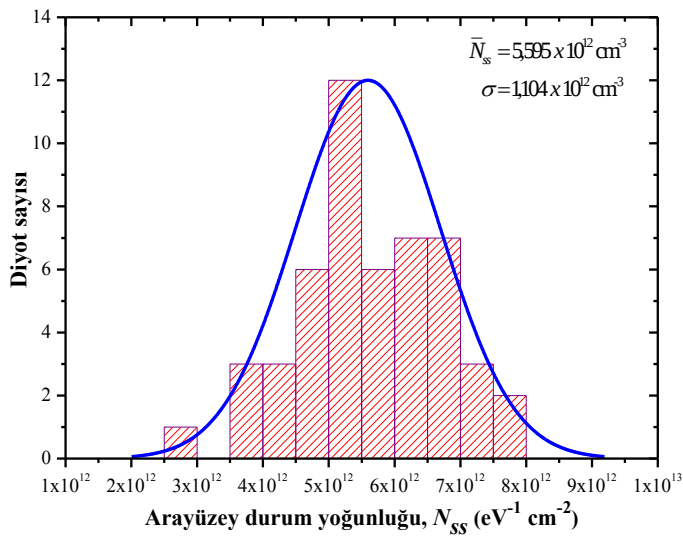
Şekil 4.27. 50 adet Schottky diyot için elde edilmiş arayüzey tabaka kalınlığı değerlerinin istatistiksel dağılım grafiği

50 adet Schottky diyot için seri direnç (R_s) değerleri Eş. 4.8 yardımıyla hesaplanmış ve Gausyen fonksiyonuna fit edilmiştir. Şekil 4.28’de R_s ’nin Gausyen dağılımı görülmektedir. Bu parametrenin istatistik analizlerinden ortalama seri direnç $\bar{R}_s=48,13$ Ω ve standart sapması $\sigma=10,36$ Ω olarak bulunmuştur.



Şekil 4.28. 50 adet Schottky diyot için elde edilmiş seri direnç değerlerinin istatistiksel dağılım grafiği

50 adet Schottky diyot için arayüzey durum yoğunlukları (N_{ss}) değerleri Hill-Coleman metodu kullanılarak Eş. 4.13 yardımıyla hesaplanmış ve Gausyen fonksiyonuna fit edilmiştir. Şekil 4.29’de N_{ss} ’nin Gausyen dağılımı görülmektedir. Bu parametrenin istatistik analizlerinden ortalama arayüzey durum yoğunlukları $\bar{N}_{ss}=5,595 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ve standart sapması $\sigma=1,104 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ olarak bulunmuştur.



Şekil 4.29. 50 adet Schottky diyot için elde edilmiş arayüzey durum yoğunlukları değerlerinin istatistiksel dağılım grafiği

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada, CZ (Czochralski) tekniği ile büyütülmüş, (100) düzleminde kesilmiş 380 μm kalınlıklı, 20 $\Omega\text{-cm}$ öz dirençli fosfor katkılı n tipi bir silisyum kristali kullanılmıştır. n-Si yüzeyinde aynı şartlarda hazırlanmış 50 adet özdeş Au/n-Si/Al Schottky diyotu üretildi. Üretilen diyotların karakteristik parametrelerini hesaplamak için akım-gerilim (I-V), kapasite-gerilim (C-V) ve iletkenlik-gerilim (G-V) ölçümleri oda sıcaklığında (300 K) ve karanlıkta alınmıştır. Schottky diyotlar aynı şartlarda hazırlanmış olsa bile hesaplanan her bir parametrenin diyottan diyota farklı değerlere sahip olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebinin Schottky kontaklarda oluşan engelin homojen olmayışı ile açıklanmıştır. Hesaplanan her bir parameterenin Gausyen analizi istatistiksel olarak yapılmış ve ortalama değerleri belirlenmiştir. Sonuçta, numune hazırlanma kısmında ayrıntıları bahsedildiği şekilde Au/n-Si/Al Schottky diyotları hazırlandığında karakteristik parametrelerin optimum değerleri hesaplanmıştır.

Schottky diyotların, ters ve düz beslem akım-gerilim (I-V) ölçümleri -2V ile 2V gerilim aralığında alınmıştır. I-V eğrilerinin ters beslem bölgesinde bir doyuma sahip ve düz beslem bölgesinde ise ideallikten sapmalar olduğu tespit edilmiştir. Düz beslem bölgesinde açıkça üç bölge gözlemlenmiştir. Birinci bölge, yeniden birleşme adı verilen ve eksenden birkaç kT/q kadar uzaklığa kadar uzan kısımdır. İkinci bölge termoiyonik emisyon akımının geçerli ve lineer olduğu kısımdır. Üçüncü bölge ise seri direncin etkisini göstererek eğriyi aşağı doğru büküttüğü kısımdır. Her bir Schottky diyot için önemli diyot parametreleri olan doyma akımı (I_0), idealite faktörü (n) ve engel yüksekliği (Φ_B) değerleri termoiyonik emisyon teorisinden yararlanılarak $\ln I$ -V karakteristiklerinden hesaplanmıştır. I-V ölçümlerinden elde edilen doyma akımı değerleri 2,78-5 pA, ideallik faktörü değerleri 1,04-1,69 ve engel yüksekliği değerleri 0,70-0,81 eV arasında bulunmuştur. İdeallik faktörü değerlerinin 1'den büyük çıkması arayüzey tabakasının ve arayüzey durumlarının ve engel homojensizliğinin varlığından kaynaklanmaktadır. Yapıların arayüzey durum yoğunlukları her bir diyot için enerjinin bir fonksiyonu olarak I-V ölçümlerinden elde edildi. Arayüzey enerji dağılım grafiğinden 50 tane diyot için N_{ss} değerlerinin yarıiletkenin yasak enerji bant aralığının ortasından başlayarak iletim bandına doğru eksponansiyel olarak arttığı görülmektedir. Bu durumun nedeni yarıiletkende bulunan vericilerin (katkı atomlarının) iletim bandına doğru yoğunlaşarak sıg seviyeler

oluşturmasıdır. Elde edilen arayüzey durum yoğunluğu değerleri $1,29 \times 10^{11}$ ile $4,89 \times 10^{12}$ $\text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ arasındadır.

Seri direnç, yarıiletken içerisindeki düzensiz katkıların yüksek öz dirençli bölgeler meydana getirmesinin yanı sıra, yarıiletkenle kontak arasındaki kirli film tabakalarının veya parçacıkların oluşturduğu istenmeyen bir durumdur. I-V eğrilerinin yüksek voltaj bölgesinde aşağı doğru bükülmesine ve dolayısı ile ideallikten sapmasına neden olan seri direnç (R_s) değerleri, Cheung yöntemi ve modifiye Norde yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Cheung yöntemi ile iki adet fonksiyon tanımlanmıştır. Bu yöntem ile seri direnç (R_s) ve engel yüksekliğinin (Φ_B) yanında bir de idealite faktörünün (n) hesaplanması mümkündür. Cheung yöntemi ile 50 adet diyot için hesaplanan seri direnç değerleri $dV/d\ln(I)-I$ ve $H(I)-I$ fonksiyonları için sırasıyla 149,3-346,5 Ω ve 144,6-336,2 Ω arasındadır. Norde yöntemi ile 50 adet diyot için hesaplanan seri direnç değerleri 20,9-462,5 Ω arasındadır. Bu sonuçlar Norde yönteminden elde edilen seri direnç değerleri ile genellikle uyumludur.

Schottky diyotların, ters ve düz beslem kapasite-gerilim (C-V) ve iletkenlik-gerilim (G-V) ölçümleri -2V ile 2V gerilim aralığında 1 MHz frekansta alınmıştır. Bu frekans değerinde arayüzey durumları uygulanan ac sinyali takip edememekte ve parametrelerin hesabında arayüzey durumlarından gelebilecek katkılar minimuma indirilmiş olmaktadır. Ölçümlerden elde edilen veriler yardımıyla Schottky diyotların C-V ve G-V eğrileri çizilmiştir. Kapasite eğrilerinden görüldüğü üzere her bir diyot, sıfır beslem yakınlarında bir pik verirken, iletkenlik eğrileri artan beslemeyle artmıştır. Kapasite eğrilerinde görülen pikler bu bölgede arayüzey durumlarının var olduğunun bir göstergesidir. Schottky diyotların kapasite ve iletkenlik ölçümleri üzerindeki seri direnç etkisini ortadan kaldırmak için, admittans tekniği ile 50 diyot için seri direnç değerleri hesaplanmıştır. Seri direnç değerleri gerilime bağlı olarak çizilerek ve bu eğrilerin sıfır beslem noktasına yakın yerlerde pikler verdiği tespit edildi. Bu durum seri direncin, kapasite ve iletkenliğin uygulanan voltaja bağımlılığının etkisinde olduğunun bir göstergesidir. Admittans tekniği kullanılarak 50 adet diyot için elde edilmiş seri direnç değerleri 39,481-81,806 Ω arasında değişmiştir. Diyotların aynı şartlarda ve aynı kristal üzerinde oluşturulmasına rağmen seri direnç değerlerinin belli bir aralıkta değişmesi, yarıiletken içerisindeki katkıların düzensiz

bir şekilde dağılmış olması ve bunun sonucunda da yüksek öz dirençli bölgeler meydana getirmesidir.

Admitans tekniği, seri dirençleri mevcut diyotların tek bir frekanstaki kapasite ve iletkenlik ölçüm değerlerinin daha doğru elde edilmesine imkan kılar. Bu çalışmada admitans tekniği yardımıyla kapasite ve iletkenlik değerleri yeniden hesaplanıp gerçeğe daha yakın kapasite ve iletkenlik eğrileri elde edilmiştir. Düzeltilmiş kapasite ve iletkenlik eğrilerine bakıldığında kapasite eğrilerinin tüketme bölgesinde iletkenlik eğrilerinin birer pik verdiği görülmüştür. Bu pik Hill-Coleman tekniğinde tanımlanan pik olup buradan tek bir frekansta arayüzey durumları belirlenebilir. Bu teknikle üretilen 50 adet diyot için yüzey durum yoğunlukları elde edilmiş ve yüzey durumları yoğunluk değerleri $3,566 \times 10^{12}$ - $7,818 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ arasında belirlenmiştir.

Yapıların $1/C^2$ -V eğrileri 1 MHz'deki seri direnç düzeltilmesinden sonra C-V ölçümlerinden elde edildi. Eğriler oldukça geniş bir voltaj aralığında lineer bir bölge vermektedirler. Bu lineer bölge kullanılarak her bir diyot için engel yüksekliği (Φ_B), taşıyıcı yoğunluğu (N_D), difüzyon potansiyeli (V_D), tüketim tabakası genişliği (W_D), Fermi enerji seviyesi (E_F) ve Schottky engel alçalması ($\Delta\Phi_B$) gibi önemli diyot parametreleri elde edilmiş bunların değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir. Bu teknikle üretilen 50 adet diyot için taşıyıcı yoğunluğu (N_D) ve Schottky engel yüksekliği (Φ_B) değerleri sırasıyla $1,034 \times 10^{15}$ - $1,482 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ve 0,772-0,845 eV aralığında belirlenmiştir. Yarıiletken kristal yüzeyinde aynı şartlarda diyotlar oluşturulmasına rağmen, Schottky yapılarından elde edilen parametrelerin ve özellikle engel yüksekliklerinin her bir diyot için farklı çıkması metal/yarıiletken arayüzeyindeki yüzey kusurlarından meydana gelen atomik homojensizliğe atfedilebilir [40,43]. Bu durum metal/yarıiletken arayüzeyinde engel yüksekliği homojensizliklerine sebep olur. Bu tip yapıların arayüzeyi yüzey hazırlama işlemlerine karşı oldukça hassastır.

Ayrıca, I-V ve C-V ölçümlerinden elde edilen Schottky engel yükseklikleri arasında da farklılıklar gözlenmiştir. Si/SiO₂ arayüzeyinde lokalize olmuş arayüzey durumları veya arayüzey durumlarının metal/yarıiletken arayüzeyinde ve yasak enerji bant aralığındaki dağılımları da bu farklılığa sebep olabilir. Böyle durumlarda elde edilen çok sayıda parametrenin ortalama değerleri alınarak deneysel dağılımları bir Gaussian fonksiyonuna

fit edilir. Bu tez çalışmasında 50 adet Au/n-Si/Al Schottky diyot hem I-V hemde C-V ölçümlerinden elde edilmiş bir çok parametre Gaussiyen fonksiyonuna fit edilerek istatistiksel dağılımları elde edilmiştir.

I_0 , n ve Φ_B parametrelerinin istatistiksel analizlerinden sırasıyla ortalama doyma akımı $\bar{I}_0=6,692 \times 10^{-6}$ A ve standart sapması $\sigma=6,163 \times 10^{-6}$ A, ortalama idealite faktörü $\bar{n}=1,316$ ve standart sapması $\sigma=0,213$ ve ortalama engel yüksekliği $\bar{\Phi}_B=0,758$ eV ve standart sapması $\sigma=0,030$ eV olarak elde edilmiştir. Cheung'in $dV/d(\ln I)$ -I grafiğinden n ve R_s parametrelerinin istatistiksel analizlerinden sırasıyla ortalama ideallik faktörü $\bar{n}=1,111$ ve standart sapması $\sigma=0,076$, ortalama seri direnci $\bar{R}_s=236,31 \Omega$ ve standart sapması $\sigma=44,32 \Omega$ olarak elde edilmiştir.

Cheung'in $H(I)$ -I grafiğinden Φ_B ve R_s parametrelerinin istatistiksel analizlerinden sırasıyla ortalama ideallik faktörü $\bar{\Phi}_B=0,774$ eV ve standart sapması $\sigma=0,0166$ eV, ortalama seri direnci $\bar{R}_s=230,23 \Omega$ ve standart sapması $\sigma=42,69 \Omega$ olarak elde edilmiştir. Norde'un $F(V)$ -V grafiğinden Φ_B ve R_s parametrelerinin istatistiksel analizlerinden sırasıyla ortalama engel yüksekliği $\bar{\Phi}_B=0,877$ eV ve standart sapması $\sigma=0,0518$ eV, ortalama seri direnci $\bar{R}_s=119,91 \Omega$ ve standart sapması $\sigma=109,12 \Omega$ olarak elde edilmiştir. I-V ölçümlerinden elde edilen arayüzey durum yoğunluklarının N_{ss} parametresinin istatistiksel analizlerinden ortalama arayüzey durum yoğunluklarının $\bar{N}_{ss}=8,257 \times 10^{11} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ ve standart sapması $\sigma=5,287 \times 10^{11} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ olarak elde edilmiştir.

50 diyot için ölçülen kapasite-gerilim (C-V) karakteristiklerinden, Schottky engel yüksekliğinin (Φ_B) hesaplanan değerlerinin istatistik analizlerinden ortalama engel yüksekliği $\bar{\Phi}_B=0,822$ eV ve standart sapması $\sigma=0,005$ eV olarak bulunmuştur. Ortalama donör taşıyıcı yoğunluğu $\bar{N}_D=1,311 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ve standart sapması $\sigma=1,083 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$, ortalama Fermi enerjisi $\bar{E}_F=0,257$ eV ve standart sapması $\sigma=0,002$ eV, ortalama Schottky engel alçalması $\Delta\bar{\Phi}_B=1,363 \times 10^{-2}$ eV ve standart sapması $\sigma=2,591 \times 10^{-4}$ eV, ortalama tüketme tabakası genişliği $\bar{W}_D=7,573 \times 10^{-5} \text{cm}$ ve standart sapması $\sigma=2,688 \times 10^{-6} \text{cm}$, ortalama seri direnç $\bar{R}_s=48,13 \Omega$ ve standart sapması $\sigma=10,36 \Omega$ olarak elde edilmiştir. Hill-Coleman metodu kullanılarak ortalama arayüzey durum yoğunlukları $\bar{N}_{ss}=5,595 \times 10^{12} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ ve standart sapması $\sigma=1,104 \times 10^{12} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ olarak belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Braun, K.F. (1874). *Physical Chemistry*, 153, 556.
2. Schottky, W. (1938). Raumladungsschwächung beim schrotoeffekt und funkeleffekt. *Physica*, 4, 175.
3. Bardeen, J. (1947). Surface state and rectification at a metal-semiconductor contact. *Phys Rev.*, 71,717-727.
4. Rhoderick, E.H. (1970). The physics of the Schottky barriers. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 3, 1153-1167.
5. Rideout, V.L. (1978). A review of the theory, technology and applications of metal semiconductor rectifiers. *Thin Solid Films*, 48(3), 261-291.
6. Cowley, A.M., Sze, S.M. (1965) Surface states and barrier height of metal semiconductor systems. *J. Appl. Phys.*, 36, 3212-3220.
7. Barret, C., Vapaille, A. (1979). Interface states in a cleaved M-S junction. *J. Appl Phys.*, 50(6), 4217-4222.
8. Aboelfotoh, M.O., Tu, K.N. (1986). Schottky-barrier heights of Ti and TiSi₂ on n-type and p-type Si(100)", *Phys. Rev. B*, 34(4), 2311-2318.
9. Sze, S. M. (1981). *Physics of Semiconductor Devices* (Second edition). New York:John Wiley & Sons, 362-390.
10. Rhoderick, E. H., Williams, R. H. (1988). *Metal-Semiconductor Contacts* (Second edition). Oxford:Clarendon Press.
11. Tuğluoğlu, N., Yakuphanoglu, F., and Karadeniz, S. (2007). Determination of the interface state density of the In/p-Si Schottky diode by conductance and capacitance–frequency characteristics. *Physica B: Condensed Matter*, 393, 56-60.
12. Yakuphanoglu, F., Tuğluoğlu, N., and Karadeniz, S. (2007). Space charge-limited conduction in Ag/p-Si Schottky diode. *Physica B: Condensed Matter*, 392, 188-191.
13. Karadeniz, S., Tuğluoğlu, N., Şahin, M., and Şafak, H. (2005). Series resistance calculation for Ag contacts on single crystal layered p-SnS and p-SnSe compound semiconductors in the wide temperature range. *Microelectronic Engineering*, 81, 125-131.
14. Şahin, M., Şafak, H., Tuğluoğlu, N., and Karadeniz, S. (2005). Temperature-dependent of current-voltage characteristics of Ag/p-SnS Schottky barrier diodes. *Applied Surface Science*, 242, 412-418.
15. Karadeniz, S., Şahin, M., Tuğluoğlu, N., and Şafak, H. (2004). Temperature dependent barrier characteristics of Ag/p-SnS Schottky diodes. *Semiconductor Science and Technology*, 19, 1098-1103.

16. Acar, S., Karadeniz, S., Tuğluoğlu, N., Selçuk, A.B., and Kasap, M. (2004). Gaussian distribution of inhomogeneous barrier height in Ag/p-Si (100) Schottky barrier diodes. *Applied Surface Science*, 233, 373-381.
17. Tuğluoğlu, N., Karadeniz, S., Acar, S., and Kasap, M. (2004). Temperature dependent barrier characteristics of inhomogeneous In/p-Si (100) Schottky barrier diodes. *Chinese Physics Letters*, 21, 1795-1798.
18. Tuğluoğlu, N., Karadeniz, S., Şahin, M., and Şafak, H. (2004). Temperature dependent barrier characteristics of Ag/p-SnSe Schottky diodes based on I-V-T measurements. *Semiconductor Science and Technology*, 19, 1092-1097.
19. Chand, S., Kumar, J. (1997). Electron transport and barrier inhomogeneities in palladium silicide Schottky diodes. *Applied Physics A*, 65, 497-503.
20. Gülnahar, M. (2008). *Al-Au/GaTe Schottky yapıların sıcaklığa bağlı akım-gerilim (I-V-T) ve kapasite-gerilim (C-V-T) karakteristikleri*, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum (Yayınlanmamış).
21. Korkut, H., 2009. *Aynı şartlarda hazırlanan Cr/n-GaAs Schottky kontaklarında Numune sıcaklığına bağlı T_0 anormalliğinin ısıtma tavlama ile iyileştirilmesi*, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum (Yayınlanmamış).
22. Maeda, K. (2005). Nonideality of Au/Si and Au/GaAs Schottky barriers due to process induced defects. *Applied Surface Science*, 252, 5659-5675.
23. Khan, M. R. H., Nakayama, H., Detchprohm, T. Hiramatsu, K., and Sawaki, N. (1997). A study on barrier height of Au- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ Schottky diodes in the range 0 x 0.20. *Solid State Electronics*, 41, 287-294.
24. Tung, R.T. (1992). Electron transport at metal-semiconductor interfaces: General theory. *Physical Review B*, 45(23), 13509.
25. Tung, R.T., Levi, A.F., Sullivan, J.P., and Schrey, F. (1991). Schottky-barrier inhomogeneity at epitaxial NiSi₂ interfaces on Si(100). *Physical Review Letters* 66, 72.
26. Mönch, W. (1999). Barrier heights of real Schottky contacts explained by metal-induced gap states and lateral inhomogeneities. *Journal of Vacuum Science Technology B* 17(4), 1867-1877.
27. Schmitsdorf, R.F., Kampen, T.U., and 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 Technology B* 15(4), 1221-1226.
28. Werner, J.H., Güttler, H.H. (1991). Barrier inhomogeneities at Schottky contacts, *Journal of Applied Physics*, 69(3), 1522-1533.

29. Mönch, W., Schmitsdorf, R.F. (1999). Influence of the interface structure on the barrier height of homogeneous Pb/n-Si(111) Schottky contacts, *Journal of European Physics B*, 7, 457-466.
30. Nuhoğlu, Ç., Aydoğan, Ş., and Türüt, A. (2003). The barrier height inhomogeneity in identically prepared Pb/p-type Si Schottky barrier diodes. *Semiconductor Science and Technology*, 18, 1-5.
31. Sağlam, M. Cimilli, F.E., and Türüt, A. (2004). Experimental determination of the laterally homogeneous barrier height of Au/n-Si Schottky barrier diodes. *Physica B*, 348, 397-403.
32. Çetin, H., Şahin, B., Ayyıldız, E., and Türüt, A. (2005). Ti/p-Si Schottky barrier diodes with interfacial layer prepared by thermal oxidation. *Physica B*, 364, 133-141.
33. Güllü, Ö., Asubay, S., Biber, M., Kılıçoğlu T., and Türüt, A. (2010). Electrical properties of safranine T/p-Si organic/inorganic semiconductor devices. *European Physics Journal of Applied Physics*, 50, 10401-10406.
34. Aksu, P. (2010). *n-GaAs üzerinde oluşturulan FeCrNiC Schottky kapı metalik diyotların elektriksel karakterizasyonu*, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum (Yayınlanmamış).
35. Güzeldir, B., Sağlam, M., and Ateş, A. (2011). Laterally inhomogeneous barrier analysis of identically prepared Cd/CdS/n-Si/Au-Sb structures by SILAR method. *Microelectronics Reliability*, 51, 2179-2184.
36. Boyarbay, B., Çetin, H., Kaya, M., Ayyıldız, E. (2008). Correlation between barrier heights and ideality factors of H-terminated Sn/p-Si(100) Schottky barrier diodes. *Microelectronic Engineering*, 85, 721-726.
37. Güler, G., Güllü, Ö., Bakkaloğlu, Ö.F., and Türüt, A. (2008). Determination of lateral barrier height of identically prepared Ni/n-type Si Schottky barrier diodes by electrodeposition. *Physica B*, 403, 2211-2214.
38. Asubay, S., Güllü, Ö., and Türüt, A. (2008). Determination of the laterally homogeneous barrier height of thermally annealed and unannealed Au/p-InP/Zn-Au Schottky barrier diodes. *Applied Surface Science*, 254, 3558-3561.
39. Chawanda, A., Roro, K.T., Aurret, F.D., Mtangi, W., Nyamhere, C., Nel, J., and Leach, L. (2010). Determination of the laterally homogeneous barrier height of palladium Schottky barrier diodes on n-Ge (1 1 1). *Materials Science in Semiconductor Processing*, 13, 371-375.
40. Güllü, Ö., Barış, Ö., Biber, M., and Türüt, A. (2008). Laterally inhomogeneous barrier analysis of the methyl violet/p-Si organic/inorganic hybrid Schottky structures. *Applied Surface Science*, 254, 3039-3044.
41. Duman, S., Doğan, S., Gürbulak, B., and Türüt, A. (2008). The barrier-height inhomogeneity in identically prepared Ni/n-type 6H-SiC Schottky diodes. *Applied Physics A* 91, 337-340.

42. Asubay, S. (2011). The electrical characteristics of Al/p-InP Schottky contacts. *Microelectronic Engineering*, 88, 109–112.
43. Aydoğan, B.B. (2014). *p-Si yarıiletkeni ile hazırlanan Schottky eklemlerin elektriksel parametrelerinin hesaplanması*, Yüksek Lisans Tezi, Giresun Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Giresun (Yayınlanmamış).
44. Albayrak, H. (2006). *Ti/Si ve Zr/Si eklemlerin elektriksel karakteristikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul (Yayınlanmamış).
45. Büget, U., Wright, G.T. (1967). Space-charge-limited current in silicon. *Solid-State Electronics*, 10, 199-207.
46. Ziel, A. (1968). *Solid-state physical electronics*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc, 7: 136-144.
47. Güllü, Ö. (2008). *H₂ öntavlamalı Au/n-GaAs diyotlarda elektriksel karakteristiklerin Schottky metal kalınlığı ve sıcaklığa bağlı değişiminin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum (Yayınlanmamış).
48. Eun, J., Cooper, J. A. (1993). *High temperature ohmic contact technology to n-type GaAs*. PhD Thesis, School of Electrical Eng. Purdue University, India.
49. Özmenteş, R. (2006). *Schottky diyotların karakteristik parametrelerinin belirlenmesinde frekans optimizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van (Yayınlanmamış).
50. Norde, H.A. (1979). Modified forward I-V plot for schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 50, 5052-5054.
51. Bohlin, K.H. (1986). Genaralized Norde plot including determination of the ideality factor. *Journal of Applied Physics*, 60(3), 1223-1224.
52. Cheung, S. K., Cheung, N. W. (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49, 85-87.
53. Barış, B., Yüksel, Ö.F., Tuğluoğlu, N., and Karadeniz, S. (2013). Double barrier heights in 5, 6, 11, 12-tetraphenylnaphthacene (rubrene) based organic Schottky diode. *Synthetic Metals*, 180, 38-42.
54. Yüksel, Ö. F., Tuğluoğlu, N., Gülveren, B., Şafak, H., and Kuş, M. (2013) “Electrical Properties of Au/perylene-monoimide/p-Si Schottky Diode. *Journal of Alloys and Compounds*, 577, 30-36.
55. Yüksel, Ö. F., Tuğluoğlu, N., Şafak, H., Nalçacigil, Z., Kuş, M., and Karadeniz, S., “Analysis of temperature dependent electrical properties of Au/perylene-diimide/n-Si Schottky diodes” *Thin Solid Films*, 534, 614-620, (2013).
56. Tuğluoğlu, N., Karadeniz, S. (2012). Analysis of current-voltage and capacitance-voltage characteristics of perylene-monoimide/n-Si Schottky contacts” *Current Applied Physics*, 12, 1529-1535.

57. Tuğluoğlu, N. (2007). ^{60}Co γ -ray irradiation effects on the interface traps density of tin oxide films of different thicknesses on n-type Si (111) substrates” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 254, 118-124.
58. Morgan, D. V., Frey, J. (1979). Schottky barrier height: a design parameter for device applications. *Solid-State Electronics*, 22(10), 865-873.
59. Fonash, S. J. (1975). Role of the interfacial layer in metal-semiconductor solar cells. *Journal of Applied Physics*, 46(3), 1286-1289.
60. Meirhaeghe, R. L., Cardon, F., and Gomes, W. P. (1980). Effects of thin oxide layers on the characteristics of GaAs MIS solar cells”. *Physica Status Solidi (a)*, 59(2), 477-484.
61. Hill, W. A., Coleman C.C. (1980). A single-frequency approximation for interface state density determination. *Solid-State Electronics*, 23(9), 987-993.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : BENGİN AKGÜL, Kübra
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 24.06.1990 Ankara
 Medeni Hali : Evli
 Telefon : 0 (554) 210 26 69
 E-mail : kubra_bengin@hotmail.com



Eğitim Derecesi

Eğitim Kurumu

Mezuniyet Yılı

Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/ Fizik Bölümü	Devam Ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi/Fizik Bölümü	2012
Lise	Cumhuriyet Anadolu Lisesi	2008

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2014	ANFA Şirketi	İş Güvenliği Uzmanı
2013	Tim OSGB	İş Güvenliği Uzmanı
2013	Gazi Üniversitesi	Öğrenci Asistanlığı

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

H. Koralay, N. Tuğluoğlu, K.B. Akgül, Ş. Çavdar, “Analysis of hopping conduction and space charge limited currents in nearly ideal metal/semiconductor contacts” Gazi University Journal of Science 27, 901-907 (2014)

Hobiler

Seyahat, Film izlemek, Bilgisayar Teknolojileri