



T.C.

GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

P-Si YARI İLETKENİ İLE HAZIRLANAN SCHOTTKY EKLEMLERİN
ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİNİN HESAPLANMASI

BEDRİ AYDOĞAN BAYRAM

EKİM 2014

T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

P-Si YARI İLETKENİ İLE HAZIRLANAN SCHOTTKY EKLEMLERİN
ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİNİN HESAPLANMASI

BEDRİ AYDOĞAN BAYRAM

EKİM 2014

Fen Bilimleri Enstitü Müdürünün onayı.

....../....../.....

Doç. Dr. Kültiğın ÇAVUŞOĞLU

.....

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak Fizik Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Birol ERTUĞRAL

.....

Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumuzu ve Yüksek Lisans tezi olarak bütün gerekliliklerini yerine getirdiğini onaylarız.

Doç. Dr. Serdar KARADENİZ

.....

Ortak Danışman

Yrd. Doç. Dr. Behzad BARIŞ

.....

Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Nihat TUĞLUOĞLU

.....

Doç. Dr. Birol ERTUĞRAL

.....

Doç. Dr. Ömer Faruk YÜKSEL

.....

Doç. Dr. Serdar KARADENİZ

.....

Yrd. Doç. Dr. Behzad BARIŞ

.....

ÖZET

P-Si YARI İLETKENİ İLE HAZIRLANAN SCHOTTKY EKLEMLERİN ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİNİN HESAPLANMASI

BAYRAM, Bedri Aydoğan

Giresun Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Behzad BARIŞ

Ortak Danışman : Doç. Dr. Serdar KARADENİZ

EKİM 2014, 100 sayfa

Bu tez çalışmasında, (100) doğrultusunda kesilmiş boron katkılı, yaklaşık 5 cm çapında, 5 Ω -cm öz dirençli 250 μ m kalınlığında p-tipi silisyum kristali kullanılmıştır. Kimyasal temizlik aşamalarından sonra vakum ortamında aynı kristal üzerinde 1.7 mm çaplı 40 adet diyot oluşturulmuştur. Oluşturulan Al/p-Si diyotlarının temel elektriksel parametreleri belirlenmiştir. Bunun için, akım-gerilim (I - V), kapasite-gerilim (C - V) ve iletkenlik-gerilim (G - V) ölçümleri oda sıcaklığında ve karanlık ortamda yapılmıştır. Bu ölçümlerden hareketle 40 adet diyot için idealite faktörü (n), doyma akımı (I_o), engel yüksekliği (Φ_B), arayüzey durumları (N_{ss}), difüzyon potansiyeli (V_d), seri direnç (R_s), Fermi enerji seviyesi (E_F), tüketim tabakası genişliği (W_D), Schottky alçalması ($\Delta\Phi_B$) ve maksimum elektrik alan (E_m) önemli gibi diyot parametreleri tayin edilmiştir. Seri direnç hesaplamalarında kullanılan yöntemlerden elde edilen değerlerin birbiri ile uyum içinde olduğu görülmüştür. Aynı şartlar altında ve aynı kristal üzerinde oluşturulmalarına rağmen her diyot için farklı parametre değerleri elde edilmesi sonucunda tüm parametreler bir Gaussian fonksiyonuna fit edilmiştir. Bu fonksiyon yardımıyla 40 adet

diyot için hesaplanan diyot parametrelerinin istatistiksel dağılımları ile ortalama değerleri ve standart sapmaları elde edilmiştir.

Deneysel sonuçlar, metal/yarıiletken arasındaki oluşan doğal oksit tabakasının, arayüzey durumlarının, engel yüksekliği homojensizliklerinin ve seri direncin yapının elektriksel karakteristikleri üzerinde önemli bir rol oynadığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Schottky diyot, metal/yarıiletken, yüzey durumları, seri direnç, Gaussian dağılımı

ABSTRACT

CALCULATION OF THE ELECTRICAL PARAMETERS OF SCHOTTKY JUNCTIONS PREPARED BY P-Si SEMI-CONDUCTOR

BAYRAM, Bedri Aydoğan

Giresun University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics, M. Sc. Thesis

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Behzad BARIŞ

Co- Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Serdar KARADENİZ

OCTOBER 2014, 100 pages

In this thesis, a p-type boron doped and (100) oriented silicon crystal with diameter of 5 cm, resistivity of 5 Ω -cm and thickness of 250 μ m has been used. After chemical cleaning process, 40 diodes have been formed on the same crystal with a diameter of 1.7 mm. The basic electrical parameters of diodes that formed from Al/p-Si have been determined. For this, the current-voltage (I - V), capacitance-voltage (C - V) and conductance-voltage (G - V) measurements have been made at room temperature and dark environment. From these measurements the ideality factor (n), saturation current (I_o), barrier height (Φ_B), surface states (N_{ss}), diffusion potential (V_d), serial resistor (R_s), Fermi energy level (E_f), depletion layer width (W_D), Schottky lowering ($\Delta\Phi_B$) and maximum electric field (E_m) have been determined for 40 diodes. The values that obtained using serial resistor calculation techniques have been coherent with each other. Despite the use same conditions and crystal surface to formation of diodes the obtained parameter values have been different for each diode. For this reason all parameters have been fitted to Gaussian function. With the aid of this function the mean values and standard deviation of calculated diode parameters have been obtained with statistical dispersion for 40 diodes.

Experimental results show that, the nature oxide layer that formed on the metal/semiconductor interface, surface states, barrier height inhomogeneities and serial resistor play important role on the electrical characteristics of structure.

Key Words: Schottky diode, metal/semiconductor, surface states, serial resistor, Gaussian distribution

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının her aşamasında, her tŒrlŒ bilimsel desteği ile bŒyŒk ilgi ve yardımlarını gŒrmŒő bulunduğum Danışman Hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Behzad BARIŞ'a (Giresun Œniversitesi Fen-Edebiyat FakŒltesi Fizik BŒlŒmŒ), Ortak Danışman Hocam Sayın Doç. Dr. Serdar KARADENİZ'e (SaraykŒy NŒkleer Araştırma ve Eğitim Merkezi) teőekkŒrlerimi sunarım.

TŒm hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, sevincimde ve ŒzŒntŒmde her zaman yanımda olan çok değerli AİLEM'e sonsuz sevgi, sayęı ve őŒkranlarımı sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	III
TEŞEKKÜR.....	V
İÇİNDEKİLER	VI
TABLolar DİZİNİ	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	XVIII
1.GİRİŞ	1
2.KURAMSAL TEMELLER	3
2.1. Yarıiletkenler.....	4
2.1.1. Deşik Kavramı.....	5
2.1.2. Gerçek Yarıiletkenler	7
2.1.3. Katkılı Yarıiletkenler.....	9
2.2. Metal/Yarıiletken (Schottky) Kontaklar.....	12
2.3. Metal/p-tipi Yarıiletken Kontaklar	13
2.4. Metal/Yarıiletken Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları	17
2.4.1. Termiyonik Emisyon (TE)	18
2.4.2. Difüzyon.....	20
2.4.3. Termiyonik Emisyon Difüzyon (TED)	21
2.4.4. Engel Boyunca Tünelleme	23
2.5. Görüntü Kuvvet Etkisi (Schottky Alçalması).....	25
2.6. İdeallik Faktörü	26
2.7. Seri Direnç.....	28
2.7.1. Seri Direnç Ölçme Yöntemleri.....	29

2.7.1.1. Norde Yöntemi	29
2.7.1.2. Cheung Yöntemi	32
2.8. Aygıt Karakterizasyonu.....	33
2.8.1. Akım-Gerilim (I-V) Karakteristikleri.....	34
2.8.2. Kapasite-Gerilim (C-V) Karakteristikleri	35
2.9. Arayüzey Durumları.....	37
2.9.1. Arayüzey Durumları ve Belirleme Yöntemleri.....	38
2.9.1.1. Kapasite Yöntemi	38
2.9.1.1. Akım Yöntemi	39
3. MATERYAL VE METOT	41
3.1. Yapıların Hazırlanması.....	41
3.1.1. Kristal Temizleme İşlemi	41
3.1.2. Al/p-Si Yapılarının Oluşturulması	44
3.2. Kullanılan Ölçüm Cihazları ve Düzenekleri	49
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	51
4.1. Giriş.....	51
4.2. Düz Beslem Akım-Gerilim (I-V) Karakteristikleri	51
4.3. Kapasite-Gerilim (C-V) ve İletkenlik-Gerilim (G-V) Karakteristikleri.....	64
4.4. Engel Yüksekliği Homojensizliği	79
4.4.1. Akım-Gerilim (I-V) Parametrelerinin Gauss Metoduyla Analizi.....	79
4.4.2. Kapasite-Gerilim (C-V) ve İletkenlik-Gerilim (G-V) Parametrelerinin Gauss Metoduyla Analizi.....	86
5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR	91
KAYNAKLAR	96
ÖZGEÇMİŞ	100

TABLULAR DİZİNİ

Çizelge 4.1 Al/p-Si(100) Schottky diyotlarının I-V ölçümlerinden elde edilen n , I_0 , Φ_B ve N_{ss} değerleri.	54
Çizelge 4.2 Cheung yöntemiyle elde edilen R_s , n ve Φ_B değerleri.	59
Çizelge 4.3 $F(V)$ fonksiyonu yardımıyla elde edilmiş Φ_B ve R_s değerleri.	61
Çizelge 4.4 Al/p-Si(100) Schottky diyotlarının $1/C^2$ - V eğrilerinden elde edilen Φ_B , V_d , N_A , E_m , W_D , ve D_{it} parametreleri.	78

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Bir yarıiletkenin k-uzayında enerji bant diyagramları.....	4
Şekil 2.2. Enerji bantları ve elektriksel iletkenlik gösterimi: a) Tamamen su ve hava dolu borular b) İçinde su damlası ve hava kabarcığı bulunan borular.....	5
Şekil 2.3. Silisyum kristali içerisine yerleşmiş verici atom (As).....	9
Şekil 2.4. Silisyum kristali içerisine yerleşmiş alıcı atom (B).....	10
Şekil 2.5. Verici atom enerji seviyesi	11
Şekil 2.6. Alıcı atom enerji seviyesi	11
Şekil 2.7. P-tipi bir yarıiletken ile metal malzemenin kontak yapılmadan önceki enerji-bant diyagramı	13
Şekil 2.8. P-tipi bir yarıiletken ile metal malzemenin kontak yapıldıktan sonraki enerji-bant diyagramı.....	15
Şekil 2.9. Bir metal/p-Si diyodunun enerji-bant diyagramları: a) dengede, b) düz beslem, c) ters beslem altında.....	15
Şekil 2.10. Metal/p-tipi omik kantağına ait enerji-bant diyagramı: a) Kontak yapılmadan, b) Kontak yapıldıktan sonraki durum	16
Şekil 2.11. Ters ve düz beslem durumlarında omik kantağın enerji bant diyagramları: a) $V < 0$ durumu (ters beslem), b) $V > 0$ durumu (ters beslem)	17
Şekil 2.12. Bir metal/n-Si eklem yapısında akım iletim mekanizmalarının şematik gösterimi.....	18
Şekil 2.13. Metal/n-tipi eklem için enerji-bant diyagramı	22
Şekil 2.14. N-tipi yarıiletken için TAE ve AE mekanizmalarının şematik gösterimi: a) düz beslem ve b) ters beslem.....	24
Şekil 2.15. Akım-iletim mekanizmaları için $nkT/q - kT/q$ eğrileri	27
Şekil 2.16. N-tipi bir MS kantağın detaylı enerji-bant diyagramı	34

Şekil 3.1. Boron katkılı p-tipi Silisyum kristali	42
Şekil 3.2. "Bandelin Sonorex" marka ultrasonik banyo	42
Şekil 3.3. "Innovation Water Purification" marka deiyonize su sistemi	43
Şekil 3.4. Kristal temizliği aşamasında kullanılan ısıtıcı düzeneği.....	44
Şekil 3.5. Al/p-Si yapılarının oluşturulması sırasında kullanılan "Edwards" marka evaporasyon sistemi.....	44
Şekil 3.6. Omik kontağın oluşturulması için kullanılan metal maske	45
Şekil 3.7. Numune tutucu içerisine maske ile yerleştirilmiş silisyum kristali	46
Şekil 3.8. Evaporasyon işleminde kullanılan tungsten pota.....	46
Şekil 3.9. "Edwards FTM6" marka kalınlık ölçer	47
Şekil 3.10. Omik kontak oluşumunda kullanılan tungsten levhalar	48
Şekil 3.11. Doğrultucu kontak oluşumunda kullanılan metal maske.....	48
Şekil 3.12. Çeyrek silisyum alt tabaka üzerinde oluşturulan Al/p-Si Schottky yapılarının görüntüsü	49
Şekil 3.13. Oluşturulan Al/p-Si Schottky yapılarının şematik diyagramı.....	49
Şekil 3.14. Bilgisayar kontrollü Keithley 2400 Source Meter ve Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer cihazları	50
Şekil 4.1. Tüm Al/p-Si(100) Schottky diyotlarının yarı logaritmik düz beslem I-V karakteristikleri: a) 1'den 20 nolu numuneye kadar, (b) 21'den 40 nolu numuneye kadar.....	53
Şekil 4.2. Al/p-Si(100) Schottky diyotlarından bir tanesinin yarı logaritmik düz beslem I-V karakteristiği.	54
Şekil 4.3. Tüm Al/p-Si(100) Schottky diyotlarının $dV/d(\ln I)$ - I eğrileri: a) 1'den 20 nolu numuneye kadar, (b) 21'den 40 nolu numuneye kadar	56
Şekil 4.4. Tüm Al/p-Si(100) Schottky diyotlarının $H(I)$ -I eğrileri: a) 1'den 20 nolu numuneye kadar, (b) 21'den 40 nolu numuneye kadar	57

Şekil 4.5. (4) nolu diyot için a) $dV/d(\ln I) - I$ eğrisi, b) $H(I)-I$ eğrisi.....	58
Şekil 4.6. Tüm Al/p-Si(100) Schottky diyotlarının $F(V) - V$ eğrileri: a) 1'den 20 nolu numuneye kadar, (b) 21'den 40 nolu numuneye kadar	60
Şekil 4.7. Düz beslem $I-V$ eğrileri kullanılarak elde edilmiş arayüzey durum yoğunluklarının enerjiye bağlı dağılımları: a) 1'den 20 nolu numuneye kadar, (b) 21'den 40 nolu numuneye kadar.	63
Şekil 4.8. Al/p-Si(100) Schottky diyotlarının $C-V$ eğrileri: a) 1'den 20 nolu numuneye kadar, (b) 21'den 40 nolu numuneye kadar	65
Şekil 4.9. Al/p-Si(100) Schottky diyotlarının $G-V$ eğrileri: a) 1'den 20 nolu numuneye kadar, (b) 21'den 40 nolu numuneye kadar	66
Şekil 4.10. Al/p-Si(100) Schottky diyotlarının uygulanan gerilime bağlı seri direnç eğrileri: a) 1'den 20 nolu numuneye kadar, (b) 21'den 40 nolu numuneye kadar.....	68
Şekil 4.11. Seri direnç etkisi dikkate alınarak düzeltilmiş kapasite-gerilim (C_c-V) eğrileri: a) 1'den 20 nolu numuneye kadar, (b) 21'den 40 nolu numuneye kadar.....	70
Şekil 4.12. Seri direnç etkisi dikkate alınarak düzeltilmiş iletkenlik-gerilim (G_c-V) eğrileri: a) 1'den 20 nolu numuneye kadar, (b) 21'den 40 nolu numuneye kadar.....	71
Şekil 4.13. 5 nolu diyodun uygulanan gerilime karşı düzeltilmiş kapasite ve iletkenlik eğrisi	72
Şekil 4.14. Al/p-Si(100) Schottky diyotlarının $1/C^2-V$ eğrileri: a) 1'den 20 nolu numuneye kadar ve (b) 21'den 40 nolu numuneye kadar	75
Şekil 4.15.a. 40 adet Schottky diyot için $I-V$ ölçümlerinden elde edilen I_o için Gaussian dağılımı	80
Şekil 4.15. 40 adet Schottky diyot için $I-V$ ölçümlerinden elde edilen parametrelerin istatistiksel dağılımları: b) n için Gaussian dağılımı, c) Φ_B için Gaussian dağılımı	81

Şekil 4.16.a. 40 adet Schottky diyot için elde edilen engel yüksekliklerinin (Φ_B) Norde yönteminden elde edilen Gaussian dağılımı	82
Şekil 4.16. 40 adet Schottky diyot için elde edilen engel yüksekliklerinin (Φ_B) ve idealite faktörlerinin (n) Cheung yönteminden elde edilen Gaussian dağılımı (b ve c)	83
Şekil 4.17. 40 adet Schottky diyot için $I-V$ ölçümleri yardımıyla elde edilmiş arayüzey durum yoğunluklarının istatistiksel dağılımı	84
Şekil 4.18. 40 adet Schottky diyot için Norde ve Cheung yöntemleri kullanılarak elde edilmiş seri direnç değerlerinin istatistiksel dağılımları: a) Norde yöntemi için Gaussian dağılımı, b) $dV/dLn(I) - I$ fonksiyonu için Gaussian dağılımı.....	85
Şekil 4.18.c. 40 adet Schottky diyot için Norde ve Cheung yöntemleri kullanılarak elde edilmiş seri direnç değerlerinin $H(I)-I$ fonksiyonu için Gaussian dağılımı	86
Şekil 4.19. 40 adet Schottky diyot için $1/C^2-V$ eğrileri kullanılarak elde edilmiş difüzyon potansiyeli (V_d) değerlerinin istatistiksel dağılım grafîği	87
Şekil 4.20. 40 adet Schottky diyot için elde edilmiş akseptör taşıyıcı yoğunluğu (N_A) değerlerinin istatistiksel dağılım grafîği	87
Şekil 4.21. 40 adet Schottky diyot için elde edilmiş maksimum elektrik alan (E_m) değerlerinin istatistiksel dağılım grafîği.....	88
Şekil 4.22. 40 adet Schottky diyot için elde edilmiş tüketme tabakası genişliği (W_D) değerlerinin istatistiksel dağılım grafîği.....	89
Şekil 4.23. 40 adet Schottky diyot için elde edilmiş engel yüksekliği (Φ_B) değerlerinin istatistiksel dağılım grafîği	90
Şekil 4.24. 40 adet Schottky diyot için elde edilmiş arayüzey durum yoğunlukları (D_{it}) değerlerinin istatistiksel dağılım grafîği	90

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Si	: Silisyum
GaAs	: Galyum arsenit
InP	: İndiyum fosfor
GaP	: Galyum fosfor
E_c	: İletkenlik bandının enerji seviyesi
E_v	: Değerlik bandının enerji seviyesi
E_g	: Yasak enerji bant aralığı
E_F	: Fermi enerji seviyesi
q	: Elektronik yük
N_c	: İletkenlik bandı etkin durum yoğunluğu
p	: Deşiklerin etkin yoğunluğu
N_v	: Değerlik bandındaki etkin durum yoğunluğu
n_i	: Gerçek taşıyıcı yoğunluğu
n	: Elektronların etkin yoğunluğu
k	: Boltzmann sabiti
T	: Kelvin cinsinden sıcaklık
m_e^*	: Elektronların etkin kütlesi
m_h^*	: Deşiklerin etkin kütlesi
E_i	: Gerçek enerji seviyesi
As	: Arsenik
B	: Boron
E_d	: Verici atom için izin verilen enerji seviyesi
E_a	: Alıcı atom için izin verilen enerji seviyesi
N_A	: Alıcı yoğunluğu
N_D	: Verici yoğunluğu
E	: Metalden elektron sökmek için gerekli enerji
h	: Planck sabiti
γ	: Parçacık frekansı

Φ_m	: Metalin iş fonksiyonu
I	: Taşıyıcıların oluşturduğu toplam akım
E_{Fyi}	: Yarıiletkenin Fermi seviyesi
Φ_{yi}	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
χ_{yi}	: Yarıiletkenin elektron yatkınlığı
V_d	: Difüzyon potansiyeli
V_F	: Düz beslem
V_R	: Ters beslem
J_{sm}	: Elektronların yarıiletkenden metale doğru oluşturduğu akım yoğunluğu
v_x	: Elektronların hızı
Φ_B	: Engel yüksekliği
m^*	: Taşıyıcıların etkin kütlesi
A^*	: Richardson sabiti
J_n	: Doyma akımı yoğunluğu
$n(x)$: Elektron yoğunluğu
μ	: Elektron mobilitesi
D_n	: Elektron difüzyon sabiti
$E(x)$: Schottky bölgesindeki elektrik alanı
N_D	: Verici atomlarının yoğunluğu
ϵ_s	: Yarıiletkenin elektrik geçirgenliği
$q\Psi(x)$: Elektron potansiyel enerjisi
$q\Phi(x)$: Yarı-Fermi seviyesi
n_m	: Elektron yoğunluğu
J_o	: Akım yoğunluğu
A^{**}	: Modifiye edilmiş Richardson sabiti
n	: İdeallik faktörü
V_n	: Gerçek Fermi enerji seviyesi ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkı
N_A	: Alıcı atomlarının yoğunluğu
E_{o0}	: Tünelleme parametresi
ϵ_o	: Boşluğun elektriksel geçirgenliği

$\phi(x)$: Potansiyel enerji
$\Delta\Phi_B$: Schottky alçalması
N_{ss}	: Arayüzey durumları
N_m	: Metal ile dengede olan arayüzey durumları yoğunluğu
N_y	: Yarıiletken ile dengede olan arayüzey durumları yoğunluğu
ϵ_i	: Oksit tabakasının elektriksel geçirgenliği
δ	: Arayüzey tabakasının kalınlığı
W_D	: Tüketme bölgesinin genişliği
$F(V)$: Norde fonksiyonu
R_s	: Seri direnç
V_0	: Norde fonksiyonu için minimum voltaj
γ	: Norde fonksiyonu için bir tam sayı
$dV/d(LnI)$: Birinci Cheung fonksiyonu
$H(I)$: İkinci Cheung fonksiyonu
$q\Phi_0$: Yüzey enerjisi Fermi seviyesi
E_F	: Fermi enerji seviyesi
$q\Phi_{B0}$: Sıfır beslem engel yüksekliği
Q_m	: Metal üzerindeki yüzey yükü
Q_{ss}	: Yarıiletken üzerindeki yüzey yükü
Q_{sc}	: Yarıiletkenin tüketme tabakasındaki uzay yükü
$q\Phi_0$: Yüzeydeki enerji seviyesi
I_0	: Doyma akımı
C_{HF}	: Yüksek frekans kapasitesi
C_{LF}	: Düşük frekans kapasitesi
C_{ox}	: Oksit kapasitesi
ϵ_{ox}	: Oksit tabakasının dielektrik sabiti
d_{ox}	: Oksit tabakası kalınlığı
ac	: Alternatif sinyal
Ψ_s	: Yüzey potansiyeli
C_2	: Taşıyıcı yoğunluğuna bağlı parametre

NH_4OH	: Amonyum hidroksit
H_2O_2	: Hidrojen peroksit
HF	: Hidroflorik asit
E_m	: Maksimum elektrik alan
$F(V_0)$: Minimum Norde fonksiyonu
Γ	: Etkin engel yüksekliği gerilim katsayısı
Φ_e	: Etkin engel yüksekliği
E_{ss}	: Arayüzey durumlarının enerjisi
$C_{m,acc}$: Biriktirme bölgesindeki ölçülen kapasite
$G_{m,acc}$: Biriktirme bölgesindeki ölçülen iletkenlik
C_m	: Ölçüm kapasitesi
G_m	: Ölçüm iletkenliği
w	: Açısal frekans
C_c	: Düzeltilmiş kapasite
G_c	: Düzeltilmiş iletkenlik
D_{it}	: Arayüzey durum yoğunlukları
$G_{m,max}$: Maksimum iletkenlik
$C_{m,max}$: Maksimum kapasite
V_i	: Arayüzey potansiyeli
N_{AT}	: Teorik taşıyıcı yoğunluğu
ρ	: Özdirenç
N_{AD}	: Deneysel taşıyıcı yoğunluğu
Φ_F	: Gerçek Fermi enerji seviyesi ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkı
$P(\Phi_B)$: Engel yüksekliği olasılığı
$\bar{\Phi}_B$: Ortalama engel yüksekliği
σ_s	: Engel yüksekliğinin standart sapması
$1/\sigma_s\sqrt{2\pi}$: Normalizasyon sabiti

Kısaltmalar

$I-V$: Akım-Gerilim
$C-V$: Kapasite-Gerilim
$G-V$: İletkenlik-Gerilim
TE	: Termoyonik Emisyon
D	: Difüzyon
TED	: Termoyonik Emisyon-Difüzyon
TAE	: Termoyonik Alan Emisyonu
AE	: Alan Emisyonu
I/C^2-V	: Ters kapasite-Gerilim
RCA	: Radio Corporation of America
AC/DC	: Analog-Sayısal çevirici

1. GİRİŞ

Metal/yarıiletken (Schottky) kontaklar elektronik teknolojisinde son derece önemli devre elemanları olup yarıiletken teknolojisinin gelişmesi ile de farklı kullanım alanları bulmaktadırlar. Bu tür diyotlar son derece yüksek anahtarlama hızlarına sahip olduklarından yüksek frekans uygulamalarında rahatça kullanılabilirler. Bu uygulamalar genelde yüksek frekans sinyallerinin doğrultulması veya işlenmesi şeklindedir. Anahtarlama gerilimleri pn kontaklara göre daha düşük ve güç kayıpları oldukça azdır. Diğer taraftan hızlı anahtarlama sayesinde dedektörler ve modülatörler gibi cihazlarda alan etkili transistör ve varaktör (kapasitesi gerilimle değişen kondansatör) olarak kullanılırlar.

Schottky diyotlar, bir metal ile bir yarıiletkenin birleştirilmesi sonucu elde edilir. Silisyum (Si), galyum arsenit (GaAs) ve indiyum fosfor (InP) bu tip kontaklarda en çok kullanılan yarıiletkenlerdir. Özellikle galyum fosfor (GaP) ile yapılmış Schottky yapıları optoelektronik devre elemanları olarak geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Metal/yarıiletken yapıların kontak dirençleri çok küçük olduğundan düz beslem altında birkaç yüz milivolt mertebesinde hızlıca iletme geçebilirler. Düz beslem akım iletimleri çoğunluk taşıyıcıları ile olur. Ters beslem altında oluşan akımları azınlık taşıyıcı sayılarının düşük olması nedeniyle küçüktür. Bu yüzden gürültü seviyeleri azdır.

İlk metal/yarıiletken yapı, ince bir telin bir yarıiletkene temas ettirilmesiyle oluşturulan nokta şeklinde kontak diyottur. Bu tip kontaklar geliştirilmiş ve daha sonra Schottky kontak adını almıştır. 1874 yılında Braun [1] metal/yarıiletken yapılar üreterek katı malzemelerin elektriksel özelliklerinin incelenmesi ve elektronik devrelerde kullanılması alanında ilk çalışmaların temelini atmıştır. Ancak metal/yarıiletken kontakların tam olarak anlaşılması metal vakum sistemleriyle uğraşan araştırmacıların elde ettikleri gelişmelerden sonra olmuştur. Bu gelişmeler sırasında ilk olarak görüntü yüklerin oluşturduğu engel alçalması ve termioyonik emisyon olayları açıklanmış ve bunların metal/yarıiletken yapılarda da uygulanabileceği gösterilmiştir. 1931 yılında Schottky ve arkadaşları [2] bir metal/yarıiletken kantağında tüm kontak boyunca bir potansiyel azalması meydana

geldiğini göstermeleri bu kontağın doğrultucu olarak kullanılmasının ilk adımı olmuştur. Schottky ve Bethe [3] 1940 yılında vakum tüplü diyotlardaki iletkenliğin, metal/yarıiletken diyotlardaki iletkenlikle benzer olduğunu göstermişlerdir. Bardeen 1947’de Fermi seviyesi üzerinde arayüzey durumlarının var olduğunu göstermiştir. Bu durum engel yüksekliğinin sabit kalmasının ve malzemelerin iş fonksiyonları arasındaki farktan belirlenemeyişinin sebebini ortaya koymuştur. Metal/yarıiletken kontaklarda metal ile yarıiletken arasında doğal olarak oluşan arayüzey tabakasının kontağın elektriksel özelliklerini değiştirdiği görülmüştür. Bir diğer adı metal/yalıtkan/yarıiletken olan bu tip yapılar üzerine çalışmalar yoğunlaşmış, arayüzey tabakasının davranışlarını ve akım mekanizmalarını incelemek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir.

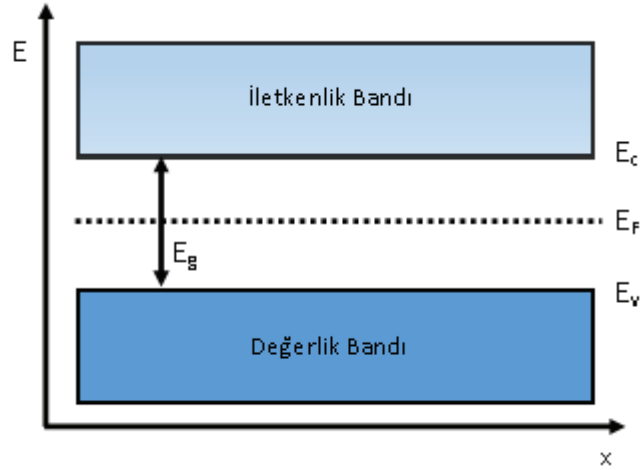
Bu çalışmada (100) düzleminde kesilmiş Boron katkılı p-tipi Silisyum yarıiletkeni kullanılarak 40 adet metal/p-Si Schottky yapısı üretilmiştir. Üretilen bu yapıların oda sıcaklığında ve karanlık ortamda akım-gerilim ($I-V$), kapasite-gerilim ($C-V$) ve iletkenlik-gerilim ($G-V$) ölçümleri alınmıştır. Ölçüm verileri ilgili teoriler yardımıyla değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

Günlük hayatımızın her alanında kullandığımız malzemeler iletkenliklerine göre üç şekilde sınıflandırılırlar: Metaller, yarıiletkenler ve yalıtkanlar. Bir malzemenin iletkenlik sınıfı malzemenin öz direncine göre belirlenebilirse de bu her zaman geçerli değildir. Malzemenin örgü yapılarındaki parçacık yoğunluğu ve bunların katı içerisindeki hareket kabiliyetleri o malzemenin iletkenliğini belirler. Metaller elektrik akımını elektronik geçişli ve iyonik geçişli olmak üzere iki farklı şekilde iletirler. Akım taşıyıcılarının elektronlar olduğu iletkenlere elektronik geçişli iletken adı verilir. Akım taşıyıcılarının malzeme iyonları ile olduğu iletkenlere de iyonik geçişli iletken adı verilir. Elektrolitler bu tip iletkenlere örnek verilebilir. Yarıiletken malzemeler ise bu iki tip geçişin her ikisine de sahip olabilirler. Ancak çoğu yarıiletken elektronik iletkenliğe sahiptir. Sonuç olarak malzemelerin elektrik iletkenlikleri arasındaki farkın açıklanabilmesi için enerji bant diyagramlarının bilinmesi gerekir.

2.1 Yarıiletkenler

Şekil 2.1’de bir yarıiletkenin k -uzayında iletkenlik ve değerlik bantlarından oluşan enerji bant diyagramı görülmektedir. Burada x eksenini kristal içerisindeki fiziksel uzaklığı belirtmektedir. Değerlik bantının maksimum enerjisi E_v ve iletkenlik bantının minimum enerjisi ise E_c ile gösterilmiş olup bu iki niceliğin arasındaki bölge ise E_g yasak enerji bant aralığı olarak adlandırılır.



Şekil 2.1 Bir yarıiletkenin k -uzayında enerji bant diyagramları.

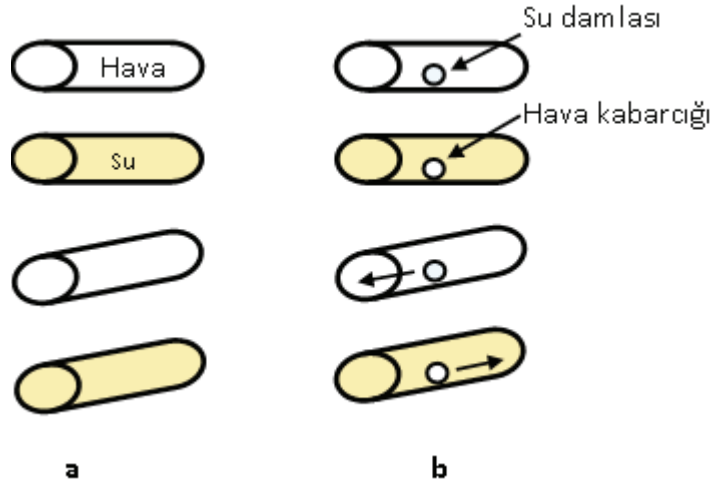
Katkılandırılmamış bir yarıiletken için Fermi enerji seviyesi (E_F) enerji bant aralığının ortasında kabul edilir. Fermi seviyesi malzeme içerisindeki elektronların sıfır Kelvin’deki maksimum enerjilerini temsil eder. Bu sıcaklık değerinde Fermi seviyesi altındaki izin verilen tüm enerji seviyeleri elektronlar tarafından işgal edilmiş olup, Fermi seviyesi üstündeki tüm enerji seviyeleri ise boştur. Diğer bir deyişle, Fermi seviyesi elektronlar tarafından yarı yarıya dolu bir enerji seviyesini temsil eder. Bir yarıiletkende sıfır Kelvinde değerlik bandı elektronlarla tamamen dolu, iletkenlik bandı ise tamamen boştur. Yalıtkanlarda da durum aynıdır. Bundan dolayı Fermi seviyesi enerji bant aralığı içerisinde herhangi bir yerde bulunur. Metal malzemelerde ise Fermi seviyesi enerji bantları ile içiçedir.

Bir yarıiletken ile yalıtkan arasındaki fark nicel (sayısal)’dir ve temelde bant aralığına dayanır. Tipik olarak bir yarıiletken bant aralığı 2 eV’den 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) ve 1.42 eV (galyum arsenit) şeklindedir. Buna karşılık yalıtkanların çok geniş bant aralıkları (5.47 eV - 9.0 eV arası) vardır ki elmas buna iyi bir örnektir. Bu malzemelerde oda sıcaklığındaki termal enerji, değerlik bandındaki bir elektronu iletkenlik bandına atlatmaya yetmez.

2.1.1 Deşik Kavramı

Bir katı malzeme içerisindeki elektriksel iletimi anlamak için elektrik yüklerinin enerji bantları arasındaki iletimi ile bir su borusundan damlayan suyu karşılaştırmak mümkündür. Şekil 2.2.a'da her iki tarafı kapatılmış iki su borusunu göz önüne alalım.



Şekil 2.2 Enerji bantları ve elektriksel iletkenlik gösterimi: a) Tamamen su ve hava dolu borular b) İçinde su damlası ve hava kabarcığı bulunan borular.

Altındaki boru (değerlik bandı) tamamıyla su dolu, üstteki boru (iletkenlik bandı) ise boş olsun. Burada her bir su damlası bir elektrona karşılık gelmektedir [4]. Eğik borular ise yarıiletkene dışarıdan uygulanan harici elektrik alanı temsil etmektedir. Tamamıyla dolu ve boş borular eğildiğinde hiçbir hareket veya akış

gözlenmez. Yani bu durumda yarıiletkende akım akışının olmadığı anlamına gelir. Bu da yarıiletkenin bir yalıtkan gibi davranması demektir (Şekil 2.2.a). Alttaki borudan su damladığını ve bu su damlasının da üstteki boruya geldiğini varsayarsak, bu benzetim bir elektronun değerlik bandından iletkenlik bandına doğru hareketini temsil edecektir. Borular eğildiğinde ise net bir sıvı akışı gözlenecektir. Bu da bir yarıiletkendeki akım akışına karşılık gelir (Şekil 2.2.b). Üst boru (iletkenlik bandı) içerisindeki su akışı su damlasının (elektron) hareketinden dolayıdır. Buna ilaveten aynı zamanda alttaki su borusunda (değerlik bandı) da boruyu terk eden su damlası yüzünden su akışı meydana gelmektedir. Çünkü boruyu terk eden bu su damlası geride hava kabarcığı (boşluk) bırakmıştır. Bu benzetim yardımıyla bir elektronu bir su damlasının gösterimi sayesinde bir değerlik bandındaki deşik kavramının ne anlama geldiği daha iyi anlaşılmaktadır. Sonuç olarak, deşik, bir kristalin değerlik bandının içindeki kayıp bir elektrona karşılık gelmektedir. Deşik bir parçacık değildir ve bu yüzden de tek başına var olamaz. Deşikler elektronların aksine pozitif yük ($q = 1.6 \times 10^{-19}$ Coulomb) taşırlar. Deşikler kristal içinde bir elektron tarafından terkedilmiş boş aralığı doldurarak hareket edebilirler. İletkenlik bandındaki elektron yoğunluğunu hesaplamak için,

$$n = \int n(k)f(k)dk = \int_{ib} n(E)f(E) dE$$

$$= \frac{1}{2\pi^2\hbar^3} (2m_e^*)^{3/2} \int_{ib} (E - E_c)^{1/2} \exp\left[-\frac{E-E_F}{kT}\right] dE \quad (2.1)$$

ifadesi kullanılır. Bir yarıiletkende iletkenlik bandındaki çoğunluk elektronları E_c enerjisine yakın bir enerjiye sahiptir. Bundan dolayı integralin alt ve üst sınırları E_c ve sonsuz olarak değiştirilebilir. (2.1) denkleminin çözümü bize,

$$n = N_c \exp\left[-\frac{E_c - E_F}{kT}\right] \quad (2.2)$$

ifadesini verir. Burada N_c , iletkenlik bandındaki E_c enerjisine sahip etkin durum yoğunluğu (cm^{-3} , teki) olup,

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (2.3)$$

ile verilir. Benzer şekilde değerlik bandındaki deşiklerin etkin yoğunluğu,

$$p = N_v \exp \left[-\frac{E_F - E_v}{kT} \right] \quad (2.4)$$

ile verilir. Burada N_v değerlik bandındaki E_v enerjisine sahip etkin durum yoğunluğu olup,

$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (2.5)$$

ile verilir.

2.1.2 Gerçek Yarıiletkenler

Eğer bir yarıiletkende çoğunluk taşıyıcıları, o yarıiletkeni oluşturan atomların serbest elektronları ve deşikleri ise bu yarıiletkene “gerçek yarıiletken” denir. Eğer bir elektron yeterli termal enerjiyi kazanarak değerlik bandından iletkenlik bandına doğru atlama yaparsa arkasında bir boşluk (deşik) bırakır. Böylece değerlik bandındaki her deşik iletkenlik bandındaki bir elektrona karşılık gelir. İletkenlik bandındaki elektron sayısı değerlik bandındaki deşik sayısına eşittir ve

$$p = n = n_i \quad (2.6)$$

şeklinde gösterilir. Burada n_i , gerçek taşıyıcı yoğunluğudur. Bir yarıiletkende termodinamik denge altında denklem (2.2) ve (2.4) kullanılarak elektron ve deşik yoğunluklarını çarpımı,

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

$$= 32 \left(\frac{\pi^2 k^2 m_e^* m_h^*}{h^4} \right)^{3/2} T^3 \exp \left(-\frac{E_g}{kT} \right) = n_i^2 \quad (2.7)$$

ifadesini verir. Buradan termodinamik denge altında,

$$pn = n_i^2 \quad (2.8)$$

ifadesi elde edilir. Gerçek bir yarıiletkende Fermi enerji seviyesi,

$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{3}{4} kT \ln \left(\frac{m_h^*}{m_e^*} \right) = E_i \quad (2.9)$$

şeklinindedir. Eğer basit bir yaklaşımla $m_e^* = m_h^*$ alınırsa (2.9) denklemi,

$$E_i = \frac{E_c + E_v}{2} \quad (2.10)$$

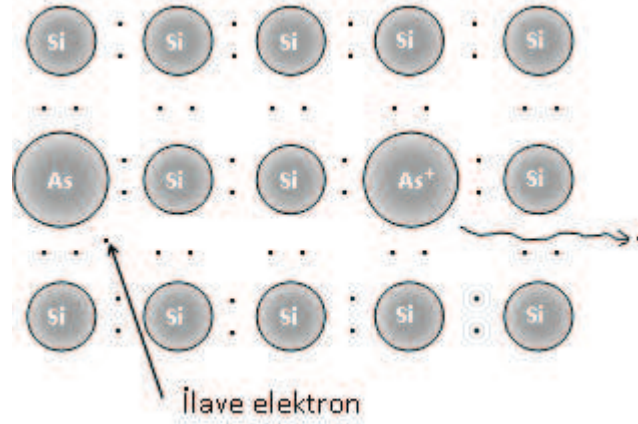
olur. Burada E_i gerçek enerji seviyesi olarak adlandırılmakta olup, gerçek bir yarıiletkendeki Fermi enerji seviyesidir. Bu seviyenin enerji bant aralığının ortasında olduğu varsayılır. Oda sıcaklığında silisyum malzemesindeki gerçek taşıyıcı yoğunluğu $1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ tür. Sıcaklık arttırıldığında elektronlar yeterli termal enerjiyi toplayarak yarıiletken atomlarından ayrılırlar ve iletkenlik bandında serbest olarak hareket ederler. Bu elektronlara serbest elektronlar denir ve kristal içerisinde hareket ederek akım iletimine katkıda bulunurlar. Diğer taraftan elektronlara eşit sayıda serbest deşikler de kristal içerisinde hareket ederek akım iletimine katkıda bulunur. Bir malzemenin iletkenliği direkt olarak serbest elektron ve deşik taşıyıcılarının sayısına bağlıdır. Yani taşıyıcıların sayısı ne kadar fazlaysa, iletkenlik de o kadar fazladır. Gerçek bir yarıiletkende (2.2) ve (2.4) ifadeleri kullanılarak gerçek taşıyıcı yoğunluğu,

$$n_i = N_c \exp \left[-\frac{E_c - E_i}{kT} \right] = N_v \exp \left[-\frac{E_F - E_v}{kT} \right] \quad (2.11)$$

elde edilir.

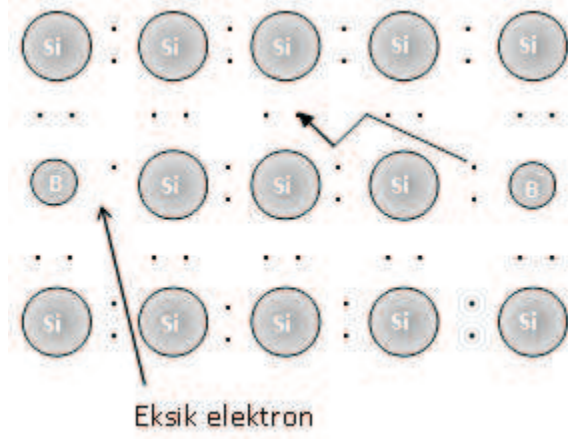
2.1.3 Katkılı Yarıiletkenler

Yarıiletken endüstrisinde kullanılan silisyum malzemesi son derece saftır (%99.9999999). Silisyum içerisine bazı elementler (bor, fosfor, arsenik vb.) yerleştirilebilmektedir. Örneğin silisyum atomunun yerine bir arsenik atomu yerleştirilse, arseniğin dört elektronu silisyumun komşu atomlarıyla paylaşılacaktır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Silisyum kristali içerisine yerleşmiş verici atom (As).

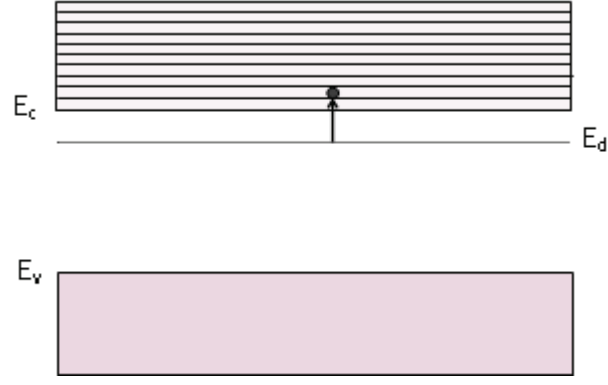
Kristalin oda sıcaklığındaki termal enerji değeri arseniğin beşinci elektronunu dış kabuktan sökebilecek kadar yüksek olduğundan elektron iletkenlik bandına yerleşecek ve kristal içinde serbestçe hareket edecektir. Katıldığı kristale elektron veren böyle atomlara verici (donor) adı verilir. Kristale yerleştirilen her katkı atomu bir elektron verecektir. Böylece kristalde oluşan serbest elektronlar iletkenliğe katkıda bulunacaktır. Benzer şekilde periyodik tablonun üçüncü kolonunda bulunan bir atom (örneğin Bor) silisyum atomunun yerine yerleştirildiğinde kristal içerisinde bir kayıp elektrona sebep olacaktır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Silisyum kristali içerisine yerleşmiş alıcı atom (B).

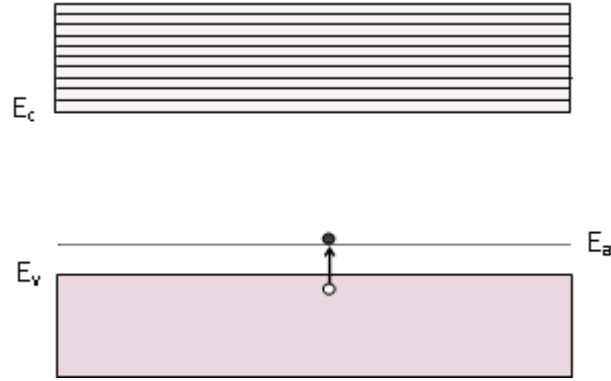
Katkılanan üç elektronlu bu Bor atomu, silisyum atomlarıyla dördüncü bağı tamamlayabilmek için bir elektron yakalayacaktır. Bunun sonucunda hareketsiz ve negatif yüklü bir katkı atomu meydana gelecektir. Bu durum kristal içerisindeki değerlik bandına yerleşmiş bir elektron boşluğuna (deşik) sebep olacaktır. Bu deşik kristal içerisinde hareket edebilir ve elektriksel iletkenliğe katkıda bulunabilir. Kristal içerisinden elektron alan böyle katkı atomlarına alıcı (akseptör) adı verilir. Bir genelleme yapılacak olursa, bir yarıiletken içerisinde elektron verme veya elektron alma gibi özelliklere sahip atomlara “safsızlık atomları”, “katkı atomları” veya “dop ediciler” gibi adlar verilir.

Silisyum kristaline yerleştirilen bir verici atom enerji bant aralığındaki izin verilen enerji seviyesini (E_d) yükseltir. Bu enerji seviyesi elektronlarla dolu olup iletkenlik bandının aşağısındadır ve enerji değeri birkaç meV civarındadır. Oda sıcaklığında bu elektronlar safsızlık atomlarından kopmak için yeterli enerjiye (0.0256 eV) sahiptir. Kopan bu elektronlar E_d enerji seviyesinden serbestçe iletkenlik bandına doğru hareket ederler (Şekil 2.5). Safsızlık atomunu terk eden bu elektron geride iyonize olmuş pozitif yük taşıyan bir verici atomu bırakır.



Şekil 2.5 Verici atom enerji seviyesi.

Benzer şekilde silisyum kristaline yerleştirilen bir alıcı atom enerji bant aralığındaki izin verilen enerji seviyesini (E_a) düşürür. Bu enerji seviyesi değerlik bandının birkaç meV yukarisındadır. Oda sıcaklığında değerlik bandında bulunan elektronlar yeterli termal enerjiye ulaşip alıcı safsızlık atomlarının oluşturduğu E_a enerji seviyelerini doldurur (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Alıcı atom enerji seviyesi.

Elektronlar tarafından doldurulmuş ya da bir başka deyişle alıcı atomlar tarafından yakalanmış elektronlar, değerlik bandında bulunan deşiklerin sayısını yükseltir. Bu deşikler serbestçe kristalde hareket edebilir. Bir elektron, alıcı bir atom tarafından yakalandığında kristal içerisinde bir deşik oluşur ve alıcı atom negatif yük taşıyacak şekilde iyonize olur.

Verici ve alıcı atomların bir kristal içerisine katkılanması yöntemi, elektron ve deşik sayılarını arttırmak için sıkça kullanılır. Böylece çalışılan malzemenin elektriksel özellikleri değiştirilmiş olur. Kristale katılan safsızlıkların meydana getirdiği enerji seviyeleri iletkenlik bandının altında ya da değerlik bandının üstünde oluşur. Enerji bant aralığının ortasına yakın bölgede oluşmuş enerji seviyelerine “derin seviyeler” adı verilir. Bu seviyeler yarıiletkenin özelliklerine etki eder ve genelde bu etki akım iletim mekanizmasındaki üretme-yeniden birleşme mekanizması üzerindedir.

Verici safsızlıklara sahip bir kristale n-tipi yarıiletken denir. Bu yarıiletkende çoğunluk taşıyıcıları negatif yükler yani elektronlardır. Bir n-tipi yarıiletkende elektronlar deşiklerden daha fazladır. Alıcı safsızlıklara sahip bir kristale p-tipi yarıiletken denir. Bu yarıiletkende çoğunluk taşıyıcıları pozitif yükler yani deşiklerdir.

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

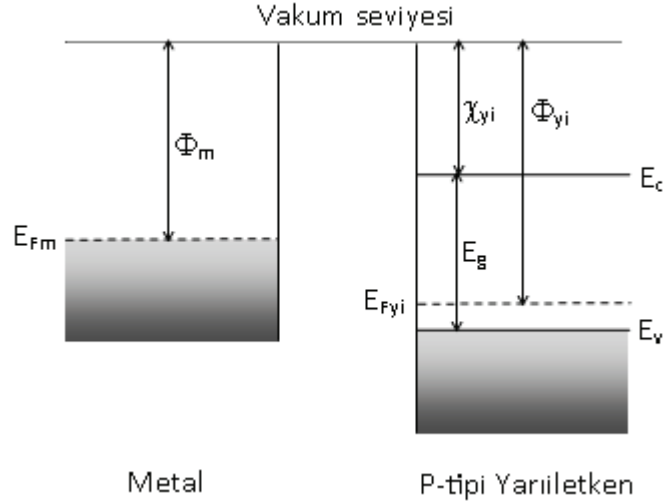
2.2 Metal/Yarıiletken (Schottky) Kontaklar

Yarıiletken ile metal arasında doğrultucu bir kontak meydana geldiği zaman bir Schottky kontak veya Schottky diyot oluşur. Metal/yarıiletken arasındaki doğrultucu etki ilk olarak 1874 yılında F. Braun [1] tarafından keşfedilmiş olup, 1938 yılında Schottky [5] ve Mott [6] tarafından açıklanmıştır.

Bir metal ile bir yarıiletken temas ettirildiğinde, bu iki malzeme arasında Fermi enerji seviyeleri eşit oluncaya kadar bir yük alışverişi olur. Termal denge sonucunda yeni bir yük dağılımı meydana gelir. Yük alışverişi metalden yarıiletkene doğru olup, bu durum iki malzeme arasında bir potansiyel değişimi meydana getirir. Sonuç olarak bir Schottky kontağı oluşmuş olur.

2.3 Metal/p-tipi Yarıiletken Kontaklar

Şekil 2.7’de p-tipi bir yarıiletken ve bir metal malzemenin kontak yapılmadan önceki enerji bant diyagramı görülmektedir. Fotoelektrik etkiden (A. Einstein Nobel Ödülü, 1921), metal üzerine yeterli dalga boyunda bir ışık düştüğü zaman elektronlar metali terk eder. Bu ışık, metalden elektronu söküp vakum seviyesi içerisine yerleştirecek enerjiye ($E = h\nu$) sahip olmalıdır. Diğer bir deyişle, en azından metalin iş fonksiyonuna ($q\Phi_m$) eşit olmalıdır. İş fonksiyonu, elektronu metalden çıkarabilmek için elektrona verilmesi gereken bir enerji olarak tanımlanır. Benzer şekilde yarıiletkenin iş fonksiyonu, bir elektronu bulunduğu Fermi seviyesinden (E_{Fyi}) vakum seviyesine çıkarabilmek için gerekli enerjidir.



Şekil 2.7 P-tipi bir yarıiletken ile metal malzemenin kontak yapılmadan önceki enerji-bant diyagramı

Schottky kontaklar omik ve doğrultucu olmak üzere ikiye ayrılır. Kontakın omik ya da doğrultucu olma durumunu kullanılan malzemelerin iş fonksiyonları belirler. P-tipi bir yarıiletken ile bir metal kontak yapıldığında, eğer metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyük ise ($\Phi_m > \Phi_{yi}$) kontak omik, küçük ise ($\Phi_m < \Phi_{yi}$) kontak doğrultucu olur. Doğrultucu bir metal/p-Si yapısı oluşturulmadan önce yarıiletkenin iş fonksiyonu metalin iş fonksiyonundan büyüktür. Kontak oluşuktan sonra yük alışverişi başlayacak ve yüksek enerjili holler (elektron boşlukları) yarıiletkenden metale doğru hareket edecek ve geride negatif

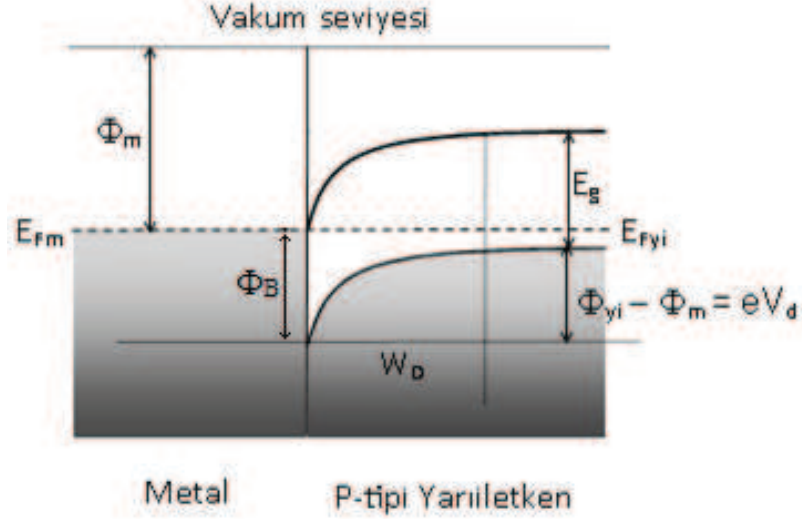
yüklü alıcılar bırakacaklardır. Metal malzemenin bulunduğu kısımda ise pozitif yüzey yükleri birikecektir. Bu iki bölgede meydana gelen zıt yükler bir dipol tabakası oluşturacaktır. Böylece yarıiletken taraftaki Fermi seviyesi bu iki malzemenin iş fonksiyonlarının farkı ($\Phi_{yi} - \Phi_m$) kadar aşağı doğru bükülürken, metal taraftaki Fermi seviyesi ise sabit kalacaktır. Şekil 2.8’de bir metal/p-Si yapının kontak sonrası enerji bant diyagramları görülmektedir. Sonuçta yarıiletken malzemede negatif yüklerin hakim olduğu ve belli bir kalınlığa sahip bir bölge oluşur ki, buna tüketme tabakası denir. Bu tabakadaki yüklere “uzay yükleri” denir. Metal tarafındaki pozitif yükler ile bu negatif uzay yükleri bir kapasite meydana getirir ki, bu kapasiteye de “Schottky kapasitesi” denir. Uzay yük bölgesindeki deşiklerin yoğunluğu alıcı safsızlıkların yoğunluğundan ihmal edilebilecek derecede azdır. Böylece uzay yük bölgesi iyonize olmuş alıcı safsızlıkları ile dolar ve eklem yarıiletken tarafında W_D kalınlığında bir tüketme tabakası oluşur. Eklem oluşumu sırasında yarıiletkenin gövdesinde enerji düzeyleri ($\Phi_{yi} - \Phi_m$) farkı kadar yükselmiş ve yarıiletkenin yüzeyi negatif yüklerle dolmuştur. Buna göre yarıiletken tarafındaki deşikler için Schottky eklemi oluşturur difüzyon potansiyeli,

$$V_d = \frac{1}{q} (\Phi_{yi} - \Phi_m) \quad (2.12)$$

şeklinde ifade edilir. Metal tarafındaki engel yüksekliği ise,

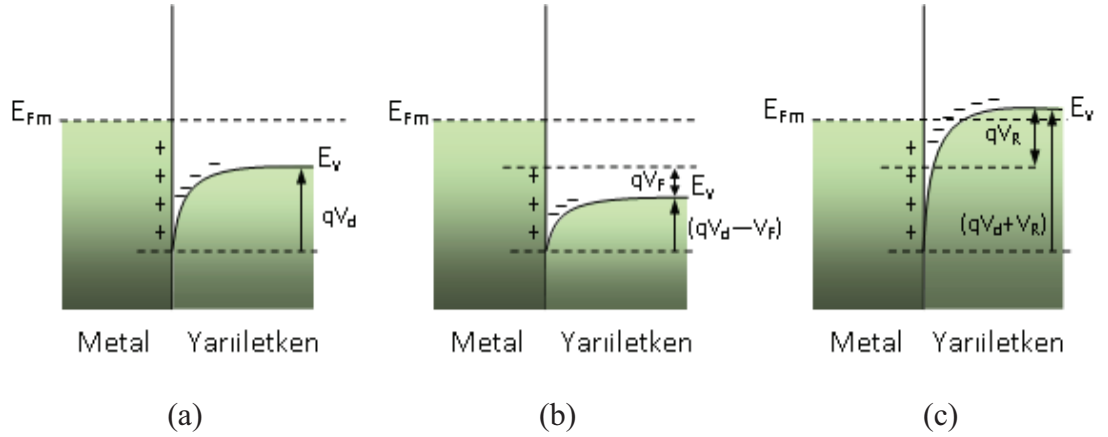
$$\Phi_B = \chi_{yi} + E_g - \Phi_m \quad (2.13)$$

ile verilir. Burada χ_{yi} elektron yatkınlığı ve E_g yarıiletkenin yasak enerji-bant aralığıdır.



Şekil 2.8 P-tipi bir yarıiletken ile metal malzemenin kontak yapıldıktan sonraki enerji-bant diyagramı.

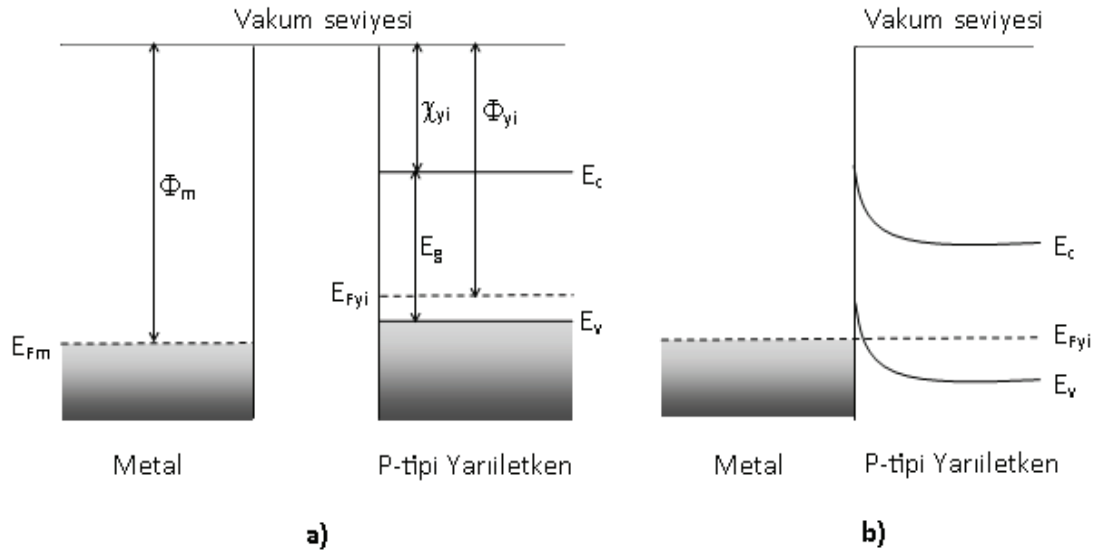
Yarıiletken tarafındaki parabolik engel “Schottky Engeli” olarak tanımlanır. Şekil 2.9’da bir metal/p-Si eklemesinin dengede, düz beslem ve ters beslem altındaki enerji-bant diyagramları görülmektedir. Şekil 2.9.a’da termal denge halinde engeli düz yönde aşan elektronların sayısı engeli ters yönde aşan elektronların sayısına eşit olup, diyottan geçen net akım sıfırdır.



Şekil 2.9 Bir metal/p-Si diyodunun enerji-bant diyagramları: a) dengede, b) düz beslem ve c) ters beslem altında.

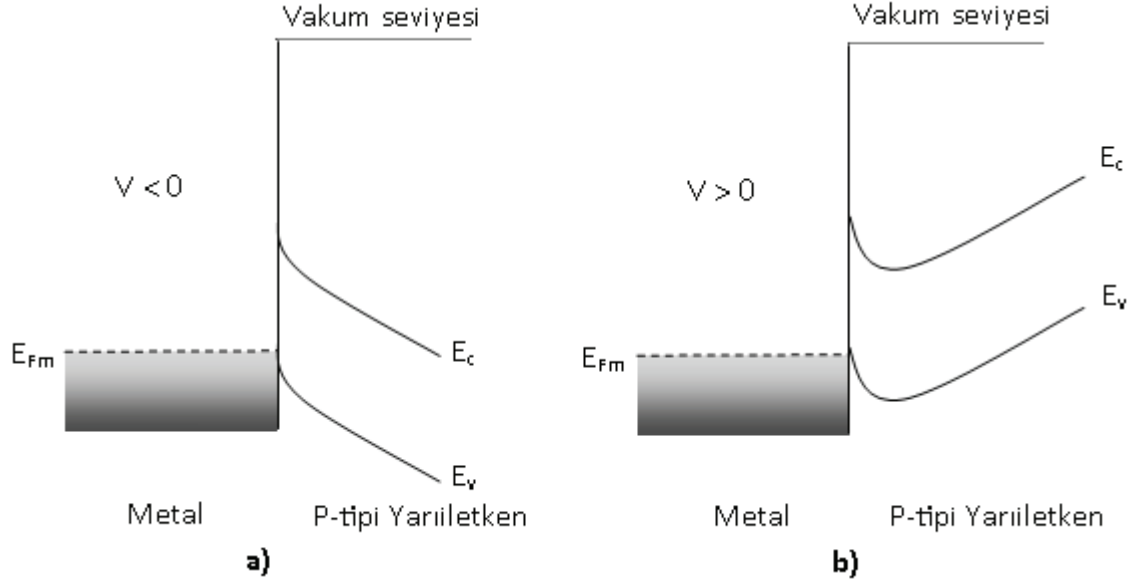
Yarıya bir V_F düz beslemi (yarıiletkene pozitif gerilim, metale negatif gerilim) uygulandığında, tüketme bölgesinin genişliği azalır ve eklemi oluşturan difüzyon potansiyelinin değeri ($V_d - V_F$) kadar düşer (Şekil 2.9.b). Bu durumdadeşikler için yarıiletken tarafındaki engel azalmış olup, metale doğru akandeşik sayısı daha fazladır. Yarıya bir V_R ters beslemi (yarıiletkene negatif gerilim, metale pozitif gerilim) uygulandığında tüketme bölgesinin genişliği artar ve eklemi oluşturan difüzyon potansiyelinin değeri ($V_d + V_R$) kadar artar (Şekil 2.9.c). Böylece yarıiletken tarafındakideşikler metale geçemeyecek kadar büyük bir engel ile karşılaşılırlar.

Şekil 2.10'da ($\Phi_m > \Phi_{yi}$) durumunda bir metalin p-tipi bir yarıiletkenle yapmış olduğu omik kontak görülmektedir. Kontak yapılmadan önce yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden ($\Phi_m - \Phi_{yi}$) kadar yukarıdadır (Şekil 2.10.a). Kontak anında elektronlar yarıiletkendedeşik bırakarak metal tarafa doğru geçişe başlar [7] ve bu durum Fermi seviyeleri eşit oluncaya kadar devam eder. Denge durumuna ulaşıldığında, yarıiletken tarafındaki bant seviyeleri Φ_m ile Φ_{yi} farkı kadar aşağıya bükülmüş olur. Sonuçta metal üzerinde negatif ve yarıiletken üzerinde pozitif yüzey yükleri oluşur (Şekil 2.10.b).



Şekil 2.10 Metal/p-tipi omik kontakına ait enerji-bant diyagramı: a) Kontak yapılmadan, b) Kontak yapıldıktan sonraki durum.

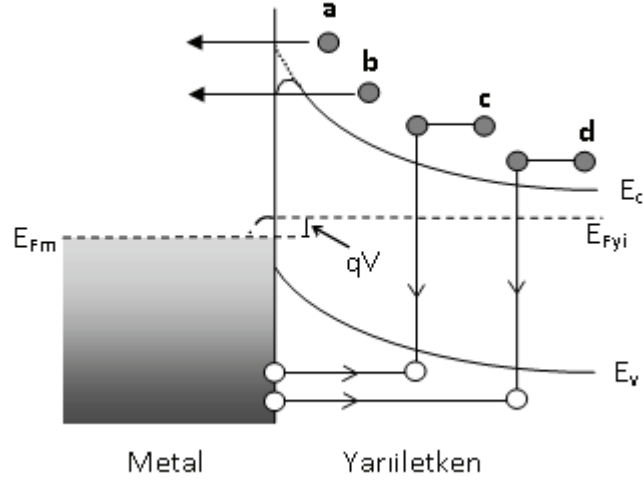
Yapıya metal taraf pozitif, yarıiletken taraf ise negatif olacak şekilde harici bir ters beslem uygulandığında, bantlar aşağı doğru daha çok bükülecek ve böylece metal tarafındakideşikler yarıiletkene doğru hareket edeceklerdir. Akımı bu şekilde iki tarafa da iletebilen kontaklara omik kontaklar denir.



Şekil 2.11 Ters ve düz beslem durumlarında omik kontakın enerji-bant diyagramları:
a) $V < 0$ durumu (ters beslem), b) $V > 0$ durumu (ters beslem).

2.4 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. Bu tarz kontaklarda akım iletimi çoğunluk taşıyıcıları ile gerçekleşir. Şekil 2.12'de bir metal/n-Si eklem yapısında yukarıda bahsedilen akım iletim mekanizmalarının şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 2.12 Bir metal/n-Si eklem yapısında akım iletim mekanizmalarının şematik gösterimi.

Şekil 2.12’de görüldüğü gibi temelde dört farklı akım iletim mekanizması mevcuttur. Bunlar; engel yüksekliğini aşıp metale gelen elektronların oluşturduğu akım (a), elektronların engel içinden doğrudan kuantum-mekaniksel tünellemeleri (orta derecede katkılandırılmış yarıiletkenler için) ile oluşan akım (b), uzay yük bölgesinde yeniden birleşme işleminin oluşturduğu akım (c) ve metalden yarıiletkene olan deşik enjeksiyonunun oluşturduğu akımdır (d).

2.4.1 Termoiyonik Emisyon (TE)

Metal/yarıiletken kontaklarda yeterli termal enerjiyi kazanan taşıyıcıların metalden yarıiletkene ve yarıiletkenden metale doğru geçerek oluşturdukları bir akım mekanizmasıdır [8]. Bu akım mekanizmasının kabul ettiği bazı varsayımlar şunlardır:

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

Potansiyel engelini geçmeye yetecek kadar enerjiye sahip olan ve yarıiletken den metale doğru akan elektronların oluşturduğu akım yoğunluğu,

$$J_{sm} = \int_{E_F + q\Phi_B}^{\infty} qv_x dn \quad (2.14)$$

şeklinde ifade edilir. Burada v_x elektronların hızı, dn , küçük bir enerji aralığındaki elektron yoğunluğu ve $(E_F + q\Phi_B)$ metalden TE için gerekli minimum enerjidir. Bu ifade yardımıyla yarıiletken den metale doğru geçen elektronlar için akım,

$$J_{sm} = \left(\frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp\left[\frac{-q(\Phi_B)}{kT} \right] \exp\left(\frac{qV}{kT} \right) \quad (2.15)$$

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

$$J_{sm} = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT} \right) \exp\left(\frac{qV}{kT} \right) \quad (2.16)$$

şeklini alır. Burada A^* , (2.15) denklemindeki ilk terime karşılık gelir ve Richardson sabiti olarak adlandırılır. Diğer taraftan metal tarafındaki engel yüksekliği aynı kaldığından yarıiletkene geçen elektronların oluşturduğu akım yoğunluğu uygulanan gerilime bağlı olmayıp,

$$J_{ms} = -A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT} \right) \quad (2.17)$$

şeklinde ifade edilir. Sonuç olarak net akım yoğunluğu bu iki akımın (denklem (2.16) ve denklem (2.17)) toplamları olup,

$$J = \left[A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT} \right) \right] \left[\exp\left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.18)$$

şeklinde ifade edilir. (2.18) ifadesindeki parantezli ilk terim doyma akımı yoğunluğudur.

2.4.2 Difüzyon

Bu akım mekanizması, yoğunlukları farklı olan iki bölge arasındaki, yoğunluğu çok olan bölgeden az olan bölgeye doğru taşıyıcı geçişleri için tanımlanır [8]. Bu akım mekanizmasının kabul ettiği varsayımlar şunlardır:

- Engel yüksekliği, kT enerjisinden çok büyüktür.
- Yarıiletkendeki safsızlık yoğunluğu dejenere değildir. Yani yarıiletken aşırı katkılandırılmamıştır.
- Engel bölgesindeki taşıyıcı çarpışma etkisi göz önüne alınmıştır.
- Tüketme tabakasının başlangıcındaki ve bitişindeki taşıyıcı yoğunlukları termal dengeden dolayı akan akımdan etkilenmez.

Bu akım mekanizması için bölgesel alan ve yoğunluk farkına bağlı olacak şekilde bir ifade tanımlanmıştır. Buna göre tüketim bölgesindeki akım yoğunluğu denklemi,

$$J = q \left[n(x)E(x) \mu + D_n \frac{\partial n}{\partial x} \right] = qD_n \left[\left(\frac{-qn(x)}{kT} \right) \left(\frac{\partial V(x)}{\partial x} \right) + \frac{\partial n}{\partial x} \right] \quad (2.19)$$

şeklinde verilir. Burada $n(x)$, elektron yoğunluğu, μ , elektron mobilitesi, D_n , elektron difüzyon sabiti ve $E(x)$ Schottky bölgesindeki elektrik alanıdır. Gerekli düzenlemelerden sonra ifade,

$$= J_n \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.20)$$

şeklini alır. Burada J_n doyma akımı yoğunluğu olup,

$$J_n = \left(\frac{q^2 N_c D_n}{kT} \right) \left[\frac{q(V_d - V) 2N_D}{\epsilon_s} \right]^{1/2} \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT} \right) \quad (2.21)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, N_c , iletkenlik bandındaki etkin taşıyıcı yoğunluğu, N_D , verici yoğunluğu, ϵ_s , yarıiletkenin elektrik geçirgenliği ve V_d , difüzyon potansiyelidir. Denklem (2.18) ve (2.21) ifadeleri karşılaştırıldığında, difüzyon akımının uygulanan gerilimle değiştiği ancak termoiyonik emisyon akımına göre de sıcaklığa bağımlılığının daha az olduğu görülmektedir.

2.4.3 Termoiyonik Emisyon Difüzyon (TED)

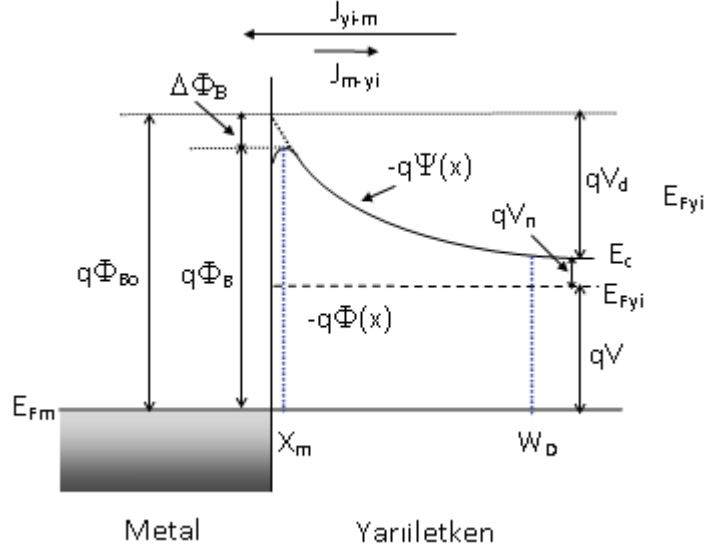
Termoiyonik emisyon difüzyon akım mekanizması, termoiyonik emisyon ve difüzyon mekanizmalarının bir birleşimidir. Bu teori metal/yarıiletken arayüzeyinde varsayılan yeniden birleşme hızı üzerine kurulmuştur. Metal ile yarıiletken gövde arasına uygulanan bir harici gerilim eklemde bir elektron akışına neden olur. Bu elektron akışının yarattığı akım,

$$J = -qn\mu \left(\frac{d\Phi_B}{dx} \right) \quad (2.22)$$

şeklinde ifade edilir ve tüketme bölgesi içerisinde X_m ile W_D arasında tanımlanır (Şekil 2.13). Burada n , bir x noktasındaki elektron yoğunluğu olup,

$$n_m = N_c \exp\left(\frac{-q(\Phi_B - \Psi)}{kT} \right) \quad (2.23)$$

ile ifade edilir. Burada $q\Psi(x)$ elektron potansiyel enerjisi ve $q\Phi_B(x)$ yarım-Fermi seviyesidir. Bu teoriye göre akımı oluşturacak taşıyıcıların bir kısmı optik fonon geri saçılmalarına bir kısmı da kuantum yansımalarına uğrayarak yeniden birleşme hızında azalmaya sebep olur ve bu da taşıyıcıların yarattığı akım değerini azaltır [8].



Şekil 2.13 Metal/n-tipi eklem için enerji-bant diyagramı.

Metal/yarıiletken arayüzeyinden elektronların optik fononlarla etkileşmeden eklemi geçmesi ve ortalama iletim katsayısı göz önüne alındığında mevcut Richardson sabiti değişir. Buna göre akım yoğunluğu,

$$J = J_o \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (2.24)$$

şeklinindedir. Burada J_o doyma akımı yoğunluğudur ve

$$J_o = A^{**} T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT}\right) \quad (2.25)$$

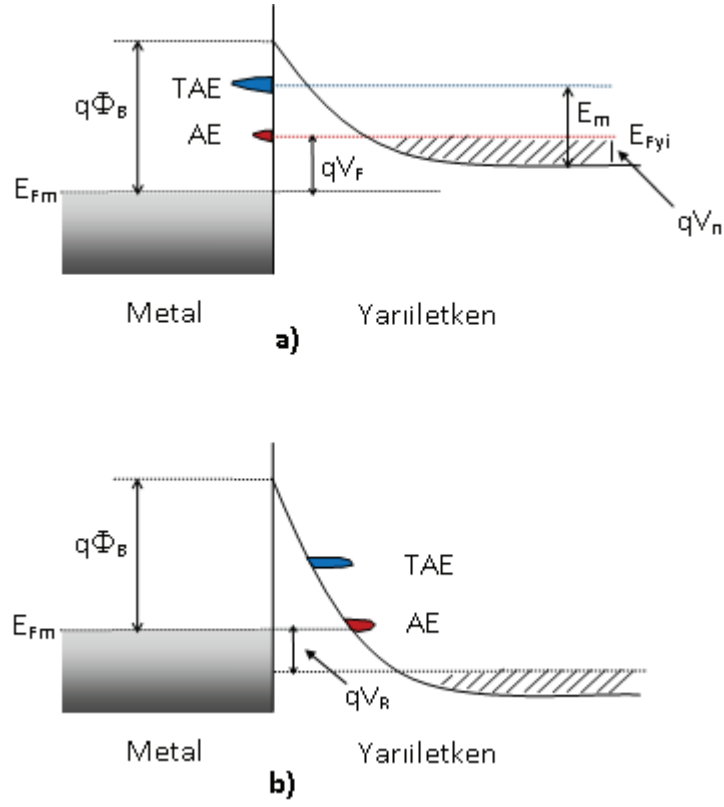
ile verilir. Burada A^{**} modifiye edilmiş yeni Richardson sabitidir. Metal/yarıiletken yapının ideallikten sapmalarını belirlemek amacı ile bir ideallik faktörü (n) tanımlanır. Böylece yeni akım yoğunluğu denklemi,

$$J = J_o \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.26)$$

şeklinde olur.

2.4.4 Engel Boyunca Tünelleme

Bu mekanizma aşırı katkılanmış fakat dejenere olmayan yarıiletkenlerde elektronların kuantum-mekaniksel olarak engel boyunca tünellemeleriyle eklemnin diğer tarafına geçişlerini tanımlar. Bu tünelleme geçişi iki şekilde olur. Alan emisyonu (AE) ve termoiyonik alan emisyonu (TAE). Yarıiletken aşırı katkılandığında tüketme bölgesi çok incelik. Bu yüzden düşük sıcaklıklarda Fermi seviyesine çok yakın elektronlar yarıiletkeninden metale doğru tünelleme yapabilir. Bu işleme alan emisyonu adı verilir. Sıcaklık yükseltildiğinde elektronların büyük çoğunluğu Fermi seviyesinin üstüne doğru yükselir ve bunlar engele ulaşmadan tünelleme yaparak metale geçebilirler. Termal olarak uyarılmış bu elektronların meydana getirdiği bu tünelleme işlemine termoiyonik alan emisyonu adı verilir. Bunun sonucunda Fermi seviyesi üzerindeki elektronların sayısı azalır ve bir enerji oluşur. Sıcaklığın yükselmesiyle beraber elektronların karşılaştığı engel daha küçük ve ince olacağından tünelleme ihtimali de hızlıca artar. Sıcaklık daha da arttırıldığında tüm elektronlar engelin üst kısmına ulaşır ve engeli aşarak diğer tarafa geçerler. Bu durumda termoiyonik emisyon mekanizması etkin olmuş olur. Metal/yarıiletken yapılarda tünellemeyi teorik olarak Crowell ve Rideout (1969) [9] ile Padovani ve Stratton (1966) [10] incelemiştir. Düşük katkı yarıiletkenlerde tünelleme işlemi ters beslemde, aşırı katkı yarıiletkenlerde tünelleme işlemi ise düz beslemde ortaya çıkar [10].



Şekil 2.14 N-tipi yarıiletken için TAE ve AE mekanizmalarının şematik gösterimi:
a) düz beslem ve b) ters beslem.

Tünellemenin var olduğu durumdaki taşıyıcıların oluşturduğu akım,

$$I = I_s \exp\left(\frac{qV}{E_o}\right) \quad (2.27)$$

şeklinde ifade edilir. Burada,

$$E_o = E_{oo} \coth\left(\frac{E_{oo}}{kT}\right) \quad (2.28)$$

ve

$$E_{oo} = \frac{qh}{4\pi} \left(\frac{N_A}{m^* \epsilon_s}\right)^{1/2} \quad (2.29)$$

dir. Burada N_A , alıcı yoğunluğu ve h , Planck sabitidir. Denklem (2.27)'deki doyma akımı engel yüksekliğinin, yarıiletken parametrelerinin ve sıcaklığın bir fonksiyonu

olup, uygulanan gerilime zayıf bir şekilde bağlıdır. Denklem (2.28)'deki E_{o0} enerjisi, tünelleme işleminde önemli bir parametre olup, kT/E_{o0} olarak ifade edildiğinde tünellemenin önemli bir ölçüsüdür [11]. Alçak sıcaklıklarda yarı-logaritmik $I-V$ eğrisinin eğimi sabit ve sıcaklıktan bağımsız olur. Bu durumda alan emisyonu etkindir ve $E_o \approx E_{o0}$ 'dir. Yüksek sıcaklıklarda, yarı-logaritmik $I-V$ eğrisinin eğimi q/kT olur ve $E_o = kT$ 'dir. Bu durumda termoyonik emisyon mekanizması etkin hale gelir.

2.5 Görüntü Kuvvet Etkisi (Schottky Alçalması)

Schottky alçalması metal/yarıiletken kontaklarda meydana gelen engel yüksekliğinin, metalde oluşan görüntü yüklerinin indüklenmesi sonucu azalması olarak tarif edilir. Diğer bir deyişle metal/yarıiletken yapılarda potansiyel engelinin elektrostatik etkileşmelerden dolayı alçalmasıdır. Kontak oluşumu sırasında yarıiletken tarafında bulunan pozitif yükler metal tarafında x kadar uzaklıkta bir görüntü yük (negatif yük) meydana getirir. Oluşan bu iki yük bir elektrik alanı ve çekim kuvveti meydana getirecektir. Bu kuvvet görüntü kuvveti olarak adlandırılır ve

$$F = \frac{-e^2}{4\pi(2x)^2\epsilon_0} = -eE \quad (2.30)$$

şeklinde ifade edilir. Burada x elektronun yarıiletkene olan uzaklığı, e , elektronun yükü, ϵ_0 , boşluğun elektrik geçirgenliği ve E , oluşan elektrik alanıdır. Bir elektronun sonsuzdan bir x noktasına gelirken yaptığı iş,

$$\int_{\infty}^x F dx = \frac{e^2}{16\pi\epsilon_0 x} \quad (2.31)$$

şeklinde tanımlanır. Yapıya bir harici elektrik alan uygulandığı zaman toplam potansiyel enerji uzaklığın fonksiyonu olarak,

$$\phi(x) = \frac{e^2}{16\pi\epsilon_0 x} + eEx \quad (2.32)$$

şeklinde ifade edilir. Denklem (2.32)'de $d\phi(x)/dx=0$ şartı sağlandığı noktada (Schottky engelinin tepe noktası) Schottky alçalması,

$$\Delta\Phi_B = \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_s\epsilon_0}} \quad (2.33)$$

şeklinde ifade edilir. Yani kontak sonucu oluşan engel $\Delta\Phi_B$ kadar alçalmış olur. Bu olay elektrostatik etkileşmenin bir sonucudur. Burada E , maksimum elektrik alanı ve ϵ_s , yarıiletkenin elektrik geçirgenliğidir.

2.6 İdeallik Faktörü

İdeallikten sapmaları belirlemek için tanımlanmış olan bu parametre arayüzey durumlarının yoğunluğuna (N_{ss}) ve kalınlığına bağlı olup [12,13],

$$n = 1 + \frac{\left(\frac{\delta}{\epsilon_i}\right)\left(\frac{\epsilon_s}{W_D + qN_y}\right)}{1 + \left(\frac{\delta}{\epsilon_i}\right)qN_m} \quad (2.34)$$

şeklinde ifade edilir. Burada N_m metal ile dengede olan arayüzey durumlarının, N_y ise yarıiletken ile dengede olan durumlarının yoğunluğudur. ϵ_i , oksit tabakasının elektrik geçirgenliği, ϵ_s , yarıiletkenin elektrik geçirgenliği, δ , arayüzey tabakasının kalınlığı ve W_D tüketme bölgesinin genişliğidir. Limit durumlarına göre denklem (2.34) değişik şekillerde ifade edilir. Arayüzey durumlarının yoğunluğu küçük ise (2.34) ifadesi,

$$n = 1 + \frac{\delta\epsilon_s}{W_D\epsilon_i} \quad (2.35)$$

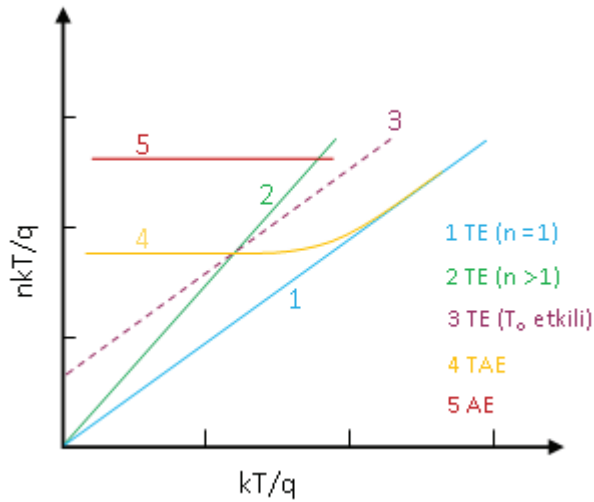
şeklını alır. Arayüzey durumları metal ile dengede ise (2.34) ifadesi,

$$n = 1 + \frac{\delta \epsilon_s}{W_D (\epsilon_i + \delta q N_m)} \quad (2.36)$$

şeklını 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 (2.34) ifadesi,

$$n = 1 + \left(\frac{\delta}{\epsilon_i} \right) \left(\frac{\epsilon_s}{W_D + q N_y} \right) \quad (2.37)$$

şeklını alır. Bu durumda ise arayüzey tabakasının kalınlığının ve arayüzey durumlarının artmasıyla n artar [12]. İdeallik faktörü sıcaklığın bir fonksiyonu olarak çizildiğinde bir eklem için farklı akım mekanizmaları tanımlanabilir (Şekil 2.15). Yapıda termoiyonik emisyon mekanizması etkin olduğu zaman 1 (n=1 için), 2 (n>1 için) ve 3 (T₀ etkili) numaralı eğriler elde edilir. Şekil 2.15’de görülen 4 numaralı eğri termoiyonik alan emisyonunu, 5 numaralı eğri ise alan emisyonunu tanımlar.



Şekil 2.15 Akım iletim mekanizmaları için nkT/q – kT/q eğrileri.

2.7 Seri Direnç

Bir diyodun kötü performans sergilemesinin sebeplerinden birisi de seri dirençtir. Ters beslemede ideal bir diyot oldukça yüksek bir direnç gösterir. Düz beslemede uygulanan gerilim arttıkça direnç üstel olarak düşer. Bir yapıda meydana gelen seri direnç 5 farklı kaynaktan oluşur. Bunlar;

1. Yarıiletken gövde içerisindeki düzgün olmayan katkı dağılımından meydana gelen
2. Yarıiletken tüketme tabakası ve omik kontak arasındaki gövde direncinden meydana gelen
3. Yarıiletken gövde ile kontak arasına yerleşmiş kirli bir film tabakası veya bir parçacıktan meydana gelen
4. Yarıiletken kristale temas ettirilmiş omik (arka) kontakta meydana gelen
5. Kontaklardan elektriksel ölçüm için alınmış tellerden meydana gelen

direnç şeklindedir. Yarıiletken içerisindeki düzensiz katkılar yüksek öz dirençli bölgeler meydana getirebilir. Bu durum yavaş taşıyıcı yoğunluğunu oluşturur. Genelde yarıiletken gövdesinden gelen seri direnç etkisi küçüktür ve ihmal edilebilir. Seri direnç özellikle admittans tekniği kullanılarak yapılan arayüzey durum yoğunluğu hesaplamalarında ciddi hatalara sebep olabilir. Seri direnç etkisi, gerek numunenin yapım aşamasında gerekse ölçüm aşamasında çeşitli tekniklerle azaltılabilir. Örneğin omik kontak (arka) direnci, ısısal bir işlem uygulanarak metalin yarıiletken yüzeyine çöktürülmesi ile azaltılabilir. Bir diğer yöntem de, ölçülmüş admittans değerleri üzerinde düzeltme yapıldıktan sonra parametre tayini hesaplamalarına devam etmektir.

Seri direnç, yapının $I-V$ eğrilerinde de özellikle yüksek voltaj değerlerinde istenmeyen bükülmeler (ideallikten sapmalar) meydana getirir.

2.7.1 Seri Direnç Ölçme Yöntemleri

Bir metal/yarıiletken diyodun $I-V$ ölçüm verileri kullanılarak seri direncinin tayin edilmesi için değişik yöntemler vardır. Bunlar, Norde yöntemi [14], Sato ve Yasamura [15] yöntemi ki, bu modifiye Norde yöntemi olarak da anılır ve ideallik faktörünün 1'den büyük olduğu durumlar için geliştirilmiştir. Diğer taraftan değişik sıcaklıklar kullanılarak elde edilen seri direnç yöntemi (McLean) [16] ve bir diğeri de Cheung [17] yöntemidir ki bu da seri direncin etkin olduğu yüksek voltaj bölgesinde kullanılır.

2.7.1.1 Norde Yöntemi

Norde 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. Denklem (2.18)'i açık olarak yazacak olursak,

$$I = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT}\right) \left\{ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right\} \quad (2.38)$$

olur. Schottky diyoduna uygulanan V geriliminin bir kısmı da seri direnç üzerine düşeceğinden dolayı (2.38) ifadesi,

$$I = \left[AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT}\right) \right] \left\{ \exp\left[\frac{q(V - IR)}{nkT}\right] - 1 \right\} \quad (2.39)$$

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, seri direnç hesaplamaları için;

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (2.40)$$

şeklinde bir ifade tanımlamıştır. (2.39) ifadesinin her iki tarafının \ln 'i alınıp (2.40) ifadesinde yerine konursa,

$$F(V) = \left(\frac{n-2}{2n}\right)V + \frac{IR}{n} + \Phi_B \quad (2.41)$$

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 (Φ_B) verir. Fakat seri direnç sıfırdan farklı ise $F(V)$ fonksiyonu bir minimumdan geçer ve

$$F(V) = F_R(V) = \frac{V}{2} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{V}{AA^*T^2R}\right) \quad (2.42)$$

şeklini alır. Denklem (2.38) ifadesinin V 'ye göre türevi alınıp (2.42) ifadesinde yerine konursa,

$$\frac{\partial F(V)}{\partial V} = \frac{n-2 + \beta IR}{2(n + \beta IR)} \quad (2.43)$$

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

$$n-2 + \beta IR = 0 \quad (2.44)$$

elde edilir. Buradan seri direnç ve engel yüksekliği,

$$R_s = \frac{(2-n)kT}{qI} \quad (2.45)$$

ve

$$\Phi_B = F(V)_{min} + \left(\frac{2-n}{2n}\right) \frac{V_o}{2} - \frac{kT}{q} \quad (2.46)$$

olur. Burada V_o , $F(V)$ fonksiyonunun minimumdaki değerine karşılık gelmektedir. 1986'da Bohlin [18] ideallik faktörünün 1'den büyük olması durumunda Norde fonksiyonunu yeniden düzenledi. $F(V)$ fonksiyonunun 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,

$$F(V, \gamma) = F_R(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \text{Ln} \left(\frac{I}{AA^* T^2} \right) \quad (2.47)$$

şeklinde ifade edilir. (2.39) denkleminde iki tarafın Ln 'i alınıp (2.47)'de yerine yazılırsa,

$$F(V, \gamma) = F_R(V) = \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n}\right)V + \Phi_B + \frac{IR}{n} \quad (2.48)$$

elde edilir. Seri direnç sıfır ise $F(V)-V$ eğrisi, eğimi $(n - \gamma)/n\gamma$ olan bir doğru olur. Seri direnç sıfırdan farklıysa ve (2.47) denklemindeki akım ifadesinin açık şekli yazılırsa,

$$F(V, \gamma) = F_R(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \text{Ln} \left(\frac{V}{RAA^* T^2} \right) \quad (2.49)$$

elde edilir. (2.48) ifadesinin V 'ye göre türevi alınıp gerekli düzenlemeler yapılırsa,

$$\Phi_B = F(V_o, \gamma) - \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n}\right)V_o - \frac{(\gamma - n)}{(\beta n)} \quad (2.50)$$

ve

$$R_s = \left(\frac{\gamma - n}{\beta I_0} \right) \quad (2.51)$$

ifadeleri elde edilir.

2.7.1.2 Cheung Yöntemi

1986 yılında Cheung tarafından [17] metal/yarıiletken (Schottky) eklemlerin seri direnç hesaplarında yapıların I - V karakteristikleri kullanılarak farklı bir yöntem geliştirilmiştir. Bunun için (2.38) denkleminin her iki tarafının \ln 'i alınıp düzenlendiğinde,

$$V = \left(\frac{nkT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) + n\Phi_B + IR_s \quad (2.52)$$

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

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (2.53)$$

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 [17]. Cheung, yapının engel yüksekliğini bulmak için,

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

şeklinde bir $H(I)$ fonksiyonu tanımlamıştır. (2.52) ve (2.53) ifadelerini kullanarak engel yüksekliği için,

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

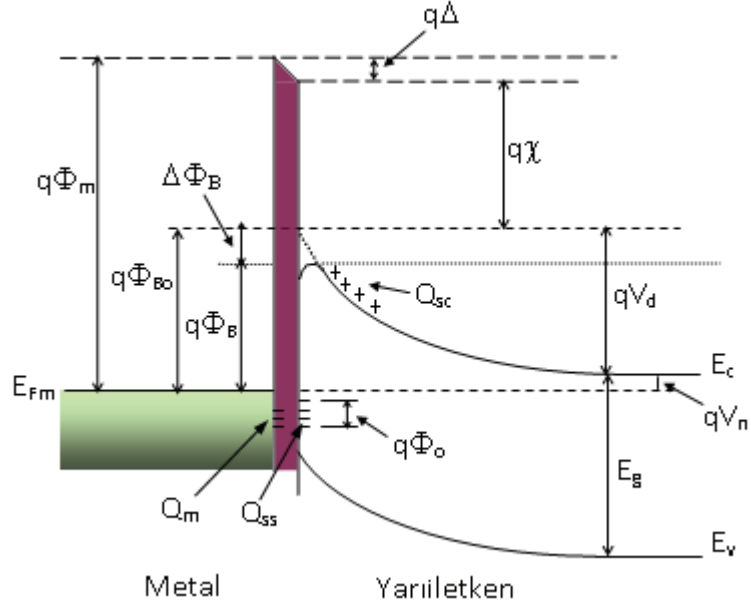
şeklinde bir ifade elde edilir. (2.55) ifadesinden de görüldüğü gibi $H(I)$ 'nın I 'ya göre grafiği çizildiğinde bir doğru elde edilecektir. Bu doğrunun eğimi seri direnç değerini, $H(I)$ eksenini kestiği nokta ise engel yüksekliği verecektir.

2.8 Aygıt Karakterizasyonu

Schottky diyotları alçak katkı safsızlıklarına ve yüksek eklem engellerine sahip aygıtlardır. N-tipi bir yarıiletken için Schottky eklemının detaylı bir engel yapısı Şekil 2.16'da verilmiştir. Bir metal ile bir yarıiletkenin oluşturduğu bu eklem iki varsayıma dayanır [19].

Birincisi; elektronlar için geçirgen özelliğe sahip bir arayüzey tabakasının, bir metal ile bir yarıiletkenin arasında olması, ikincisi ise; bu tabakadaki yüzey durumlarının metalden bağımsız olup sadece yarıiletkenin bir özelliği olmasıdır. Kontak sağlanmadan önce $q\Phi_0$ yüzey enerjisi Fermi seviyesi ile aynı yerde olup, yük nötralliğinden dolayı bu seviyeler doludur [20].

Şekil 2.16'daki gösterimler sırasıyla; Fermi enerji seviyesi (E_F), metalin iş fonksiyonu ($q\Phi_m$), sıfır beslem engel yüksekliği ($q\Phi_{Bo}$), engel yüksekliği ($q\Phi_B$), metal üzerindeki yüzey yükü (Q_m), yarıiletken üzerindeki yüzey yükü (Q_{ss}), yarıiletkenin tüketme tabakasındaki uzay yükü (Q_{sc}), yüzeydeki enerji seviyesi ($q\Phi_0$), engel alçalması ($q\Delta\Phi_B$), arayüzey potansiyeli ($q\Delta$), yarıiletkenin elektron yatkınlığı (χ_{yi}), difüzyon potansiyeli (V_d) ve yarıiletkenin yasak enerji bant aralığı (E_g)'dir.



Şekil 2.16 N-tipi bir MS kontağın detaylı enerji-bant diyagramı.

2.8.1 Akım-Gerilim (I - V) Karakteristikleri

Schottky diyotlarda akım iletimini çoğunluk taşıyıcıları oluşturur. Azınlık yük taşıyıcılarının katkıları ise ihmal edilir. Akımın çoğunluk taşıyıcıları ile olması ve aynı zamanda taşıyıcıların termal uyarılmaları engeli aşması, aygıtın diğer eklem çeşitlerine göre daha hızlı çalışmasını sağlar. Diğer taraftan aşırı katkılandırılmış Schottky diyotlarının eklem genişlikleri azalacağından dolayı meydana gelecek tünelleme akımları aygıtın hız ve performansına olumlu yönde katkıda bulunur.

Yüksek mobiliteli yarıiletkenlerin oluşturduğu Schottky diyotlarında düz beslem çok yüksek olmadıkça akım iletim mekanizması termiyonik emisyon teorisine uyar. Buna göre yapının akım-gerilim ilişkisi,

$$I = I_o \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.56)$$

şeklindedir. Burada I_o , doyma akımı olup,

$$I_o = AA^*T^2 \exp\left[\frac{-q(\Phi_{Bo})}{kT}\right] \quad (2.57)$$

ifadesi ile verilir. Burada A , kontak alanı ve Φ_{Bo} , sıfır beslem engel yüksekliğidir. A^* , Richardson sabiti olarak adlandırılır. Bu sabit, yarıiletkendeki elektronların etkin kütlesi, engeli geçen elektronların kuantum mekanik yansımaları ve metal yüzeyi ile potansiyel engelin tepesi arasındaki elektronların fonon saçılması dikkate alınarak düzenlenmiş olup,

$$A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \quad (2.58)$$

ile verilir. Burada, m^* , taşıyıcının etkin kütlesi, k ve h sırasıyla Boltzmann ve Planck sabitidir. (2.56) ifadesi ideal bir diyodu tanımlar. (2.56) ifadesinin $\ln I - V$ grafiği bir doğruyu vermelidir. Aksi takdirde ideallikten sapma var demektir. Gerçekte, 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 (2.56) ifadesi bir düzeltme faktörü ile yeniden ifade edildiğinde,

$$I = I_o \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.59)$$

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

2.8.2 Kapasite-Gerilim (C-V) Karakteristikleri

Metal/yarıiletken kontaklardaki metal tarafında bulunan negatif yüzey yükleri ile yarıiletken tarafındaki iyonize olmuş alıcıların oluşturduğu tüketme bölgesi bir kondansatör gibi davranır. Yapıya ters beslem uygulandığında yapının tüketme bölgesi genişler ve bu bölgede yük değişimleri meydana gelir ki, bu da kapasitede değişimlere sebep olur. Schottky yapılarına ters beslem uygulandığında değişime

uğrayan Schottky kapasitesinden önemli diyot parametreleri elde edilir. Bir yarıiletkende yük yoğunluğu (birim alan başına düşen),

$$Q = qN_A W_D = \sqrt{2\varepsilon_s q N_A (V_d \pm V)} \quad (2.60)$$

ile verilir. Burada q , elektronik yük, N_A , taşıyıcı yoğunluğu, W_D , tüketme bölgesi genişliği, V_d , difüzyon potansiyeli ve ε_s , yarıiletkenin elektrik geçirgenliğidir. Ekleme küçük bir ac sinyal uygulandığında yük değişimleri sonucu küçük bir sinyal kapasitesi meydana gelir. Bu kapasite, tüketme bölgesi kapasitesi olup,

$$C = \frac{dQ}{dV} = \sqrt{\frac{q\varepsilon_s N_A}{2(V_d + V)}} \quad (2.61)$$

şeklinde tanımlanır. (2.61) ifadesinden görüldüğü gibi eklem kapasitesi uygulanan gerilim ile ters, taşıyıcı yoğunluğu ile doğru orantılıdır. Taşıyıcı yoğunluğu oranı arttığında eklem kapasitesi de artacaktır. (2.61) ifadesi ters çevrilip karesi alındığında,

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_d + V)}{q\varepsilon_s N_A} \quad (2.62)$$

elde edilir. Bu ifadeye göre $1/C^2$ - V eğrisinin düz bir doğru olması beklenir. Bu doğrunun eğimi bize taşıyıcı yoğunluğunu, yani bir başka deyişle yarıiletkene yerleştirilmiş katkı atomlarının yoğunluğunu (N_A) vermekte olup,

$$\frac{d1/C^2}{dV} = \frac{2}{q\varepsilon_s N_A} \quad (2.63)$$

şeklinde ifade edilir. Eğrinin gerilim eksenini kestiği nokta (V_o),

$$V_o = V_d - \frac{kT}{q} \quad (2.64)$$

ifadesi yardımıyla yapının difüzyon potansiyelini verir. Burada k , boltzman sabiti ve T Kelvin cinsinden sıcaklıktır.

2.9 Arayüzey Durumları

Arayüzey durumlarını meydana getiren unsurları dört grupta toplayabiliriz. Bunlardan birincisi, yüzeydeki periyodik örgü yapısının kesintiye uğramasıdır [21]. Yani buna kontak oluşmadan önceki mevcut olan yüzey durumları diyebiliriz. Kesintiye uğramış örgü yapısı kolay bir şekilde bağ yapabilir. Bu yüzden yarıiletken malzeme, kimyasal temizleme işlemi biter bitmez vakum ortamına alınsa bile üzerinde bir miktar (5~20 Å) doğal oksit tabakası oluşacaktır. Bu da yarıiletken ile kaplanacak metal arasında belirli bir kalınlığı olan bir arayüzey tabakasının var olması demektir. Bu arayüzey tabakası, kalın bir oksidin bant yapısı karakteristiklerine sahip olmayacak kadar ince olsa bile diyodun temel parametrelerine olumsuz yönde etki edebilir. Böylece oluşturulan Schottky yapısının parametreleri ideallikten sapmalar gösterecektir. İkincisi, kontak oluştuktan sonra ortaya çıkan yüzey durumlarıdır. Bunlar yarıiletkenin yüzeyine yayılmış olan safsızlıkların varlığından dolayı meydana gelir [8]. Üçüncüsü, hem yarıiletkenin yüzeyinde hem de gövdesinde bulunan kusurların oluşturduğu yüzey durumlarıdır. Sonuncusu ise, kimyasal reaksiyonların oluşturduğu yüzey durumlarıdır. 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 [19]. Metalden yarıiletkene doğru yük akışıyla meydana gelen bu yüzey durumlarına metalle uyarılan ara yüzey durumları (metal-induced gap states) adı verilir [22,23]. Arayüzey durumları yoğunluğu teoriksel olarak yüzey atomlarının yoğunluğu mertebesinde, yani 10^{15}cm^{-2} civarındadır. Fakat deneysel sonuçlar bunun $10^{11} - 10^{12} \text{cm}^{-2}$ mertebesinde olduğunu göstermektedir [8].

2.9.1 Arayüzey Durumları ve Belirleme Yöntemleri

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.

2.9.1.1 Kapasite Yöntemi

Kapasite ölçümleri kullanılarak yapılan hesap tekniklerinden birisi yüksek-düşük frekans kapasite yöntemidir. Bu yöntemde yüksek frekans (C_{HF}) ve düşük frekans (C_{LF}) ölçüm değerleri kullanılarak yüzey durumları [22,23],

$$N_{ss} = \frac{C_{ox}}{qA} \left(\frac{C_{LF}}{C_{ox} - C_{HF}} - \frac{C_{HF}}{C_{ox} - C_{LF}} \right) \quad (2.65)$$

ifadesi kullanılarak elde edilir. Burada C_{ox} , oksit kapasitesi, A , kontak alanıdır. Oksit kapasitesi yüksek frekans ve kuvvetli akümülyasyonda sabit maksimum kapasiteye eşittir ve

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_o \epsilon_{ox} A}{d_{ox}} \quad (2.66)$$

ifadesi ile verilir. Burada ϵ_{ox} , oksit tabakasının dielektrik sabiti, ϵ_o , boşluğun elektrik geçirgenliği ve d_{ox} oksit tabakası kalınlığıdır.

Arayüzey durumlarını tayin etmekte kullanılan bir diğer yöntem de Chattopadhyay yöntemidir [26]. Bu yöntemde elde edilen deneysel ölçüm değerleriyle yarıiletkende bulunan arayüzey durumlarının enerji dağılımı elde edilir. Yapıya bir ac sinyali uygulandığında tüketme tabakası yük yoğunluğu, yüzey potansiyeli ve tünelleme akım yoğunluğu değişir. Alçak frekanslarda arayüzey durumları bu sinyali takip eder ve kapasite,

$$C_{LF} = \frac{\delta Q_{sc}}{\delta V} + \frac{\delta Q_{it}}{\delta V} \quad (2.67)$$

ile ifade edilir [27]. Burada, Q_{sc} uzay yükü ve Q_{it} arayüzey durumlarını oluşturan yüklerdir. Yüksek frekanslarda yüzey durumları uygulanan ac sinyali takip edemez ve kapasite,

$$C_{HF} = \frac{\sqrt{\frac{q\epsilon_s N_A}{2\Psi_s}}}{1 + \frac{qJR_s}{kT} + \frac{\delta}{\epsilon_{ox}} \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_A}{2\Psi_s}}} \quad (2.68)$$

şeklinde ifade edilir. Burada R_s seri direnç, J , akım yoğunluğudur. Ψ_s , yüzey potansiyelidir ve

$$\Psi_s(V) = \Phi_B - C_2 V - \Phi_F \quad (2.69)$$

ile verilir [27,28]. Burada C_2 , I/C^2-V eğrisinin eğiminden elde edilen bir parametredir. (2.62) ve (2.63) ifadeleri kullanılarak arayüzey durum yoğunluğu,

$$N_{ss} = \frac{1}{q} \frac{C_{ox}}{C_{HF}} \frac{C_{HF} - C_{LF}}{C_{LF} - C_{ox}} \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_A}{2\Psi_s}} \quad (2.70)$$

şeklinde elde edilir. Burada N_A alıcı atomlarının yoğunluğudur.

2.9.1.2 Akım Yöntemi

Arayüzey durumlarını tayin etmenin bir diğer yöntemi de $I-V$ eğrilerinden faydalanmaktır. Bilindiği gibi yapının ideallik faktörü arayüzey durumlarına ve arayüzey tabakanın kalınlığına bağlıdır [29,30]. Buna göre ideallik faktörünün arayüzey durumlarına (N_{ss}) bağlılığını gösteren (2.36) ve (2.37) ifadeleri kullanılacak olursa,

$$N_{ss} = \frac{\varepsilon_s}{qW_D} \left(\frac{1}{n-1} \right) - \frac{\varepsilon_i}{\delta q} \quad (2.71)$$

ve

$$N_{ss} = \frac{\delta \varepsilon_s}{q \varepsilon_i} \left(\frac{1}{n-1} \right) - \frac{W_D}{q} \quad (2.72)$$

ifadeleri elde edilir. (2.71) ifadesi yeterince ince bir arayüzey tabakası olması durumunda, (2.72) ifadesi ise kalın arayüzey tabakası olması durumunda kullanılır [29].

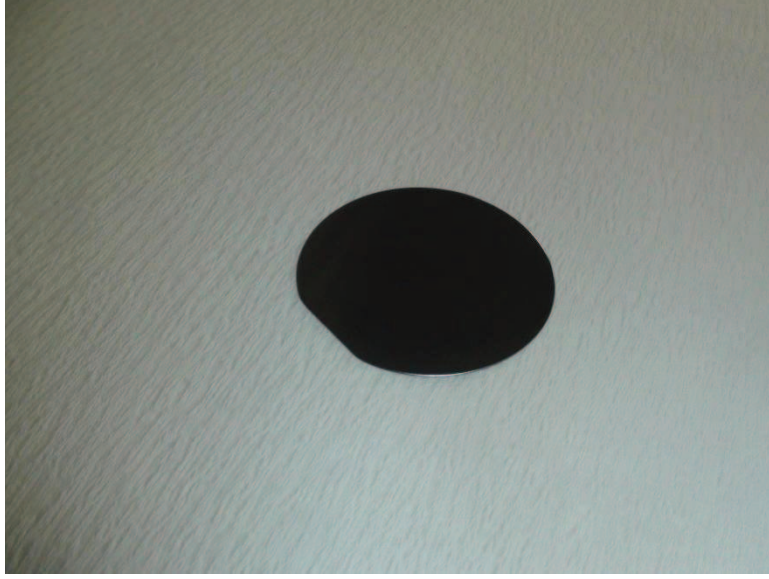
3. MATERYAL VE METOT

3.1 Yapıların Hazırlanması

Bu çalışmada diyot yapımında kullanılacak olan silisyum alt tabaka bir dizi kimyasal temizlik işlemlerinden geçirilmiştir. Bu işlemler, aygıt üretilmeden önce titizlikle yapılması gereken ve aygıtın elektriksel karakterizasyonuna etki edebilecek önemli bir aşamadır. Kimyasal temizlik aşamasının ardından sıra alt tabaka üzerinde kontak oluşumlarına gelir ki bu da Al/p-Si metal/yarıiletken yapısını oluşturur. Son olarak oluşturulan yapılardan gerekli elektriksel bağlantılar alınarak ilgili ölçüm cihazlarıyla karakterizasyon işlemlerine başlanır.

3.1.1 Kristal Temizleme İşlemi

Kullanılan kristal, yurtdışından “Wacker-Siltronic” firmasından satın alınmış olup, yaklaşık 5 cm çapında, 250 µm kalınlığında, 5 Ω-cm öz dirençli, Boron katkılı ve (100) düzleminde kesilmiştir (Şekil 3.1). Öncelikle kristal üzerindeki organik artıkları ve yağları temizlemek için bir beher içine trikloretilen konuldu ve silikon alt tabaka beher içine atıldı. Beher, Bandelin Sonorex marka bir ultrasonik banyo (Şekil 3.2) içerisinde 10 dakika kadar titreştirildi. Bir miktar aseton bir cam beher içerisine konuldu ve yaklaşık 55 dereceye kadar ısıtıldı. Silikon alt tabaka daha sonra bunun içine atılarak 10 dakika bekletildi. Buradan çıkarılan alt tabaka önceden beher içerisinde hazırlanmış metanol içerisine atıldı ve burada 5 dakika bekletildi. Sonrasında metanol içerisinden çıkartılan silikon alt tabaka, “Innovation Water Purification” sistemi (Şekil 3.3) ile üretilen 18 MΩ-cm öz dirençli deiyonize su ile bolca durulandı. Durulanan silikon kristali kuru azot ile kurutuldu. Buraya kadar yapılan tüm işlemler silikon alt tabaka üzerindeki olası yağları almak içindir.



Şekil 3.1 Boron katkılı p-tipi Silisyum kristali.



Şekil 3.2 “Bandelin Sonorex” marka ultrasonik banyo.



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

Organik artıkları uzaklaştırmak için ise RCA işlemine geçildi. Bunun için bir beher içine 325 ml deiyonize su, 65 ml NH_4OH (27%) (amonyum hidroksit) konuldu ve 70 dereceye kadar ısıtıldı (Şekil 3.4). Daha sonra ısıtılan bu karışımın içerisine 65 ml H_2O_2 (30%) (hidrojen peroksit) eklendi ve solüsyon içinde kabarcıklar oluşana kadar beklenildi. Solüsyonda etkileşme başlamasından yani kabarcıkların oluşmasından hemen sonra silikon kristali bu karışımın içine atılarak 15 dakika beklenildi. İşlem sonunda silikon kristal yine 18 $\text{M}\Omega\text{-cm}$ dirençli deiyonize su ile bolca durulandı. Sonra sıra silikon üzerindeki oksit tabakasını uzaklaştırma işlemine geldi. Bunun için HF (hidroflorik asit) kullanıldı. Bir teflon beher içerisine 480 ml deiyonize su konuldu ve üzerine 20 ml HF ilave edildi. Silisyum alt tabaka bu karışım içerisinde 2 dakika kadar bekletildi. Daha sonra kristal bolca deiyonize su ile çalkalanıp sonrasında azot gazı ile kurutuldu. Diğer taraftan diyot yapımında kullanılacak olan alüminyum metalleri de aynı temizlik aşamalarından geçirildi.



Şekil 3.4 Kristal temizliği aşamasında kullanılan ısıtıcı düzeneği.

3.1.2 Al/p-Si Yapılarının Oluşturulması

Al/p-Si yapılarını oluşturmak için “Edwards” marka evaporasyon sistemi kullanıldı (Şekil 3.5). Bu sistem, bir rotary (dönerek işleyen) ile difüzyon pompasından oluşmuş olup, evaporasyon işlemleri vakum altında bir cam fanus içerisinde gerçekleşir.



Şekil 3.5 Al/p-Si yapılarının oluşturulması sırasında kullanılan “Edwards” marka evaporasyon sistemi.

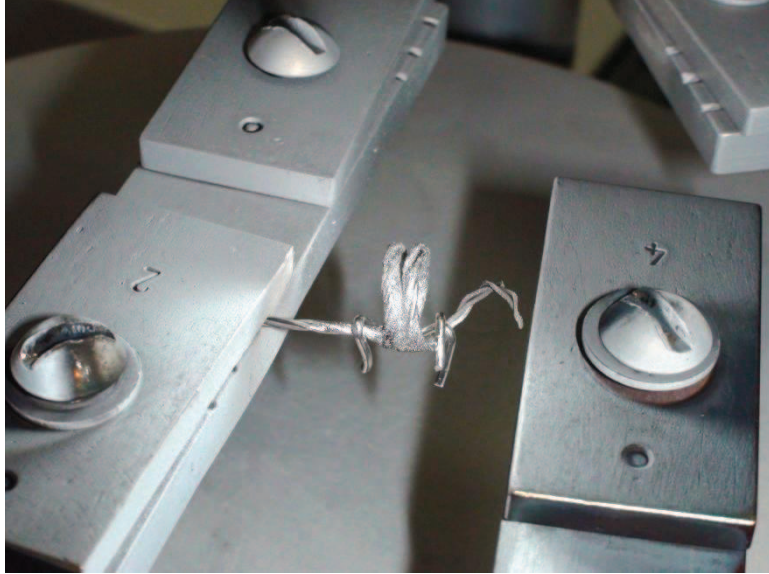
Evaporasyon sisteminin hazır hale getirilebilmesi için kimyasal temizlik işlemi sırasında rotary (dönerek işleyen) ve difüzyon pompası çalıştırıldı. Doğrultucu ve omik kontaklar için uygun maskeler seçildi (Şekil 3.6). Kimyasal temizleme işlemi bitirilen silisyum alt tabaka atmosfer ortamında fazla bekletilmeden evaporasyon sistemine yerleştirildi. Bu işlem için evaporasyon sisteminin numune tutucularına önce omik kontak için kullanılacak olan maske daha sonra da silisyum alt tabaka, kaplanacak yüzeyi alt tarafa gelecek şekilde yerleştirildi (Şekil 3.7). Sistemin elektrotları arasına buharlaştırması yapılacak olan malzemeye uygun pota takıldı. Pota içerisine buharlaştırılacak olan alüminyum (%99.999'luk) metali yerleştirildi (Şekil 3.8) ve sistemin cam fanusu kapatıldı. Gerekli olan ön basınç değerine inildikten sonra bir yüksek vakum vanası yardımıyla difüzyon pompası devreye sokuldu. İstenilen basınç değerine gelindikten sonra (6×10^{-6} Torr) elektrotlara gerilim uygulanmaya başlandı. Gerilim arttırılması ile potadan geçen akım da arttı ve metali buharlaştıracak sıcaklığa gelince evaporasyon işlemi başladı. İstenilen film kalınlığına gelince bir shutter (kesici kapak) yardımıyla evaporasyon işlemi sonlandırıldı. Potaya uygulanan gerilim kesildi. Böylece omik kontak için gerekli tabaka oluşturulmuş oldu. Evaporasyon sırasında oluşturulan film kalınlığı (2000 Å) ve biriktirme hızı 10-20 Å/sn "Edwards FTM6" marka (Şekil 3.9) bir kalınlık ölçer ile ölçüldü.



Şekil 3.6 Omik kontakın oluşturulması için kullanılan metal maske.



Şekil 3.7 Numune tutucu içerisine maske ile yerleştirilmiş silisyum kristali.

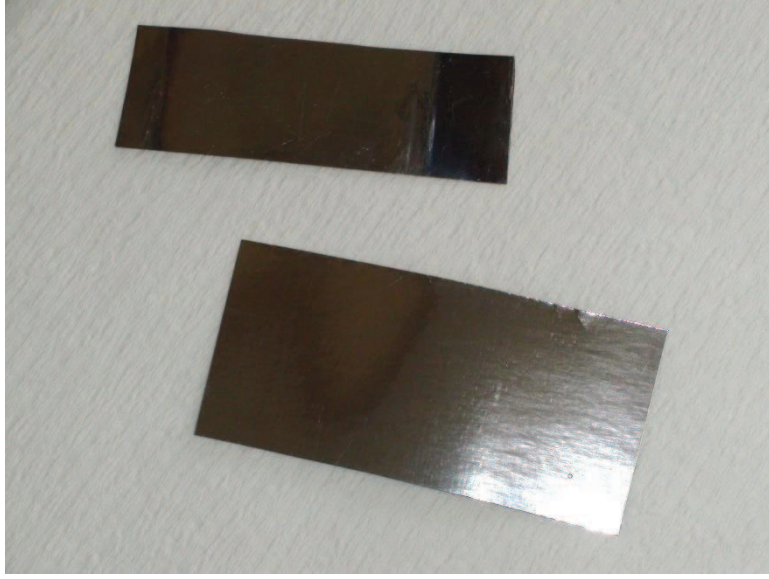


Şekil 3.8 Evaporasyon işleminde kullanılan tungsten pota.

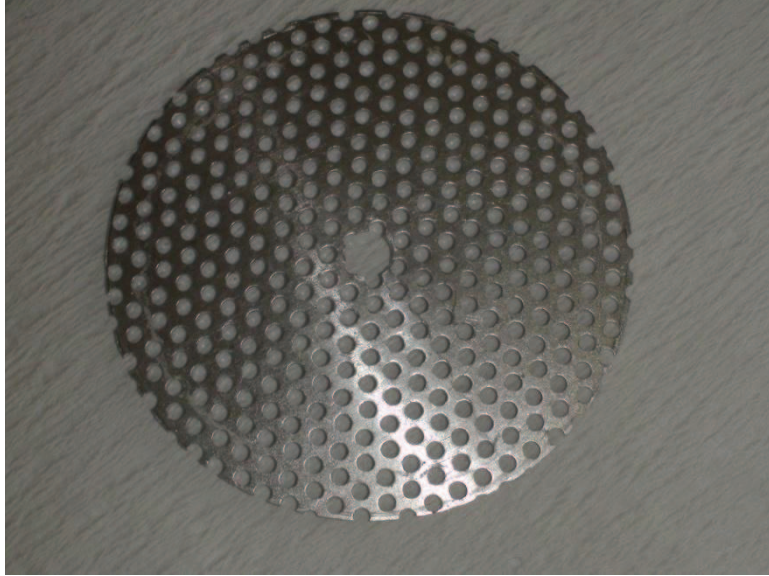


Şekil 3.9 “Edwards FTM6” marka kalınlık ölçer.

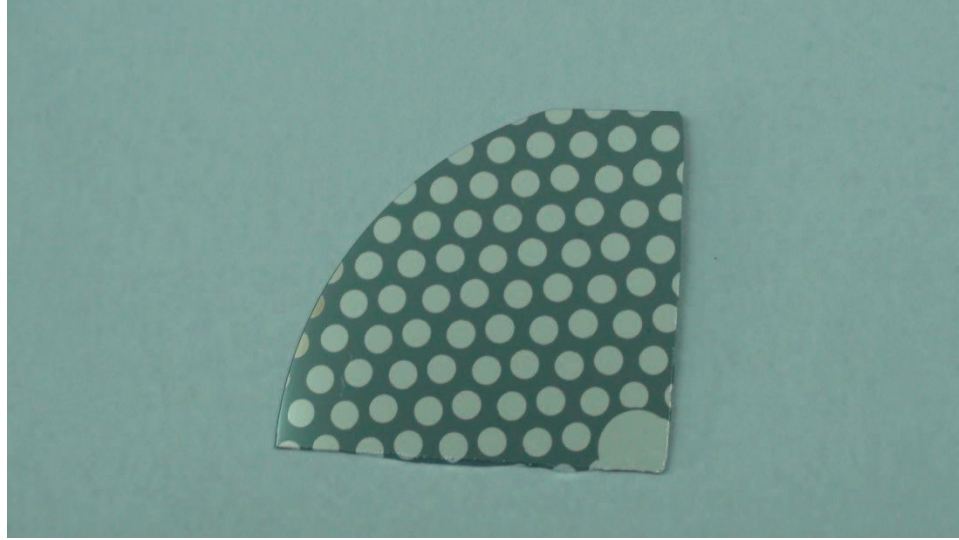
Evaporasyon ile film oluşturma işlemi tamamlandıktan sonra cam fanus içerisine yavaş yavaş hava verilmeye başlandı ve sistem atmosfer ortamına açıldı. Elektrotlar arasındaki pota çıkartılarak yerine tungsten bir levha takıldı. Bu levha üzerine silisyum alt tabaka, kaplanmış yüzeyi üste gelecek şekilde yerleştirildi (Şekil 3.10). Cam fanus tekrar yerine yerleştirilerek sistem vakum altına alındı. İstenilen vakum değerine erişildiğinde levhaya gerilim uygulanarak ısınması sağlandı. Bir süre sonra alüminyum kaplı yüzey silisyum içerisine çöktü ve böylece omik kontak oluşmuş oldu. Levhanın soğuması beklendikten sonra evaporasyon sistemi atmosfere açılarak önceki pota takıldı ve omik kantağın, ölçümler sırasında elektriksel iletkenliğinin sağlanabilmesi için çöktürülen tabaka üzerine tekrar alüminyum ($\approx 2000\text{\AA}$) kaplandı. Daha sonra doğrultucu kontak için gerekli olacak 1.7 mm çaplı delikleri olan metal maske (Şekil 3.11) numune tutucuya takıldı ve silisyum alt tabaka, kaplanmamış yüzeyi alta gelecek şekilde maske üzerine yerleştirildi. Sistem tekrar vakum altına alınarak kaplama gerçekleştirildi (1500\AA). Böylece bütün bu işlemler sonucunda 40 adet Al/p-Si Schottky yapısı elde edilmiş oldu. Şekil 3.12 ve 3.13’te, çeyrek silisyum alt tabaka üzerinde oluşturulan Al/p-Si Schottky diyotlarının görüntüsü ve şematik diyagramı görülmektedir.



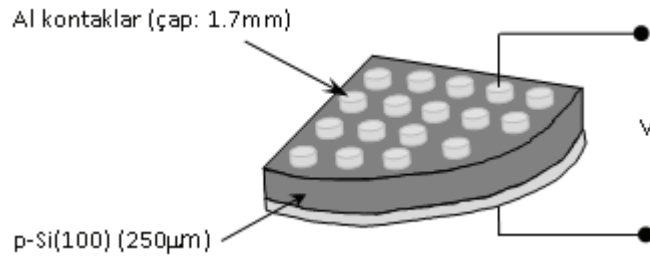
Şekil 3.10 Omik kontak oluşumunda kullanılan tungsten levhalar.



Şekil 3.11 Doğrultucu kontak oluşumunda kullanılan metal maske.



Şekil 3.12 Çeyrek silisyum alttabaka üzerinde oluşturulan Al/p-Si Schottky yapılarının görüntüsü.



Şekil 3.13 Oluşturulan Al/p-Si Schottky yapılarının şematik diyagramı.

3.2 Kullanılan Ölçüm Cihazları ve Düzenekleri

Elde edilen Al/p-Si Schottky diyotlarının elektriksel karakterizasyonu için, IEEE-488 AC/DC arayüz kart ile bağlantılı bilgisayar kontrollü ölçüm cihazları kullanıldı. Akım-gerilim ($I-V$) ölçümleri için Keithley 2400 Source Meter cihazı, kapasite-gerilim ($C-V$) ve iletkenlik gerilim ($G-V$) ölçümleri için ise Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 Bilgisayar kontrollü Keithley 2400 Source Meter ve Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer cihazları.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1 Giriş

Üretilen Al/p-Si(100) Schottky diyotlarının (40 adet) detaylı aygıt parametreleri akım-gerilim ($I-V$), kapasite-gerilim ($C-V$) ve iletkenlik-gerilim ($G-V$) eğrileri yardımıyla elde edilmiştir. Tüm elektriksel ölçümler karanlık ortamda ve oda sıcaklığında alınmıştır. $C-V$ ve $G-V$ ölçümleri 1 MHz sabit frekansta ve -1 ile +2 volt aralığında yapılmıştır. $I-V$, $C-V$ ve $G-V$ ölçümlerinden hareketle, başlıca diyot parametreleri olan idealite faktörü (n), doyma akımı (I_0), difüzyon potansiyeli (V_d) ve engel yüksekliği (Φ_B)'nin yanında yine her bir diyot için seri direnç (R_s), Fermi enerji seviyesi (E_F), tüketim tabakası genişliği (W_D), Schottky alçalması ($\Delta\Phi_B$), maksimum elektrik alan (E_m) ve yüzey durumları (N_{ss}) gibi diyot parametreleri tayin edilmiştir. Diyotların seri direnç değerleri modifiye edilmiş Norde yöntemi ve Cheung yöntemleri kullanılarak hesap edilmiş ve bu iki yöntemden elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Elde edilen farklı değerlerdeki engel yüksekliklerinden dolayı yapıların engel yüksekliği homojensizliği incelenmiş ve bazı parametrelerin istatistiksel (Gaussian) dağılımları elde edilmiştir.

4.2 Düz Beslem Akım-Gerilim ($I-V$) Karakteristikleri

Ölçümü yapılan (40 adet) Al/p-Si(100) Schottky diyoduna ait yarı logaritmik düz beslem $I-V$ karakteristikleri Şekil 4.1.a ve 4.1.b'de verilmiştir. Şekil 4.1.a ve 4.1.b'den görüldüğü üzere diyot eğrileri iyi bir doğrultma vermiştir. Şekil 4.2 ise bu diyotlardan bir tanesinin yarı logaritmik düz beslem $I-V$ karakteristiği verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere 0.08 - 0.2V aralığında bir lineer bölge mevcuttur. Termoyonik emisyon akımının etkin olduğunu kabul edilirse, bu modelde uygulanan voltaj ve akımın arasındaki bağıntı [31],

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

ile verilir. Burada q , elektronik yük, V , diyot gerilimi, k , Boltzmann sabiti ve T Kelvin cinsinden sıcaklıktır. I_o çoğunluk taşıyıcıları için ters doyum akımı olup,

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

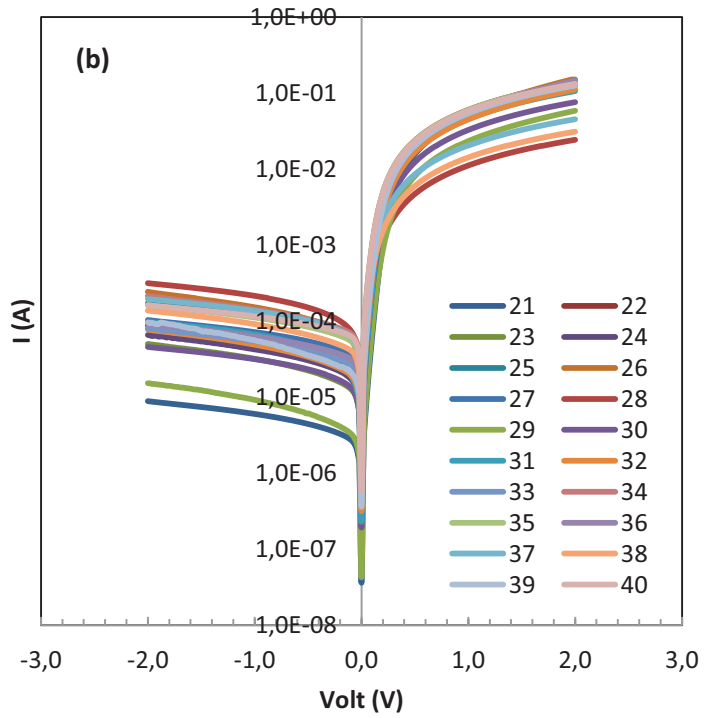
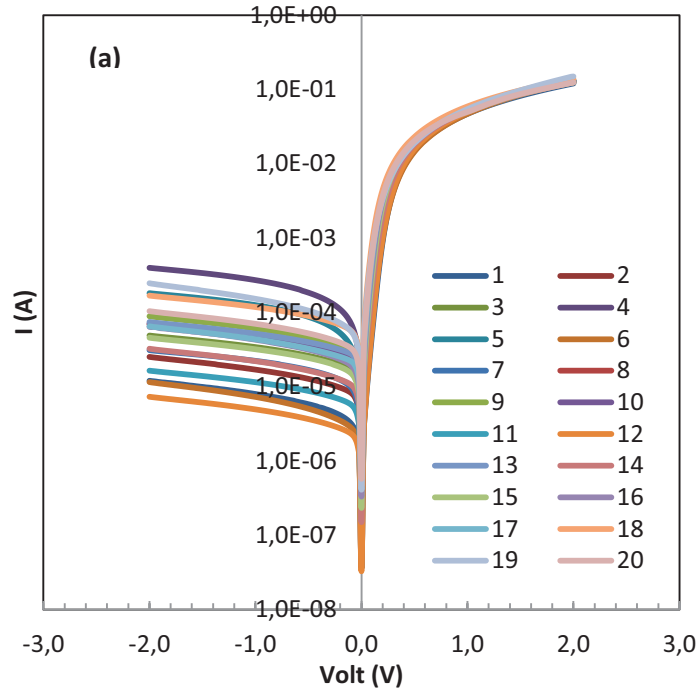
ile ifade edilir. Burada A , A^* ve Φ_B sırasıyla diyot alanı, Richardson sabiti ve etkin metal/yarıiletken engel yüksekliğidir. (4.1) ifadesindeki akım-gerilim denklemi ideal bir diyot için geçerlidir. Ancak gerçekte ideal bir diyot yoktur ve bu yüzden yukarıdaki ifadeye ideallikten sapmaya bağlı olarak bir düzeltme faktörü (n) eklenmelidir ki bunun adı ideallik faktörüdür. Böylece denklem 4.1,

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

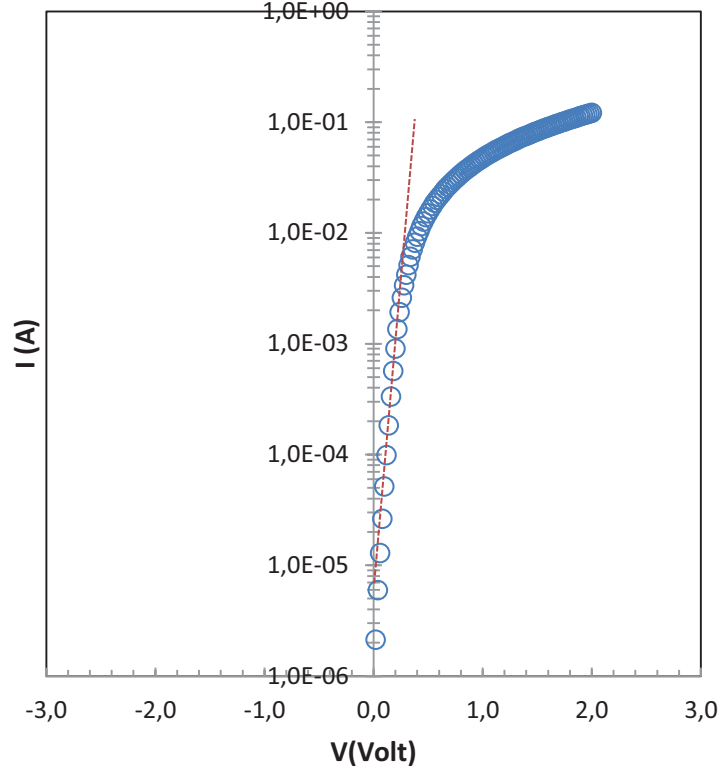
şeklini alır. Burada ideallik faktörü sıcaklığa, ara yüzey durumlarına ve uygulanan gerilime bağlı olup, değeri 1'den büyüktür. Elde edilen yapıların ideallik faktörleri Şekil 4.2'deki yarı logaritmik I - V eğrisinin eğiminden hesaplanmıştır (Denklem 4.4).

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

I_o doyma akımının değeri, lineer eğrinin akım eksenini kestiği noktadan elde edilmiştir. Elde edilen diyotların engel yüksekliği 4.2 denkleminde elde edilmiştir. Şekil 4.2'de verilen diyot yapısı için (4.1), (4.2) ve (4.4) ifadeleri kullanılarak $I_o = 2.31 \times 10^{-6} A$, $\Phi_{B0} = 0.623 eV$ ve $n = 1.24$ olarak elde edilmiştir. Çizelge 4.1'de tüm diyotlar için I - V eğrilerinden elde edilen I_o , Φ_{B0} ve n değerleri verilmiştir. Çizelge 4.1'den görüldüğü üzere engel yükseklikleri değişik değerler almaktadır. Bu durum diyotların oluşturulduğu silisyum kristali üzerindeki homojensizliklere atfedilebilir.



Şekil 4.1 Tüm Al/p-Si(100) Schottky diyotlarının yarı logaritmik düz beslem $I-V$ karakteristikleri: a) 1'den 20 nolu numuneye kadar, (b) 21'den 40 nolu numuneye kadar.



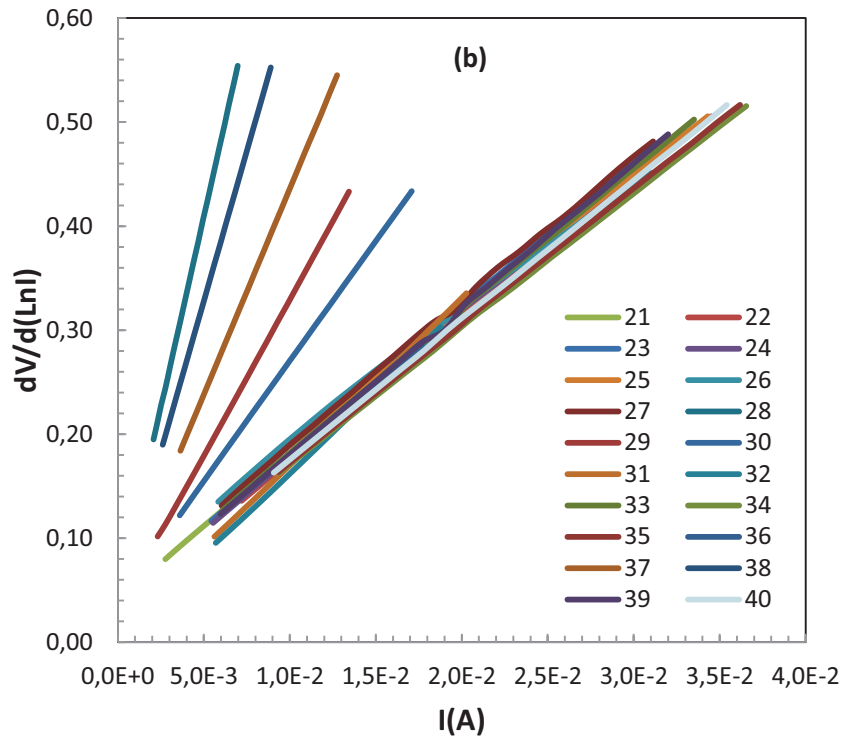
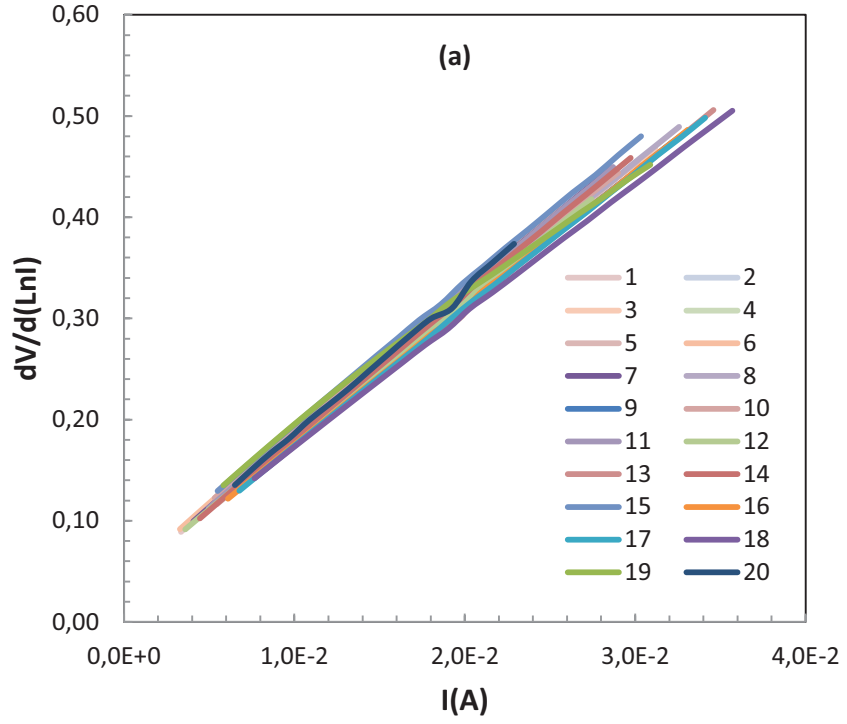
Şekil 4.2 Al/p-Si(100) Schottky diyotlarından bir tanesinin yarı logaritmik düz beslem I - V karakteristiği.

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

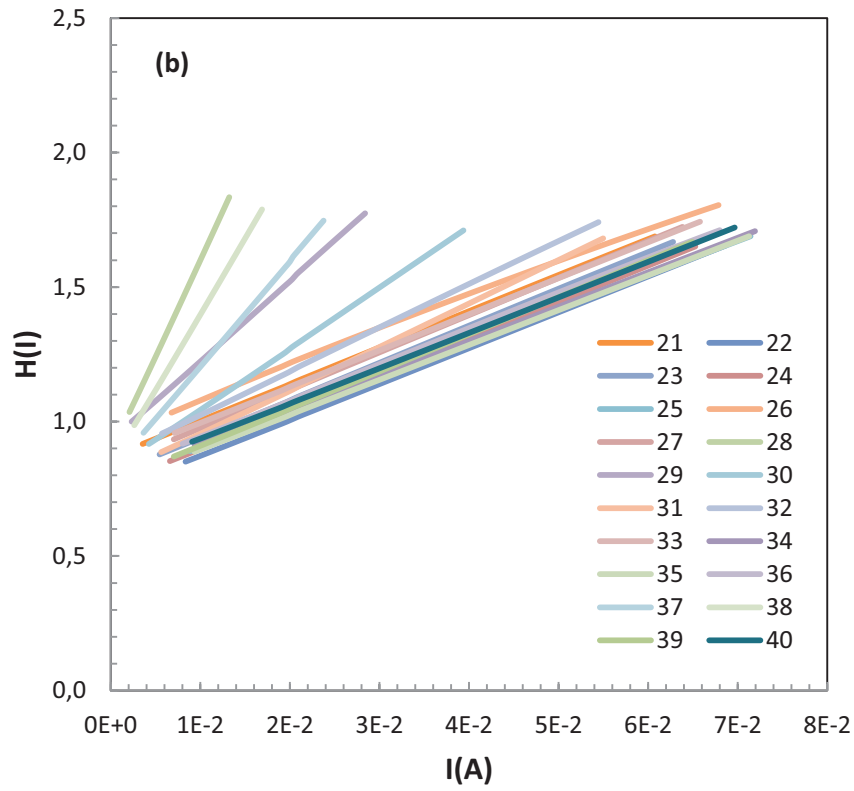
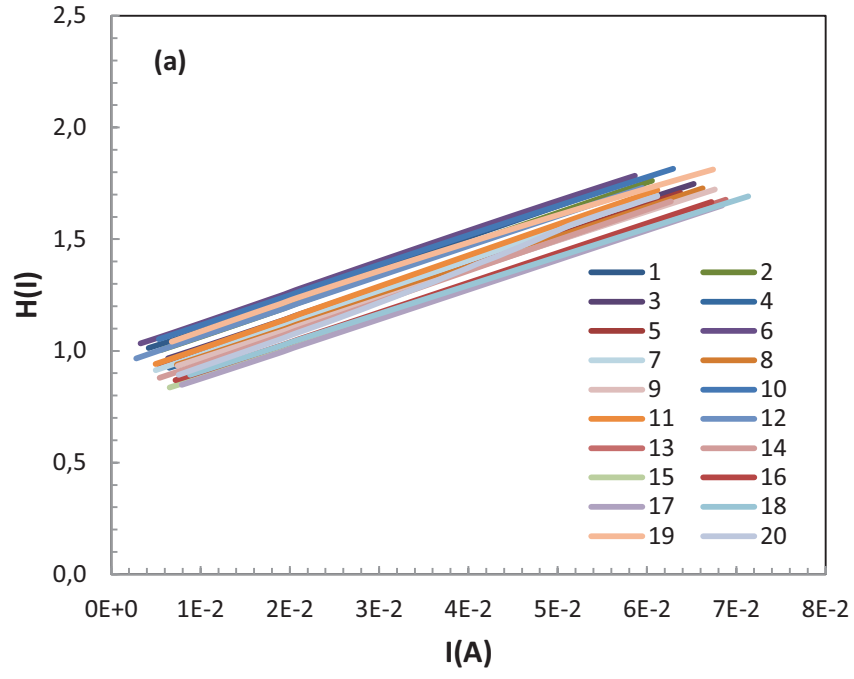
Diyot	n	I_0 ($\times 10^{-6}$ A)	Φ_B (eV)	N_{ss} ($\times 10^{13}$ eV $^{-1}$ cm $^{-2}$)	Diyot	n	I_0 ($\times 10^{-6}$ A)	Φ_B (eV)	N_{ss} ($\times 10^{13}$ eV $^{-1}$ cm $^{-2}$)
1	1.24	2.3	0.623	2.57	21	1.39	4.3	0.607	1.55
2	1.36	9.5	0.586	1.21	22	1.80	74.5	0.533	4.24
3	1.79	45.3	0.546	1.25	23	1.49	15.4	0.574	4.37
4	1.70	36.8	0.551	3.37	24	1.54	25.7	0.560	3.30
5	1.53	17.2	0.571	2.40	25	1.72	88.1	0.528	3.64
6	1.44	4.9	0.603	1.51	26	1.78	74.0	0.533	4.62
7	1.33	8.5	0.589	7.79	27	1.64	53.1	0.542	4.06
8	1.78	59.0	0.539	0.43	28	1.66	40.9	0.548	2.91
9	1.73	60.1	0.538	3.38	29	1.33	4.2	0.607	2.46
10	1.77	34.0	0.553	4.45	30	1.64	24.0	0.562	4.14
11	1.54	12.4	0.579	1.51	31	1.53	21.9	0.565	3.37
12	1.30	3.4	0.613	0.67	32	1.47	25.1	0.561	2.66
13	1.78	70.8	0.534	1.07	33	1.43	31.7	0.555	2.21
14	1.40	12.2	0.580	1.98	34	1.67	93.9	0.527	4.28
15	1.52	24.6	0.562	5.06	35	1.56	74.6	0.533	3.02
16	1.52	31.3	0.555	2.20	36	1.44	41.4	0.548	1.94
17	1.70	53.1	0.542	4.02	37	1.85	69.8	0.535	4.43
18	1.71	86.3	0.529	5.69	38	1.64	42.1	0.548	1.62
19	1.78	73.2	0.533	4.49	39	1.55	34.0	0.553	3.57
20	1.59	52.5	0.542	2.43	40	1.82	116.0	0.521	2.49

Şekil 4.1 ve 4.2'ye bakıldığında yarı logaritmik düz beslem $I-V$ eğrilerinin uygulanan düz beslem arttırıldıkça büküldüğü görülmektedir. Bu durum bize yapıların seri dirençlerinin sıfırdan farklı olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada seri direnç tayininde ideallik faktörünün tüm diyotlarda 1'den büyük çıkmış olması sebebiyle modifiye Norde yöntemi ve yüksek voltaj bölgesinde de Cheung yöntemi kullanılmış olup, bu iki yöntemden elde edilen değerler karşılaştırılmıştır.

Yapıların Cheung yöntemine göre seri dirençleri, $I-V$ karakteristiklerinden faydalanmak suretiyle (2.53), (2.54) ve (2.55) ifadeleri kullanılarak hesaplanmıştır. Öncelikle diyotların her birinin $dV/d(\ln I) - I$ eğrileri çizilmiştir. Şekil 4.3.a ve 4.3.b'de tüm diyotların $dV/d(\ln I) - I$ eğrileri verilmiştir. Çizilen bu doğruların eğiminden seri direnç değerleri ve düşey eksenini kestiği noktadan ise ideallik faktörleri elde edilmiştir. Daha sonra (2.54) ifadesinde tanımlanan bir $H(I)$ fonksiyonu yardımıyla diyotların $H(I)-I$ grafikleri çizilmiştir. Şekil 4.4.a ve 4.4.b'de tüm diyotların $H(I)-I$ grafikleri verilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen doğruların eğimlerinden seri direnç değeri, $H(I)$ eksenini kestiği noktadan ise engel yüksekliği değerleri elde edilmiştir.

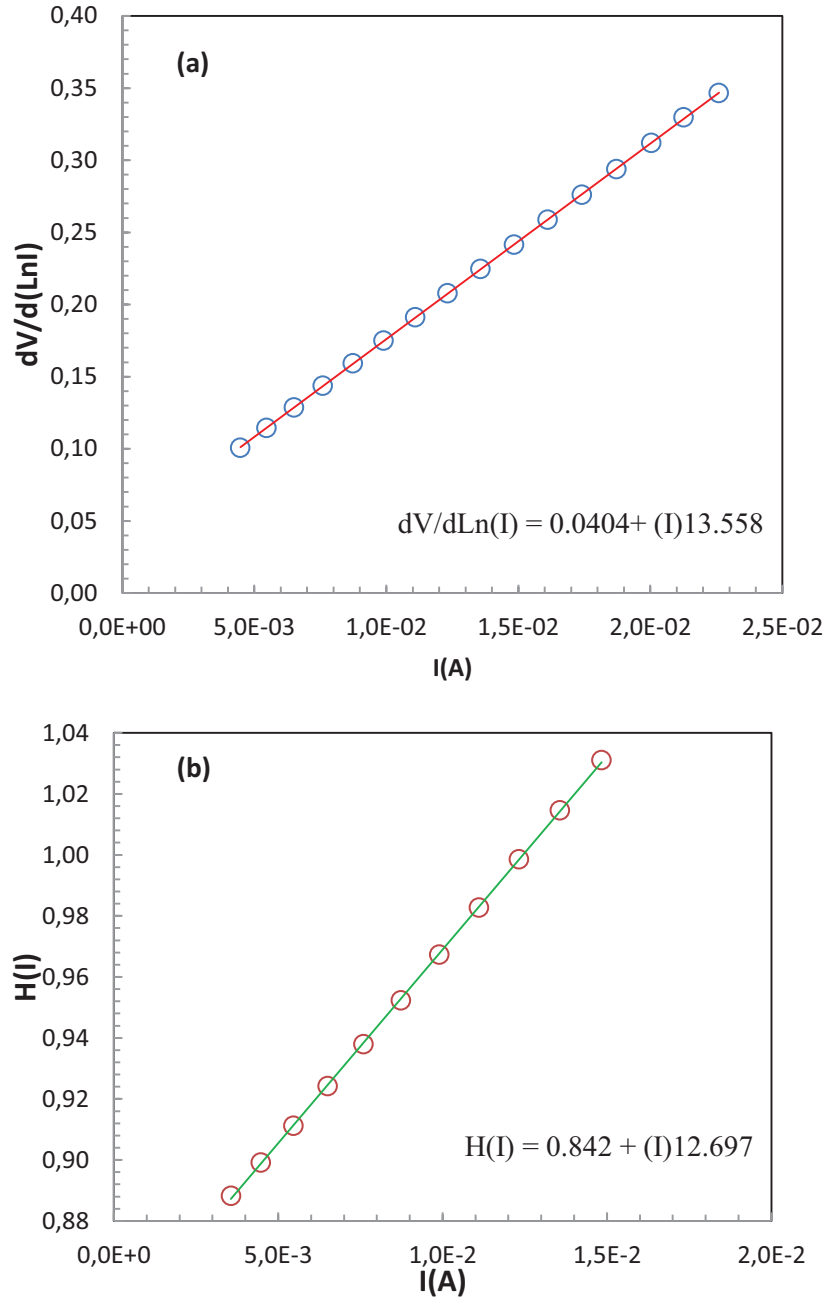


Şekil 4.3 Tüm Al/p-Si(100) Schottky diyotlarının $dV/d(LnI) - I$ eğrileri: a) 1'den 20 nolu numuneye kadar, (b) 21'den 40 nolu numuneye kadar.



Şekil 4.4 Tüm Al/p-Si(100) Schottky diyotlarının $H(I)$ - I eğrileri: a) 1'den 20 nolu numuneye kadar, (b) 21'den 40 nolu numuneye kadar.

Şekil 4.5.a ve 4.5.b’de 4 nolu diyottan elde edilen $dV/d(\ln I)-I$ ve $H(I)-I$ grafiği verilmiştir. Şekil 4.5.a’daki eğri yardımıyla 4 nolu diyot için ideallik faktörü $n = 1.56$ ve seri direnç $R_s = 13.55 \Omega$ olarak elde edilmiştir. Şekil 4.5.b’deki eğri yardımıyla 4 nolu diyot için engel yüksekliği $\Phi_{B0} = 0.540 eV$ ve seri direnç $R_s = 12.69 \Omega$ olarak elde edilmiştir. Çizelge 4.2’de Cheung yöntemiyle elde edilen R_s , n ve Φ_B değerleri verilmiştir.

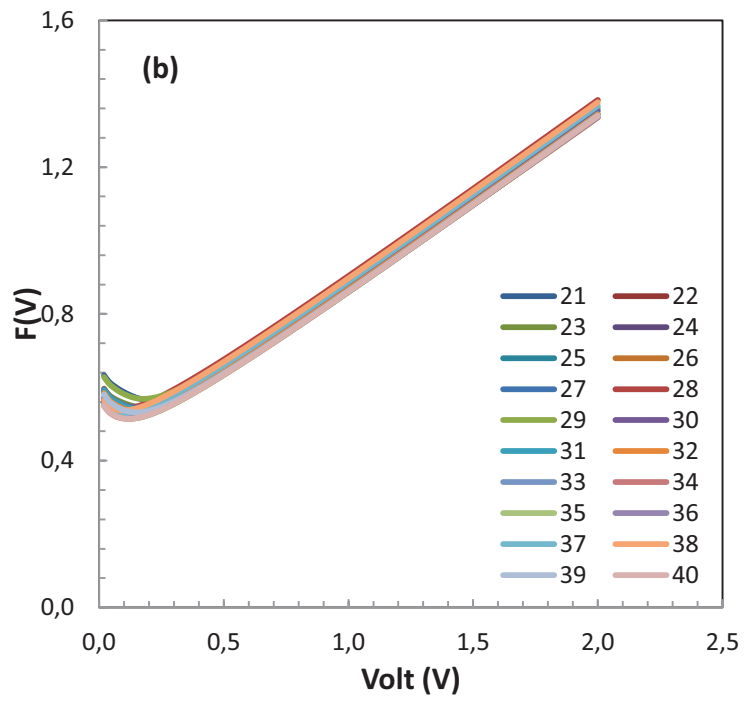
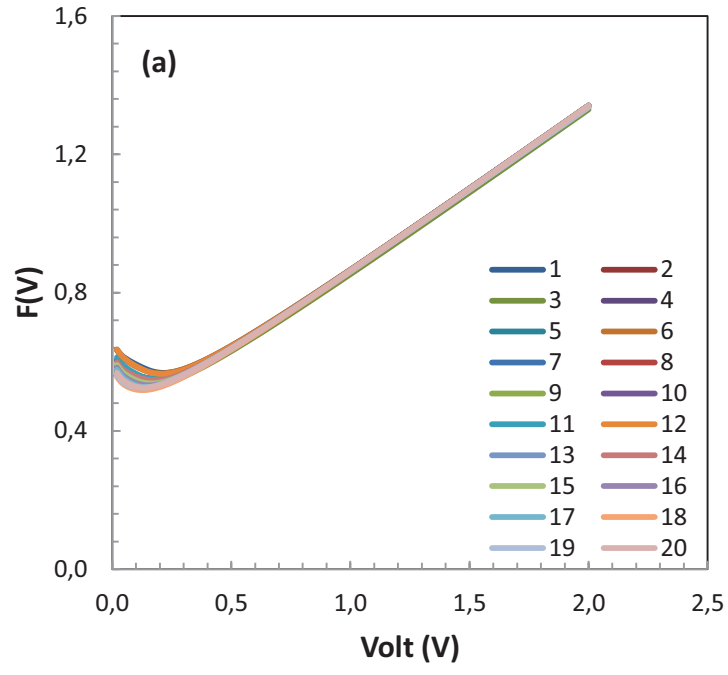


Şekil 4.5 (4) nolu diyot için: a) $dV/d(\ln I) - I$ eğrisi, b) $H(I)-I$ eğrisi.

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

Diyot	Φ_B (eV)	n	R_s (Ω)	R_s (Ω) H(l)	Diyot	Φ_B (eV)	n	R_s (Ω)	R_s (Ω) H(l)
1	0.570	1.67	14.40	13.81	21	0.590	1.48	14.92	13.00
2	0.551	1.68	14.28	13.64	22	0.534	1.40	13.86	12.75
3	0.536	1.65	13.88	13.07	23	0.567	1.42	14.66	13.10
4	0.540	1.56	13.55	12.69	24	0.557	1.38	14.26	12.88
5	0.557	1.53	14.02	13.03	25	0.521	1.50	13.46	12.43
6	0.569	1.74	14.38	13.54	26	0.517	1.82	15.03	13.85
7	0.565	1.50	14.68	13.54	27	0.530	1.58	14.99	13.76
8	0.526	1.60	13.89	13.30	28	0.524	1.70	73.02	70.36
9	0.528	1.58	13.79	13.01	29	0.573	1.63	30.55	28.95
10	0.535	1.84	14.11	13.28	30	0.552	1.49	23.17	22.09
11	0.559	1.57	14.46	13.46	31	0.553	1.45	16.54	15.64
12	0.578	1.59	13.92	12.79	32	0.537	1.61	16.80	15.91
13	0.528	1.46	13.61	12.88	33	0.527	1.64	13.89	13.12
14	0.565	1.43	14.57	13.58	34	0.512	1.55	13.10	12.40
15	0.556	1.37	14.28	13.40	35	0.515	1.50	13.37	12.66
16	0.544	1.43	13.83	13.01	36	0.523	1.55	13.93	13.14
17	0.539	1.38	13.81	13.03	37	0.524	1.54	39.66	37.74
18	0.520	1.50	13.39	12.68	38	0.525	1.61	57.11	54.35
19	0.516	1.84	14.84	13.99	39	0.545	1.43	14.40	13.13
20	0.529	1.49	14.78	13.96	40	0.511	1.58	13.49	12.76

Yapıların seri direnç değerleri farklı bir metot olan ve tanımlanan orijinal bir $F(V)$ fonksiyonunu kullanan Norde [14] metodu ile elde edilmiştir. Ancak yapıların idealite faktörleri 1'den büyük çıktıkları için Bohlin [18] tarafından yeniden düzenlenmiş Norde fonksiyonu kullanıldı. Bunun için diyotların (2.49) ifadesi kullanılarak $F(V)$ - V eğrileri çizildi. (2.49) ifadesinde bulunan keyfi sabit değeri, her bir diyot için o diyodun ideallik faktöründen büyük ve ilk tam sayı olacak şekilde alındı. Şekil 4.6a ve b'de tüm Al/p-Si(100) Schottky diyotlarının uygulanan besleme karşı $F(V)$ eğrileri görülmektedir.



Şekil 4.6 Tüm Al/p-Si(100) Schottky diyotlarının $F(V) - V$ eğrileri: a) 1'den 20 nolu numuneye kadar, (b) 21'den 40 nolu numuneye kadar.

Şekil 4.6.a ve 4.6.b'den görüldüğü gibi her diyoda ait $F(V)$ fonksiyonu bir minimumdan geçmektedir. Φ_B ve R_s değerleri, Şekil 4.6.a ve 4.6.b'deki eğrilerin minimum noktaları kullanılarak (2.50) ve (2.51) ifadelerinden elde edilmiş ve Çizelge 4.3'te verilmiştir. Şekil 4.6.a ve 4.6.b'deki eğrilerdeki 4 nolu diyottan elde edilen $F(V_0) = 0.539$, $V_0 = 0.12V$ ve $I_0 = 5.94 \times 10^{-4} A$ değerleri için, $R_s = 12.91 \Omega$ ve $\Phi_B = 0.545 eV$ bulunmuştur. Elde edilen bu değerler, kullanılan bir diğer yöntem olan Cheung yöntemiyle uyum içerisindedir.

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

Diyot	$R_s (\Omega)$	$\Phi_B (eV)$	Diyot	$R_s (\Omega)$	$\Phi_B (eV)$
1	21.82	0.613	21	24.06	0.595
2	21.18	0.577	22	17.83	0.529
3	18.61	0.541	23	22.01	0.564
4	12.91	0.545	24	13.33	0.552
5	20.13	0.562	25	18.35	0.523
6	37.55	0.591	26	13.89	0.531
7	33.88	0.575	27	16.00	0.535
8	16.49	0.533	28	50.41	0.541
9	17.47	0.532	29	68.84	0.593
10	12.24	0.549	30	22.18	0.555
11	14.68	0.567	31	25.94	0.556
12	27.16	0.600	32	22.42	0.551
13	15.37	0.528	33	28.77	0.542
14	25.99	0.568	34	13.72	0.520
15	13.89	0.552	35	11.71	0.523
16	17.41	0.545	36	21.84	0.536
17	18.62	0.534	37	10.07	0.531
18	18.65	0.524	38	54.92	0.542
19	18.59	0.529	39	15.95	0.544
20	10.53	0.534	40	17.54	0.520

Schottky yapılarında metal olmadığı durumlarda bile yarıiletken yüzeyinde bir arayüzey tabakasının oluşması mümkündür [20]. Bu arayüzey tabakası diğer bir deyişle arayüzey durumları yarıiletkenin yasak enerji bant aralığında olup belirli bir yoğunluğa sahiptir. Arayüzey tabakası kimyasal temizleme aşamaları sırasında meydana gelebilen ve kalınlığı genellikle 10-20 Å arasında olan bir tabakadır [8,31].

Bu çalışmada, Schottky yapılarının arayüzey tuzak yoğunlukları (N_{ss}) I - V eğrileri kullanılarak yeterince ince bir arayüzey tabakası için (2.71) ifadesinden elde edilmiştir. Arayüzey tabakasının ve arayüzey durumlarının varlığında uygulanan gerilime bağlı olarak engel yüksekliğinin değişimi,

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

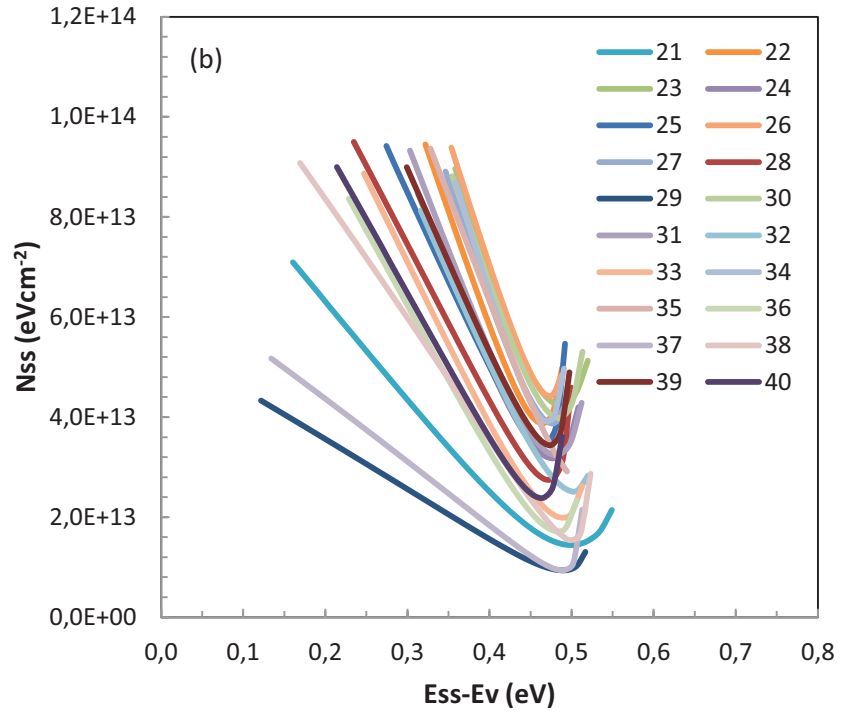
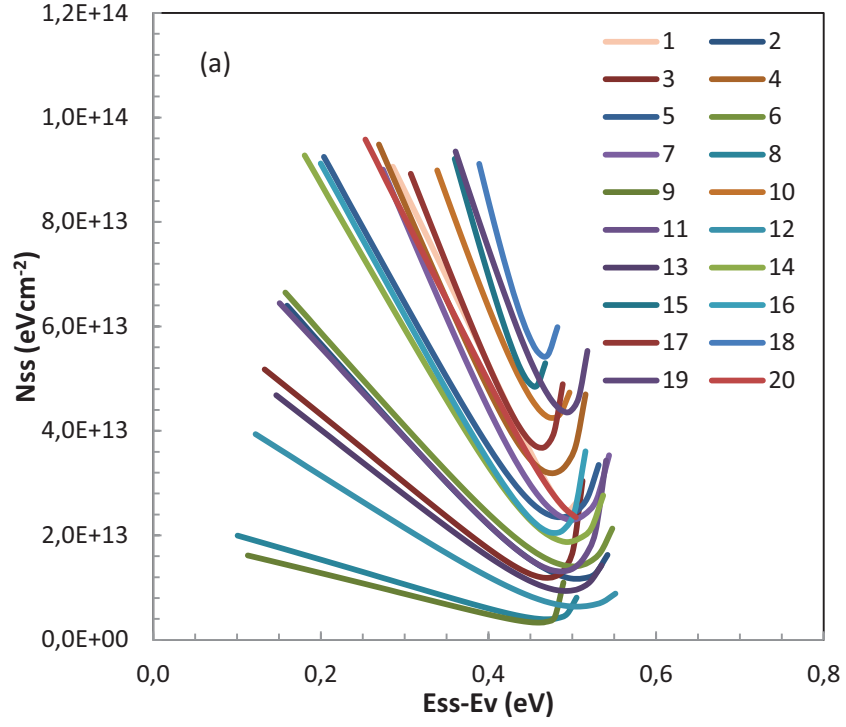
ile verilir. Burada Φ_e , etkin engel yüksekliği ve Γ , etkin engel yüksekliğinin gerilim katsayısıdır. Gerilime bağlı etkin engel yüksekliği,

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

olarak ifade edilir. P-tipi bir yarıiletken için değerlik bandının üst seviyesine göre arayüzey durumlarının enerjileri, (E_{ss}),

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

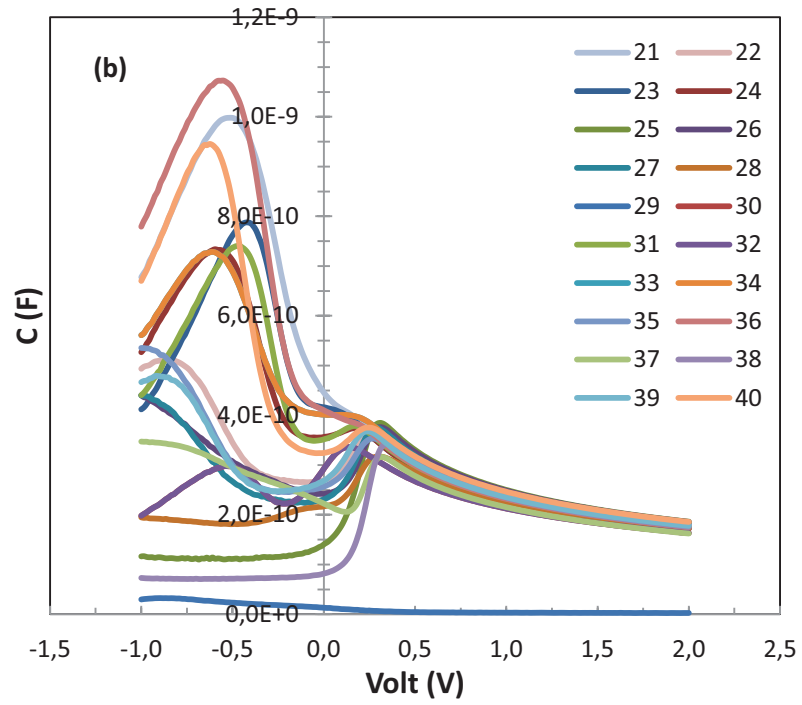
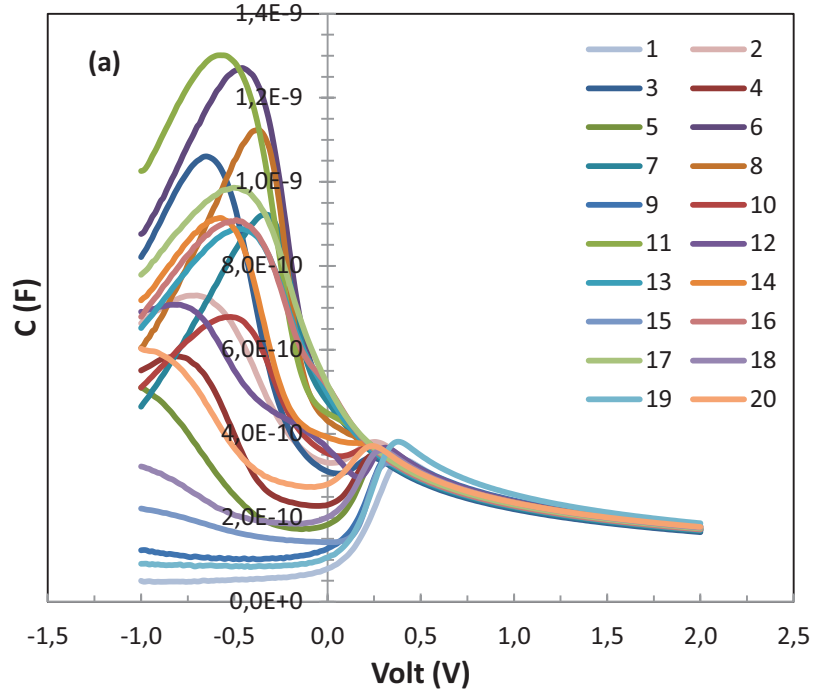
ile verilir. Şekil 4.7.a ve 4.7.b'de düz beslem I - V eğrileri kullanılarak elde edilmiş arayüzey durum yoğunluklarının enerjiye bağlı dağılımları verilmiştir. Şekil 4.7.a ve 4.7.b'den görüldüğü gibi arayüzey durumları yasak enerji bant aralığının ortasından başlamak suretiyle bir minimumdan geçtikten sonra değerlik bandının üst seviyesine doğru üstel olarak bir artış göstermektedir. Elde edilen yapılar için arayüzey durum yoğunluklarının ortalama değerleri 9.58×10^{13} ile $1.58 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ arasında olup, bu ortalama değerler $E_{ss} - 0.10$ ile $E_{ss} - 0.55 \text{ eV}$ enerji aralığında bulunmaktadır. Her bir diyot için hesaplanan ortalama arayüzey durumlarının değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.



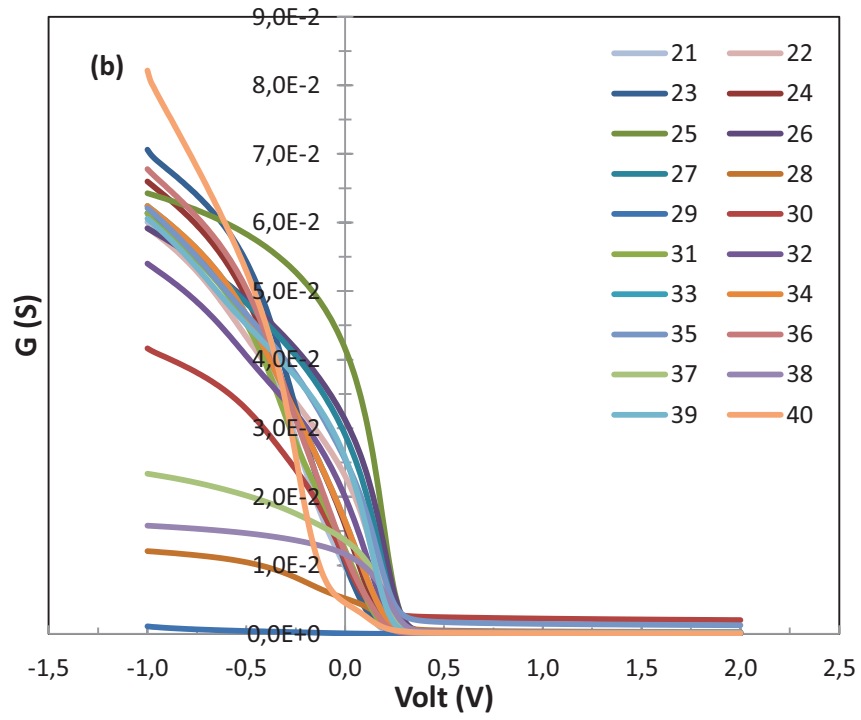
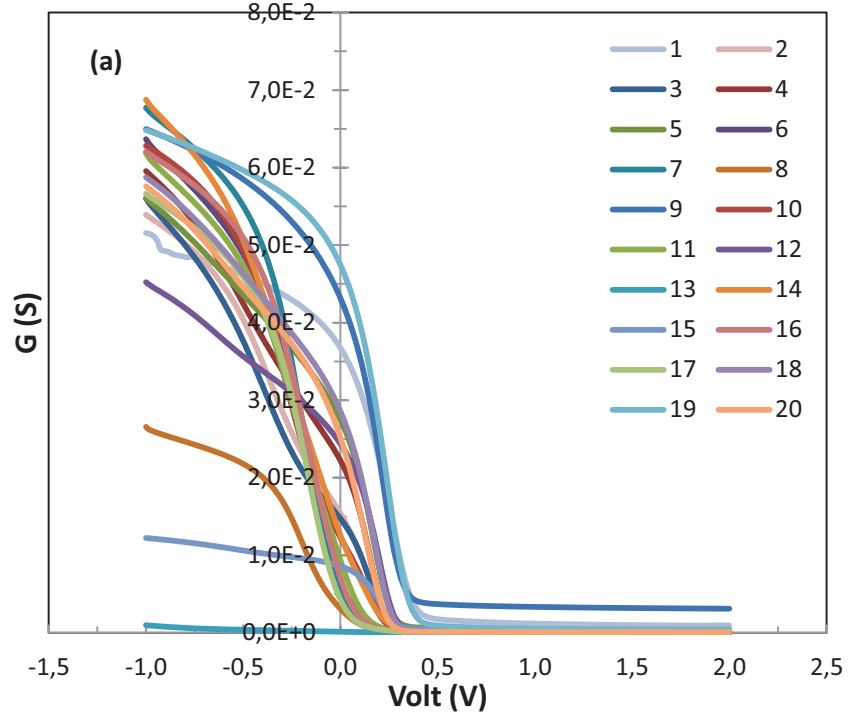
Şekil 4.7 Düz beslem $I-V$ eğrileri kullanılarak elde edilmiş arayüzey durum yoğunluklarının enerjiye bağlı dağılımları: a) 1'den 20 nolu numuneye kadar, (b) 21'den 40 nolu numuneye kadar.

4.3 Kapasite-Gerilim ($C-V$) ve İletkenlik-Gerilim ($G-V$) Karakteristikleri

Üretilen Al/p-Si(100) Schottky diyotlarının (40 adet) kapasite-gerilim ($C-V$) ve iletkenlik-gerilim ($G-V$) ölçümleri 1 MHz sabit frekansta ve -1 ile +2 volt aralığında alınmıştır. Küçük frekanslarda alınan ölçümler, uzun zaman sabitine sahip arayüzey durumlarının uygulanan ac sinyalinin takip etmesi ve engel kapasitesine katkıda bulunması sonucu hesaplanacak olan taşıyıcı yoğunluğu (katkı atomlarının yoğunluğu) gerçek değeri yansıtmayacağından dolayı ölçümler yüksek frekansta ($f \geq 500$ kHz) alınmıştır. Böylece arayüzey durumlarının diyot parametrelerine olası etkisi ihmal edilebilir [32]. Elde edilen $C-V$ ölçümleri sonucunda yapıların, taşıyıcı yoğunluğu (N_A), difüzyon potansiyeli (V_d), engel yüksekliği (Φ_B), Fermi enerji seviyesi (E_F), elektrik alan (E_m), tüketim tabakası genişliği (W_D), Schottky alçalması ($\Delta\Phi_B$) ve maksimum elektrik alan (E_m) gibi elektriksel parametreleri elde edilmiştir. $G-V$ ölçümleri yardımıyla ölçüm sonuçları seri direnç etkisi göz önüne alınarak düzeltilmiş ve tekrar çizilmiştir. Tüm $C-V$ ve $G-V$ ölçümleri karanlık ortamda ve oda sıcaklığında alınmıştır. Şekil 4.8.a ve 4.8.b'de yapıların $C-V$, şekil 4.9.a ve 4.9.b'de ise $G-V$ eğrileri görülmektedir.



Şekil 4.8 Al/p-Si(100) Schottky diyotlarının $C-V$ eğrileri: a) 1'den 20 nolu numuneye kadar, (b) 21'den 40 nolu numuneye kadar.

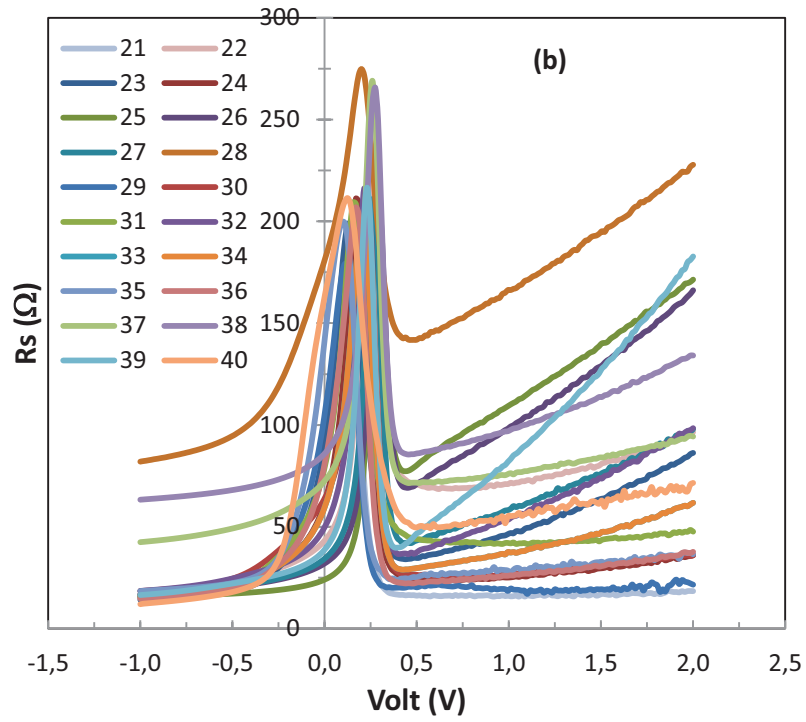
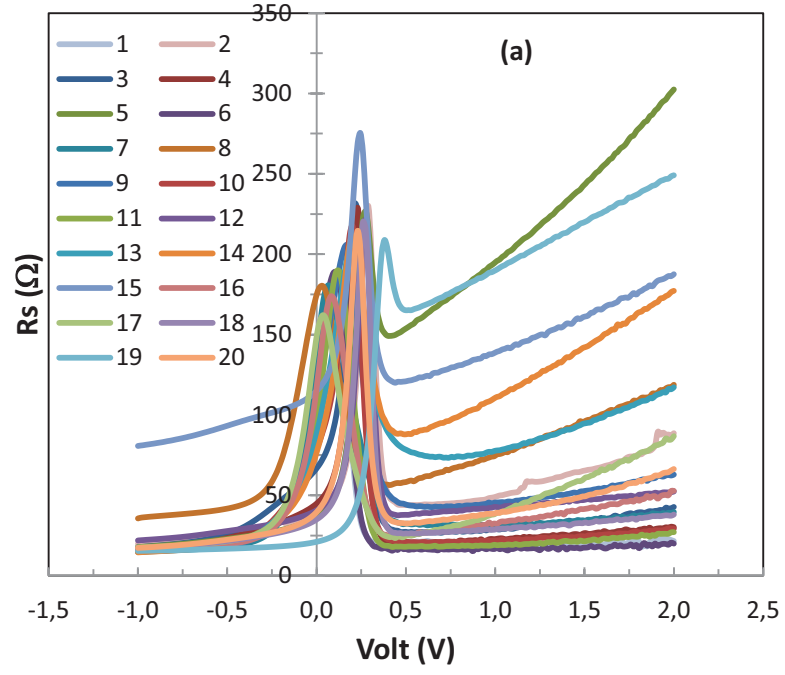


Şekil 4.9 Al/p-Si(100) Schottky diyotlarının G - V eğrileri: a) 1'den 20 nolu numuneye kadar, (b) 21'den 40 nolu numuneye kadar.

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi her bir diyot için kapasite eğrileri sıfır beslem yakınlarında pikler verirken Şekil 4.9’daki iletkenlik eğrilerinin artan ters besleme arttığı görülmektedir. Şekil 4.8’de görülen bu durum, bu pik bölgesinde arayüzey durumlarının lokalize olduğunu göstermektedir. Schottky yapılarının elektriksel karakteristiklerine olumsuz yönde etki edip onları ideallikten saptıran seri direnç önemli bir diyot parametresidir. Kapasite ve iletkenlik eğrileri üzerindeki seri direnç etkisini ortadan kaldırmak için yapıların seri direnç değerleri, admittans tekniği kullanılarak,

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

ifadesi yardımıyla hesaplanmıştır [32]. Burada $C_{m,acc}$ ve $G_{m,acc}$ biriktirme (akümülyasyon) bölgesindeki ölçülmüş kapasite ve iletkenlik değerleridir. Şekil 4.10.a ve 4.10.b’de yapıların seri direnç değerlerinin uygulanan gerilime bağlı eğrileri görülmektedir. Şekil 4.10’dan görüldüğü gibi her bir diyot için R_s değerleri arayüzey durumlarının yoğun olduğu sıfır beslem yakınlarında pikler vermektedir [33].



Şekil 4.10 Al/p-Si(100) Schottky diyotlarının uygulanan gerilime bağlı seri direnç eğrileri: a) 1'den 20 nolu numuneye kadar, (b) 21'den 40 nolu numuneye kadar.

Ölçüm sonuçlarından elde edilen kapasite ve iletkenlik eğrileri seri direnç etkisi dikkate alınarak,

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

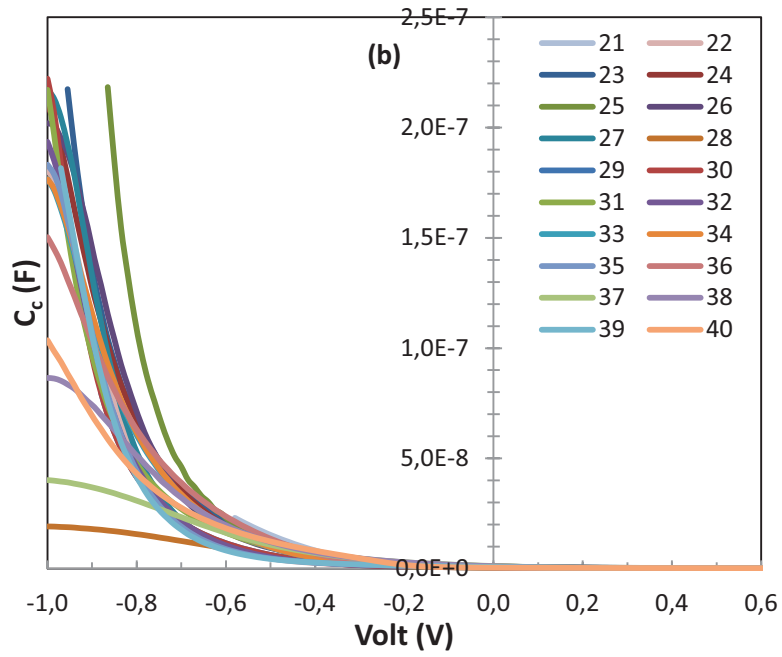
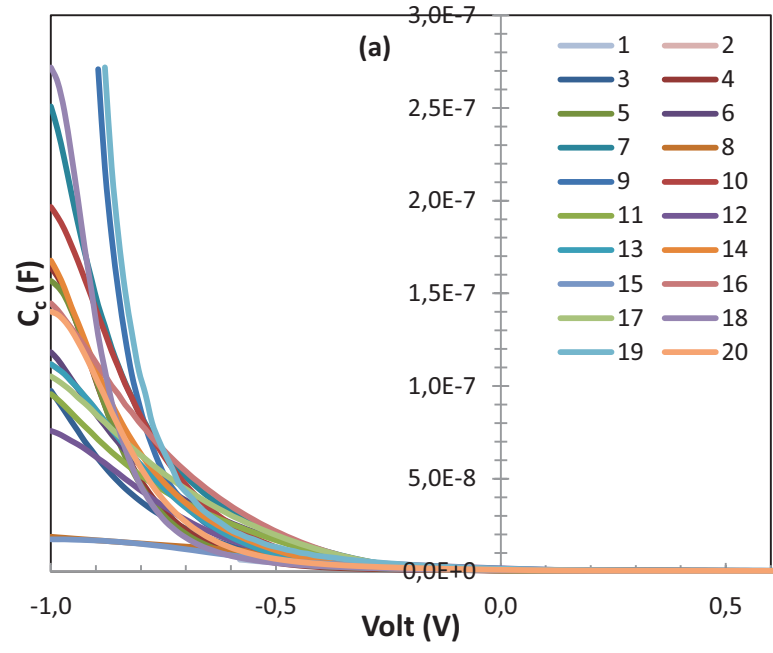
ve

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

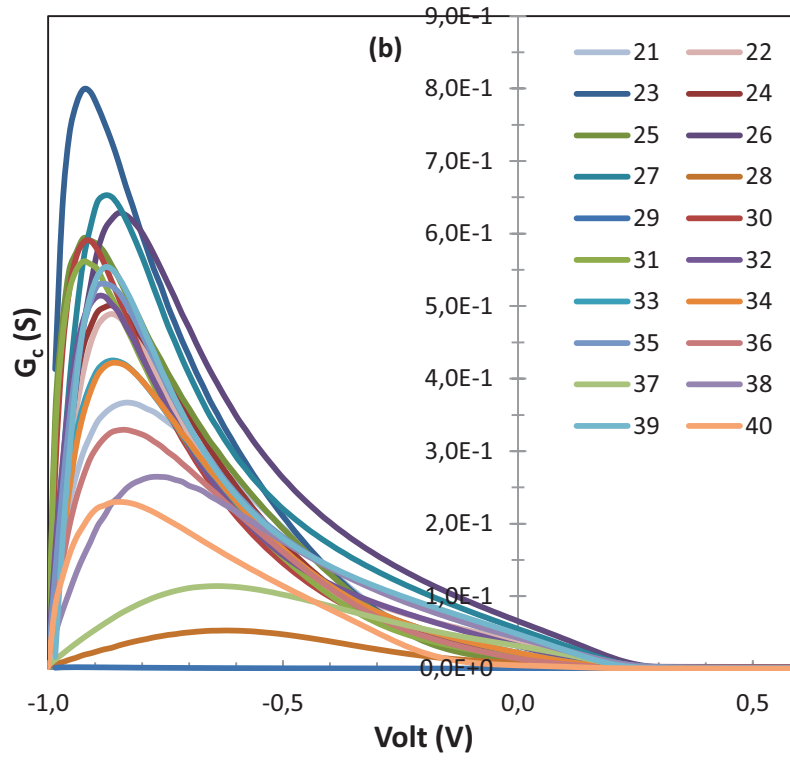
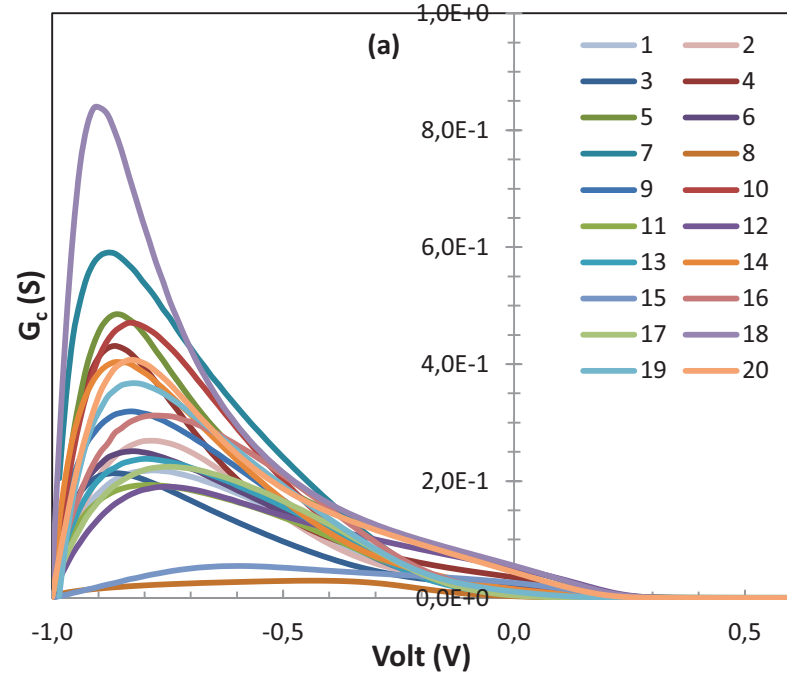
doğrultma ifadeleri yardımıyla yeniden çizildi. Burada a parametresi,

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

olup, C_m , ölçülen kapasite, G_m , ölçülen iletkenlik ve w , açısal frekanstır. Şekil 4.11.a ve 4.11.b ile Şekil 4.12.a ve 4.12.b'de seri direnç etkisi dikkate alınarak düzeltilmiş kapasite-gerilim ile iletkenlik-gerilim eğrileri verilmektedir.

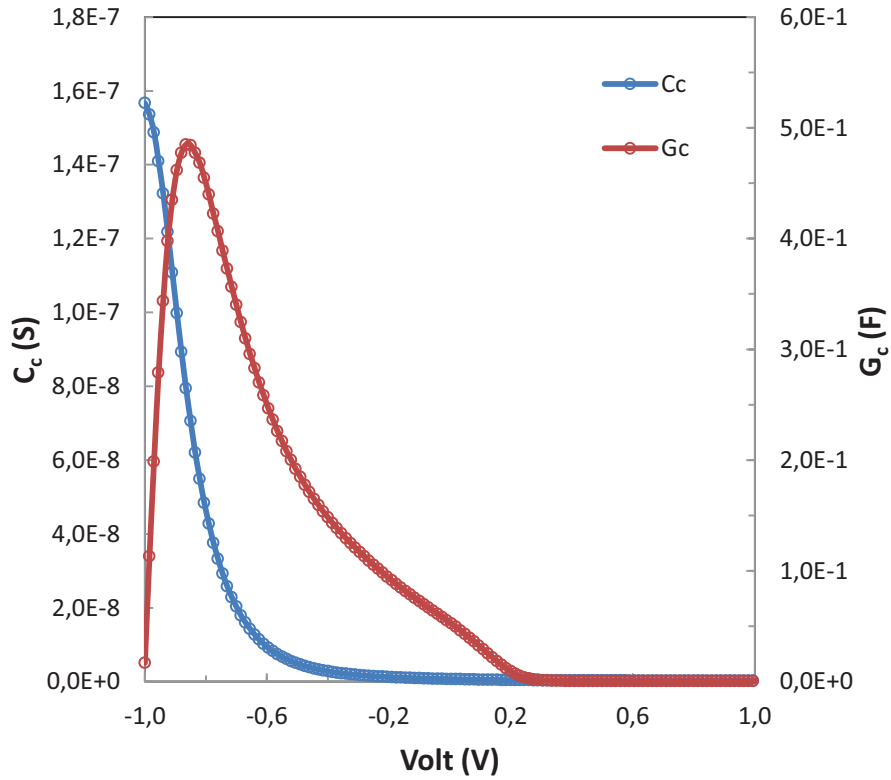


Şekil 4.11 Seri direnç etkisi dikkate alınarak düzeltilmiş kapasite-gerilim (C_c-V) eğrileri: a) 1'den 20 nolu numuneye kadar, (b) 21'den 40 nolu numuneye kadar.



Şekil 4.12 Seri direnç etkisi dikkate alınarak düzeltilmiş iletkenlik-gerilim (G_c - V) eğrileri: a) 1'den 20 nolu numuneye kadar, (b) 21'den 40 nolu numuneye kadar.

Şekil 4.12.a ve 4.12.b'den açıkça görüldüğü gibi, düzeltilmiş iletkenlik eğrilerinin her birinde pikler meydana gelmiştir. Bu pikler yapıların tüketme bölgesinde meydana gelmiştir. Şekil 4.13'te 5 nolu numune için bu durum gösterilmiştir. Şekil 4.12'deki piklerin voltaj eksenini boyunca göstermiş olduğu kaymalar ve yükseklikleri bize arayüzey durumlarının silisyum yarıiletkeninin yasak enerji bant aralığı boyunca dağılmış olduğu bilgisini vermektedir.



Şekil 4.13 5 nolu diyodun uygulanan gerilime karşı düzeltilmiş kapasite ve iletkenlik eğrisi.

Metal/yarıiletken yapılarda arayüzey tabakasındaki tuzaklanmış dipoller veya yarıiletken tarafında gövdede bulunan görüntü yükleri arayüzey durumlarını meydana getirerek $C-V$ karakteristiklerine etki edebilir [34]. Arayüzey tabakasının kalınlığı, tünelleme engelini ve idealite faktörünü minimize ederken engel yüksekliğini maksimum yapacak bir kalınlık olmalıdır [35,36]. Bunun için optimal

arayüzey tabakası kalınlığı 20 Å'dan daha az olmalıdır [37]. Yapıların arayüzey tabakası kalınlığı ortalama olarak 7.5 Å mertebesinde elde edilmiştir.

Oksit kapasitesi, biriktirme bölgesindeki $C-V$ ve $G-V$ ölçümlerinden (Şekil 4.9 ve 4.10),

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

ifadesi yardımıyla hesaplanmıştır. Arayüzey tabakasının kalınlığı yüksek frekans (1MHz) $C-V$ ölçümlerinden güçlü biriktirme bölgesi için (2.66) ifadesi yardımıyla hesaplanmıştır. Burada $\epsilon_{ox} = 3.8\epsilon_0$ [8] arayüzey tabakasının dielektrik geçirgenliğidir. 5 nolu numune için arayüzey tabakası kalınlığı 4.5 Å bulunmuştur. Bu durumda arayüzey durumlarının metal ile dengede olduğu görülmektedir.

Şekil 4.12'de görülen pik değerlerinden yapıların herbiri için arayüzey durum yoğunlukları (D_{it}) hesaplanabilir. $C-V$ ölçümlerinden tek frekans yaklaşımı kullanılarak arayüzey durumlarını tayin etmek mümkündür. Bu, hızlı ve güvenilir olan arayüzey durumları tayin etmede kullanılan Hill-Coleman metodudur [38]. Bu metotta,

$$D_{it} = \left(\frac{2}{qA} \right) \left[\frac{\frac{G_{m,max}}{w}}{\left(\frac{G_{m,max}}{wC_{ox}} \right)^2 + \left(1 - \frac{C_{m,max}}{C_{ox}} \right)^2} \right] \quad (4.13)$$

ifadesi kullanılır. Burada A , diyot alanı, w , açısal frekans, q , elektrik yükü, C_{ox} biriktirme bölgesindeki oksit tabakası kapasitesi (geometrik kapasite), $G_{m,max}$ ve $C_{m,max}$ $G-V$ ve $C-V$ ölçümlerindeki maksimum iletkenlik ve kapasite değerleridir. Bu metot kullanılarak elde edilmiş arayüzey durum yoğunluğu değerleri Çizelge 4.4'de her bir diyot için verilmiştir.

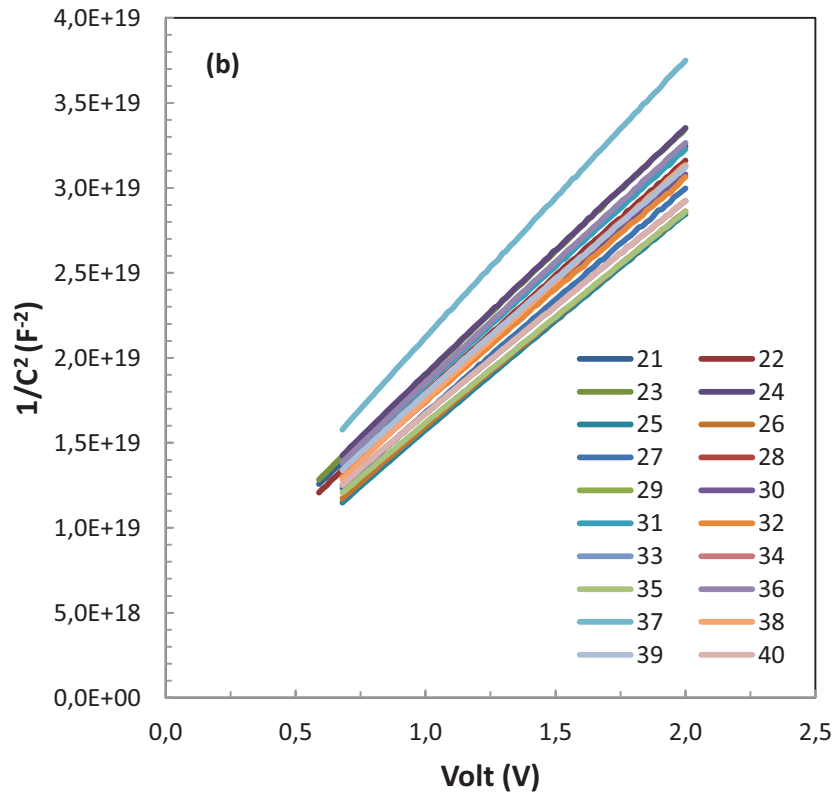
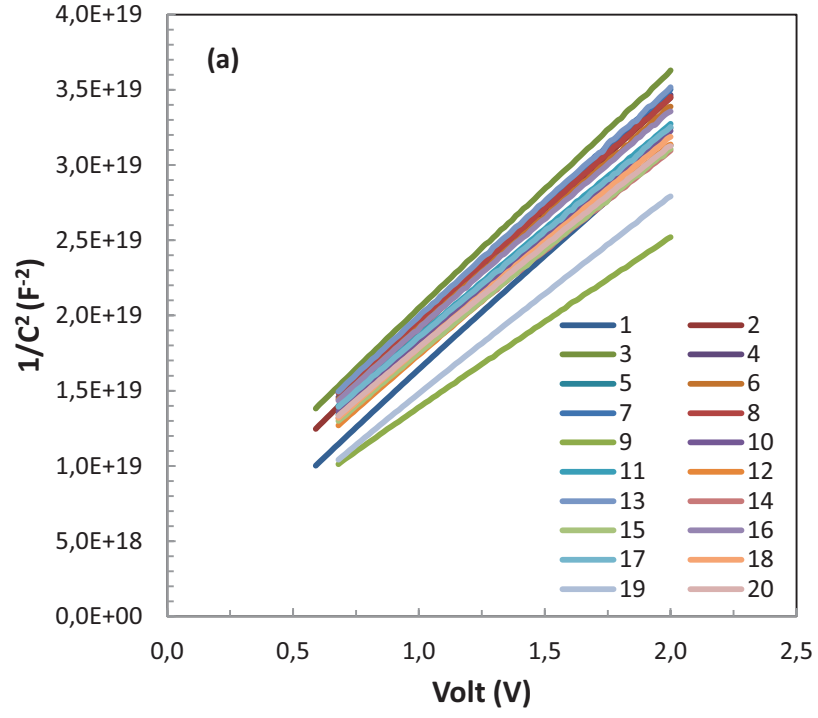
Şekil 4.14.a ve 4.14.b’de yapıların seri direnç etkisi çıkarılmış I/C^2 - V eğrileri görülmektedir. Şekil 4.14’e bakıldığında tüm eğrilerin geniş bir voltaj aralığında lineer olduğu görülmektedir. Arayüzey durumları yokken V_o ile difüzyon potansiyeli (V_d) arasındaki bağıntı,

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

şeklindedir. Burada, E_g yasak enerji bant aralığı, Φ_m metalin 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 [39]. Burada $\alpha = qN_{ss}\delta/\varepsilon_i$ ’dır. Eğrilerin voltaj eksenine ekstrapole edilmesiyle kesme gerilimleri (V_o) elde edilerek yapıların difüzyon potansiyelleri hesaplandı.



Şekil 4.14 Al/p-Si(100) Schottky diyotlarının $1/C^2-V$ eğrileri: a) 1'den 20 nolu numuneye kadar, (b) 21'den 40 nolu numuneye kadar.

Arayüzey durumlarının etkileri dikkate alındığında $1/C^2$ - V doğrularının eğimi,

$$\frac{d \ 1/C^2}{dV} = \frac{2}{q\epsilon_s A^2 N_A} \frac{1}{(1+\alpha)} \quad (4.16)$$

şeklinde ifade edilir. $1/(1+\alpha) = C_2$ olarak tanımlandığında C_2 denklem (4.16) yardımıyla,

$$C_2 = \frac{2}{q\epsilon_s N_{AT} \left(\frac{d \ 1/C^2}{dV} \right)} \cong \frac{N_{AD}}{N_{AT}} = \frac{\epsilon_i}{\epsilon_i + qN_{ss}\delta} \quad (4.17)$$

şeklinde ifade edilir. Burada N_{AT} , p-tipi yarıiletken için teorik taşıyıcı yoğunluğu olup, silisyum için verilen $5 \ \Omega\text{-cm}$ 'lik öz direnç ve mobilite $\mu_p = 450 \text{ cm}^2/V\text{-sn}$ değerleri [8] kullanılarak $\rho = 1/q\mu_p N_{AT}$ ifadesinden $2.778 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulunmuştur. Bu değer, şekil 4.14'deki $1/C^2$ - V eğrilerinin eğimlerinden hesaplanan taşıyıcı yoğunlukları (N_{AD}) ile aynı mertebededir. Yapıların tüketme tabakası genişliği,

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_o V_d}{qN_A}} \quad (4.18)$$

ifadesinden hesaplanmıştır. Fermi seviyesi,

$$\Phi_F = \frac{kT}{q} \text{Ln} \left(\frac{N_V}{N_A} \right) \quad (4.19)$$

bağıntısından hesaplanmıştır. Burada N_V , değerlik bandındaki etkin durumların yoğunluğu olup sıcaklığa,

$$N_V = 4.82 \times 10^{15} T^{3/2} \left(\frac{m^*}{m_o} \right)^{3/2} \quad (4.20)$$

ifadesiyle bağlıdır. Burada m^* deşiklerin etkin kütlesi olup değeri $m^*=0.55m_o$ 'dır [40]. Oda sıcaklığındaki ölçümler için değerlik bandındaki etkin durumların yoğunluğu $1.04 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ olarak bulunmuştur. Yapılarda oluşan maksimum elektrik alanı (E_m) ve Schottky engel alçalması ($\Delta\Phi_B$) sırasıyla,

$$E_m = \sqrt{\frac{2qN_A V_d}{\epsilon_s \epsilon_o}} \quad (4.21)$$

ve

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

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 (4.23) ifadesi,

$$\Phi_B = q(C_2 V_o + \Phi_F) \quad (4.24)$$

şeklinde ifade edilir [29].

Yapıların oda sıcaklığındaki ve karanlık ortamdaki I/C^2-V eğrileri kullanılarak elde edilen engel yüksekliği (Φ_B), difüzyon potansiyeli (V_d), taşıyıcı yoğunluğu (N_A), maksimum elektrik alan (E_m), tüketim tabakası genişliği (W_D) ve yüzey durumları (D_{it}) gibi elektriksel parametreleri çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.4 Al/p-Si(100) Schottky diyotlarının I/C^2-V eğrilerinden elde edilen Φ_B , V_d , N_A , E_m , W_D ve D_{it} parametreleri.

Diyot	Φ_B (eV)	V_d	N_A ($\times 10^{15} \text{cm}^{-3}$)	E_m ($\times 10^4 \text{V/cm}$)	W_D (Å)	D_{it} ($\times 10^{12} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$)
1	0.553	0.345	2.05	1.42	4515.7	0.45
2	0.625	0.418	2.05	1.57	5002.8	4.71
3	0.668	0.460	1.99	1.63	5337.4	4.43
4	0.507	0.294	1.70	1.18	4537.7	5.57
5	0.485	0.274	1.81	1.17	4236.5	5.23
6	0.530	0.318	1.77	1.26	4646.3	5.97
7	0.537	0.327	1.71	1.25	4773.3	6.31
8	0.554	0.342	1.76	1.30	4845.8	2.62
9	0.443	0.238	2.30	1.22	3473.5	6.05
10	0.517	0.306	1.84	1.26	4454.5	5.86
11	0.535	0.324	1.83	1.29	4614.0	5.83
12	0.446	0.235	1.83	1.08	3861.0	4.25
13	0.748	0.542	2.15	1.84	5601.3	0.13
14	0.536	0.327	1.94	1.34	4504.6	6.43
15	0.508	0.299	1.91	1.26	4318.1	1.15
16	0.545	0.334	1.79	1.30	4736.6	5.81
17	0.551	0.341	1.86	1.34	4704.9	5.31
18	0.493	0.282	1.84	1.20	4260.0	5.48
19	0.345	0.136	1.97	0.82	2707.2	6.03
20	0.543	0.334	1.93	1.35	4570.5	5.39
21	0.550	0.339	1.86	1.34	4694.3	5.62
22	0.533	0.324	1.90	1.32	4526.7	5.53
23	0.534	0.322	1.79	1.28	4646.3	6.58
24	0.538	0.327	1.79	1.29	4683.7	6.16
25	0.453	0.245	2.03	1.17	3756.2	5.99
26	0.477	0.269	2.05	1.23	3937.7	5.51
27	0.488	0.279	1.97	1.24	4099.0	5.72
28	0.558	0.349	1.94	1.39	4662.3	1.14
29	0.733	0.524	1.96	1.73	5764.5	0.11
30	0.589	0.381	2.00	1.47	4814.9	3.88
31	0.548	0.338	1.87	1.34	4667.7	5.73
32	0.541	0.333	1.97	1.36	4510.1	5.04
33	0.548	0.340	2.06	1.41	4460.1	5.83
34	0.632	0.429	2.42	1.73	4660.7	5.82
35	0.521	0.314	2.10	1.36	4236.5	5.80
36	0.536	0.325	1.84	1.30	4603.1	6.34
37	0.525	0.311	1.59	1.18	4840.7	2.20
38	0.479	0.269	1.87	1.18	4123.2	1.47
39	0.556	0.347	1.94	1.38	4646.3	5.65
40	0.547	0.333	1.64	1.24	4952.7	7.78

4.4 Engel Yüksekliği Homojensizliği

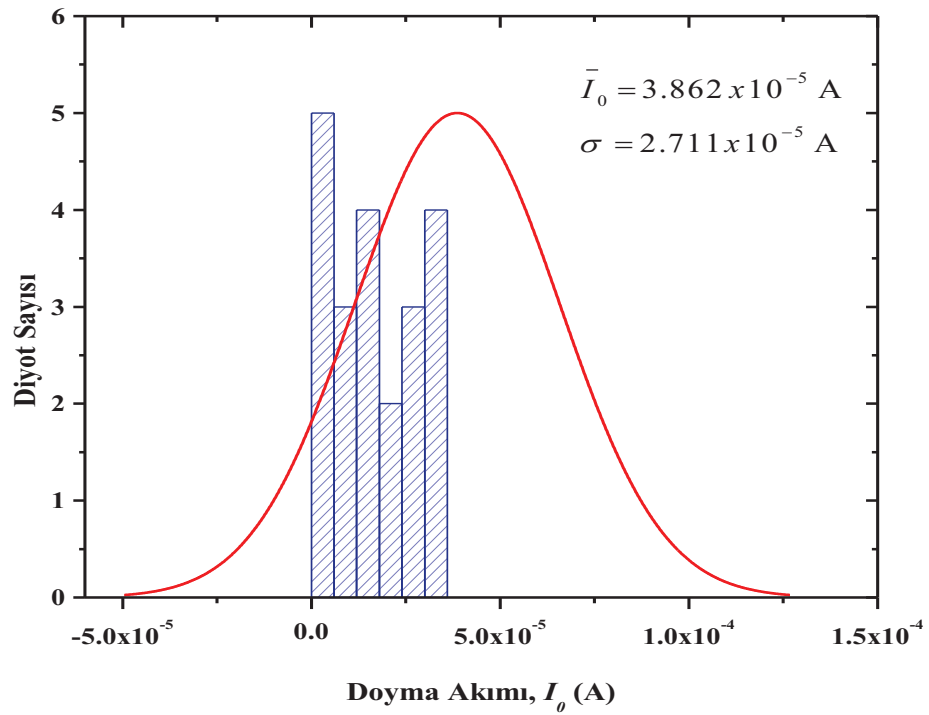
Çizelge 4.1 ve 4.4'ten görüldüğü gibi deneysel sonuçlar bize elde edilen diyot parametre değerlerinin, diyotların aynı şartlar altında ve tek bir silisyum kristali üzerinde oluşturulmalarına rağmen aynı olmadığını göstermiştir. Özellikle $I-V$ ve $C-V$ 'den elde edilen engel yükseklikleri farklı çıkmıştır. Bu durumun farklı sebepleri vardır. Aslında $I-V$ ve $C-V$ ölçüm tekniklerinin kendine has özelliklerinden dolayı hesaplanan engel yükseklikleri daima farklı olacaktır [41].

4.4.1 Akım-Gerilim ($I-V$) Parametrelerinin Gauss Metoduyla Analizi

$I-V$ tekniği ile hesaplama yapıldığında elde edilen engel yükseklik değerleri, akımın engel yüksekliğine üstel olarak bağlı olmasından dolayı herhangi bir sebep sonucu ortaya çıkabilecek engel düşmelerini de içine alır. Yani, bir nevi ortalama engel yüksekliği bulunmuş olur. $C-V$ 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 $I/C-V^2$ grafiği bant bükülmelerine sebep olan engel alçalması etkilerini içine almaz [42]. Diğer taraftan Schottky kontakların temel fiziksel özellikleri genellikle homojen bir engelin var olduğu kabul edilerek açıklanırken son zamanlarda kontakların homojen olmadığı düşünülmüş ve çalışmalar bu tarz kontaklar üzerinde yoğunlaşmıştır [43]. Bu çalışmalar akım iletiminde beklenmeyen birçok davranışın Schottky diyotların sabit olmayan engel yükseklikleri ile ilişkili olabileceğini göstermiştir. Yani metal ile yarıiletken arasındaki arayüzeyde sürekli bir engel dağılımı vardır. Böyle durumlarda ortalama değerler alınarak engel yüksekliklerinin deneysel dağılımları bir Gaussian fonksiyonu ile fit edilir [44]. 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, $P(\Phi_B)$,

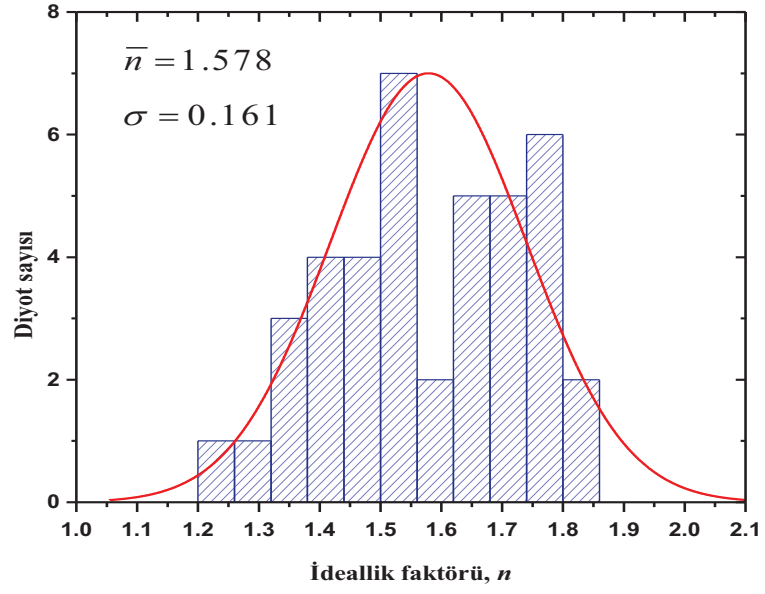
$$P(\Phi_B) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} e^{-(\bar{\Phi}_B - \Phi_B)^2 / 2\sigma_s^2} \quad (4.25)$$

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 4.15.a, 4.15.b ve 4.15.c'de 40 adet Schottky diyot için $I-V$ ölçümlerinden elde edilen doyma akımı (I_o), idealite faktörü (n) ve engel yüksekliğinin (Φ_B) istatistiksel dağılımları görülmektedir. Burada doyma akımının ortalama değeri 3.862×10^{-5} A, idealite faktörünün ortalama değeri 1.578 ve engel yüksekliğinin ortalama değeri 0.559 eV olarak elde edilmiştir.

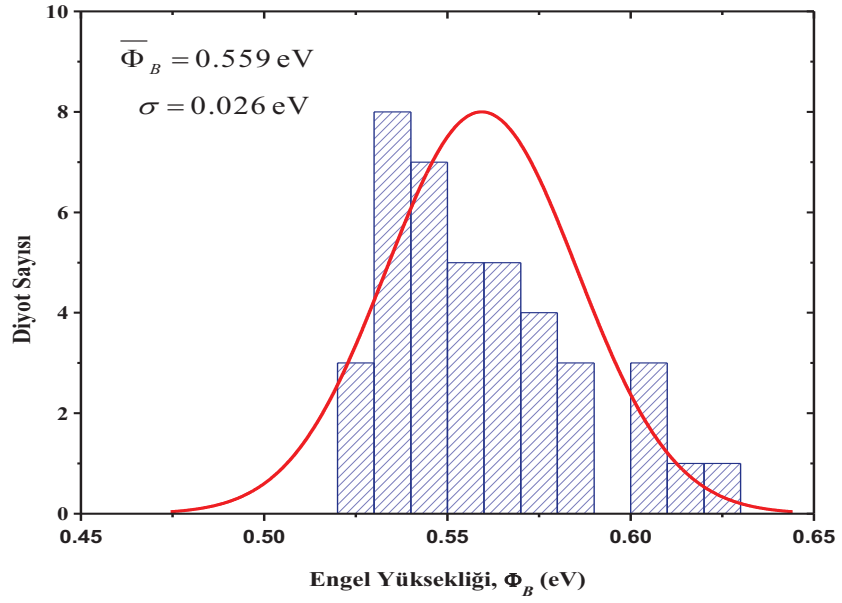


(a)

Şekil 4.15.a 40 adet Schottky diyot için $I-V$ ölçümlerinden elde edilen I_o için Gaussian dağılımı.



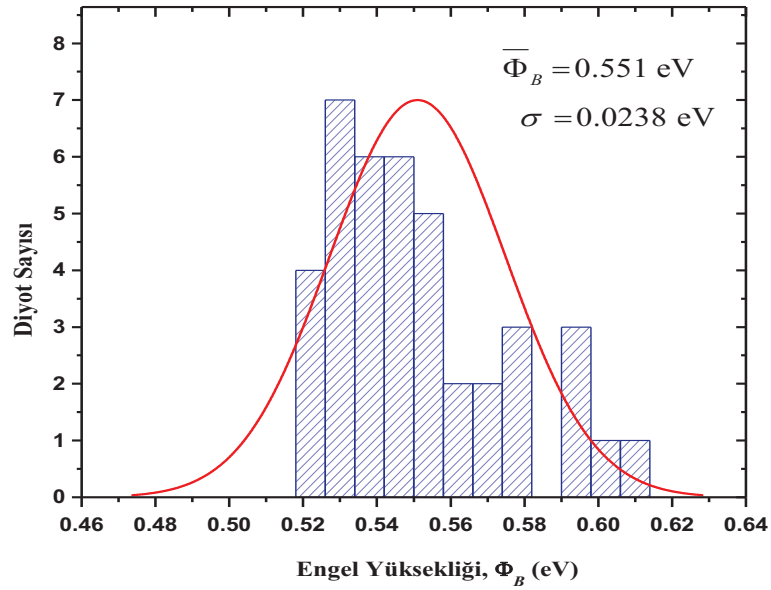
(b)



(c)

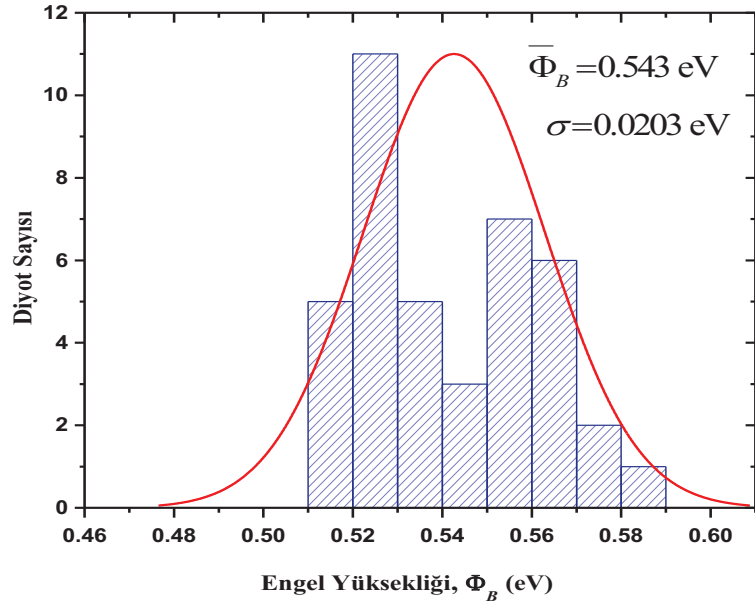
Şekil 4.15 40 adet Schottky diyot için I - V ölçümlerinden elde edilen parametrelerin istatistiksel dağılımları: b) n için Gaussian dağılımı ve c) Φ_B için Gaussian dağılımı.

Şekil 4.16.a, 4.16.b ve 4.16.c’de 40 adet Schottky diyot için Norde ve Cheung ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliklerinin (Φ_B) ve idealite faktörlerinin (n) istatistiksel dağılımları görülmektedir. Burada Norde yönteminden elde edilen engel yüksekliğinin ortalama değeri $0.551 eV$, Cheung yönteminden elde edilen engel yüksekliğinin ve idealite faktörünün ortalama değerleri ise sırasıyla $0.543 eV$ ve 1.554 ’dir.

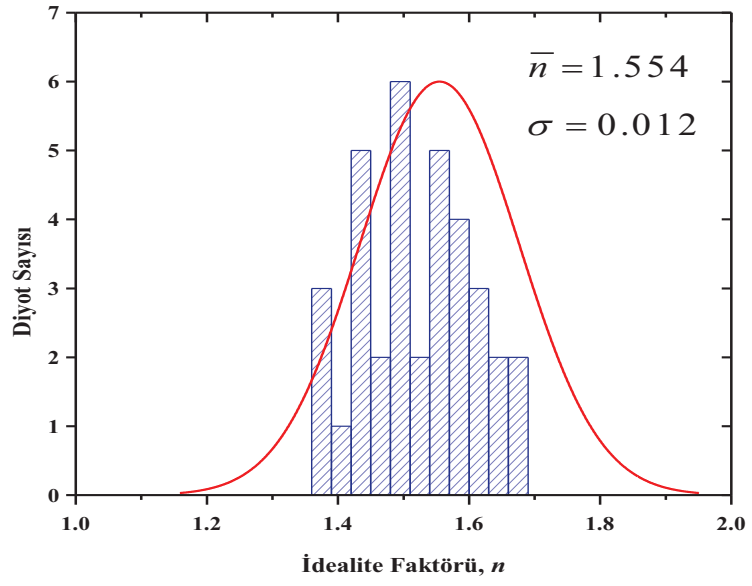


(a)

Şekil 4.16.a 40 adet Schottky diyot için elde edilen engel yüksekliklerinin (Φ_B) Norde yönteminden elde edilen Gaussian dağılımı.



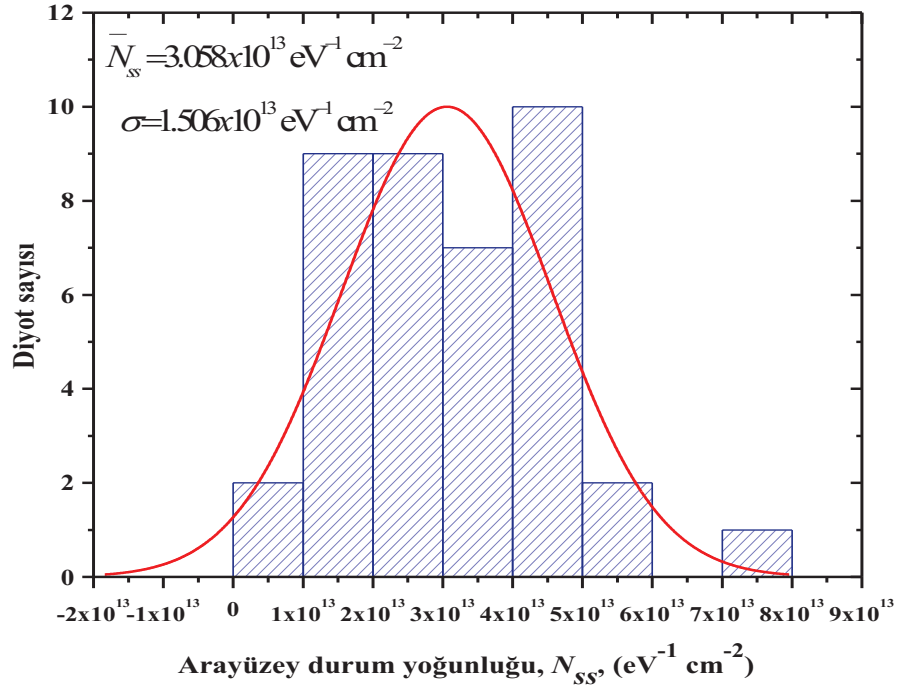
(b)



(c)

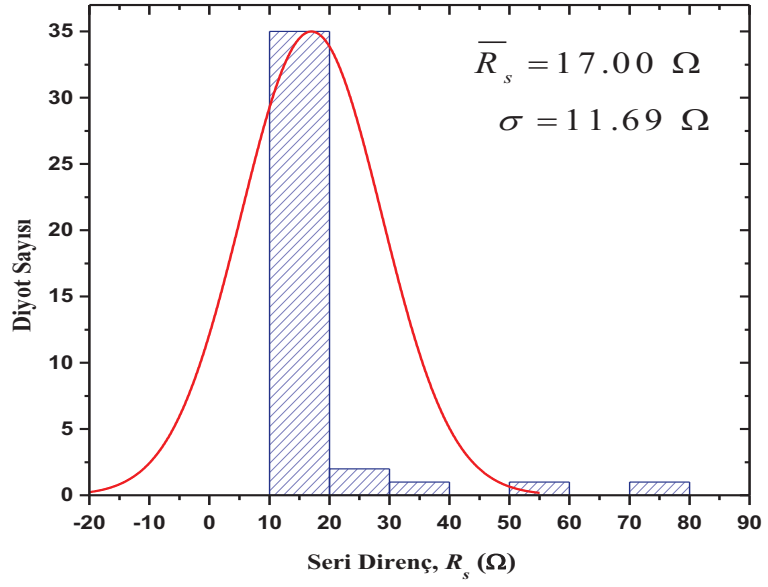
Şekil 4.16 40 adet Schottky diyot için elde edilen engel yüksekliklerinin (Φ_B) ve idealite faktörlerinin (n) Cheung yönteminden elde edilen Gaussian dağılımı (b ve c).

Şekil 4.17’de 40 adet Schottky diyot için I - V ölçümleri yardımıyla elde edilmiş arayüzey durum yoğunluklarının istatistiksel dağılımları görülmektedir. Bu dağılımdan elde edilen ortalama arayüzey durum yoğunluğu $3.058 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, dir.

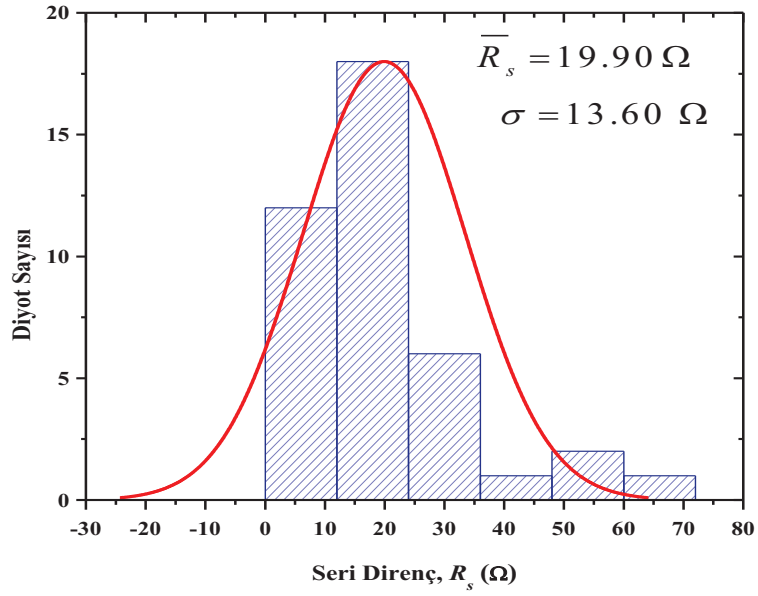


Şekil 4.17 40 adet Schottky diyot için I - V ölçümleri yardımıyla elde edilmiş arayüzey durum yoğunluklarının istatistiksel dağılımı.

Şekil 4.18.a, 4.18.b ve 4.18.c’de 40 adet Schottky diyot için Norde ve Cheung yöntemleri kullanılarak elde edilmiş seri direnç değerlerinin istatistiksel dağılımları görülmektedir. Bu dağılımdan elde edilen ortalama seri direnç değerleri Norde yöntemi için $17.0 \ \Omega$, Cheung yönteminde kullanılan $dV/d\ln(I)-I$ fonksiyonu için $19.9 \ \Omega$ ve $H(I)-I$ fonksiyonu için ise $18.08 \ \Omega$ ’dir.

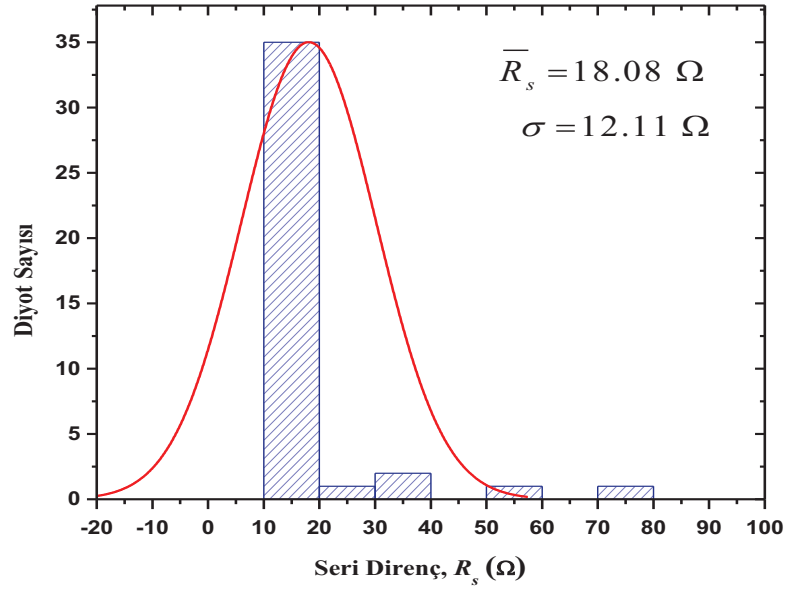


(a)



(b)

Şekil 4.18 40 adet Schottky diyot için Norde ve Cheung yöntemleri kullanılarak elde edilmiş seri direnç değerlerinin istatistiksel dağılımları: a) Norde yöntemi için Gaussian dağılımı, b) $dV/d\ln(I) - I$ fonksiyonu için Gaussian dağılımı.

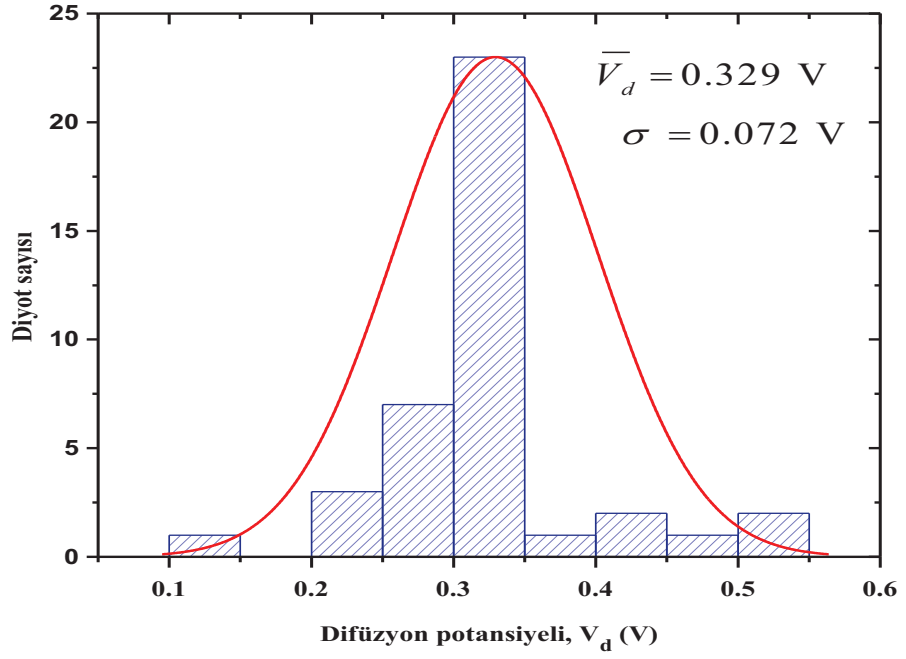


(c)

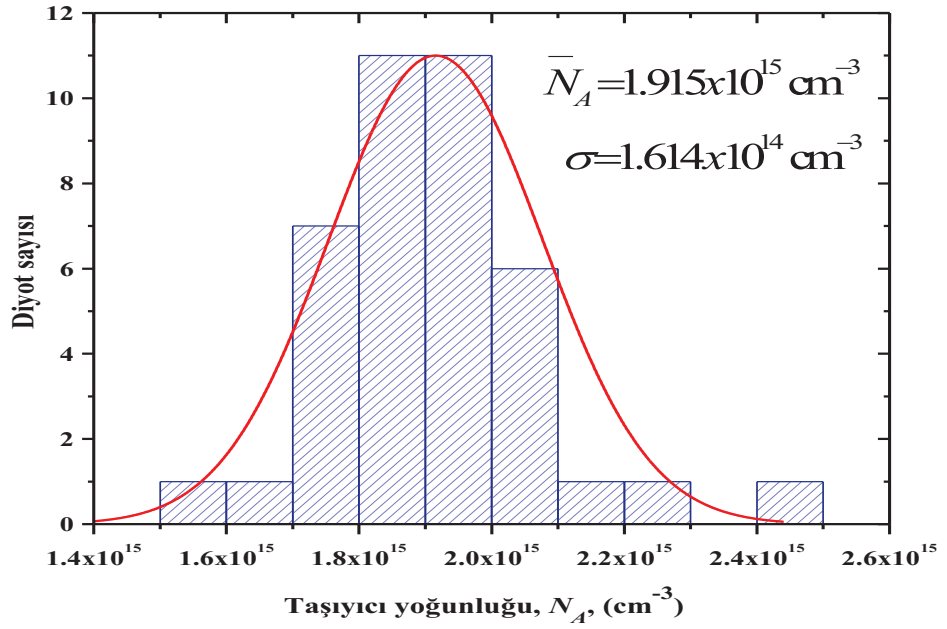
Şekil 4.18.c 40 adet Schottky diyot için Norde ve Cheung yöntemleri kullanılarak elde edilmiş seri direnç değerlerinin $H(I)-I$ fonksiyonu için Gaussian dağılımı.

4.4.2 Kapasite-Gerilim ve İletkenlik-Gerilim ($C-V$ ve $G-V$) Parametrelerinin Gauss Metoduyla Analizi

Şekil 4.14.a ve 4.14.b'den (I/C^2-V) 40 adet Schottky diyot için elde edilen difüzyon potansiyelinin (V_d) deneysel değerleri Gaussian fonksiyonuna fit edilmiştir. Şekil 4.19'da V_d 'nin Gaussian dağılımı görülmektedir. Bu parametrenin istatistik analizlerinden ortalama difüzyon potansiyeli $\bar{V}_d = 0.329 eV$ ve standart sapması $\sigma = 0.072 eV$ olarak bulunmuştur. Çizelge 4.4'te 40 adet Schottky diyot için verilmiş akseptör taşıyıcı yoğunluğu (N_A) deneysel değerleri Gaussian fonksiyonuna fit edilmiştir. Şekil 4.20'de N_A 'nın Gaussian dağılımı görülmektedir. Bu parametrenin istatistik analizlerinden ortalama akseptör taşıyıcı yoğunluğu $\bar{N}_A = 1.915 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ve standart sapması $\sigma = 1.614 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulunmuştur.

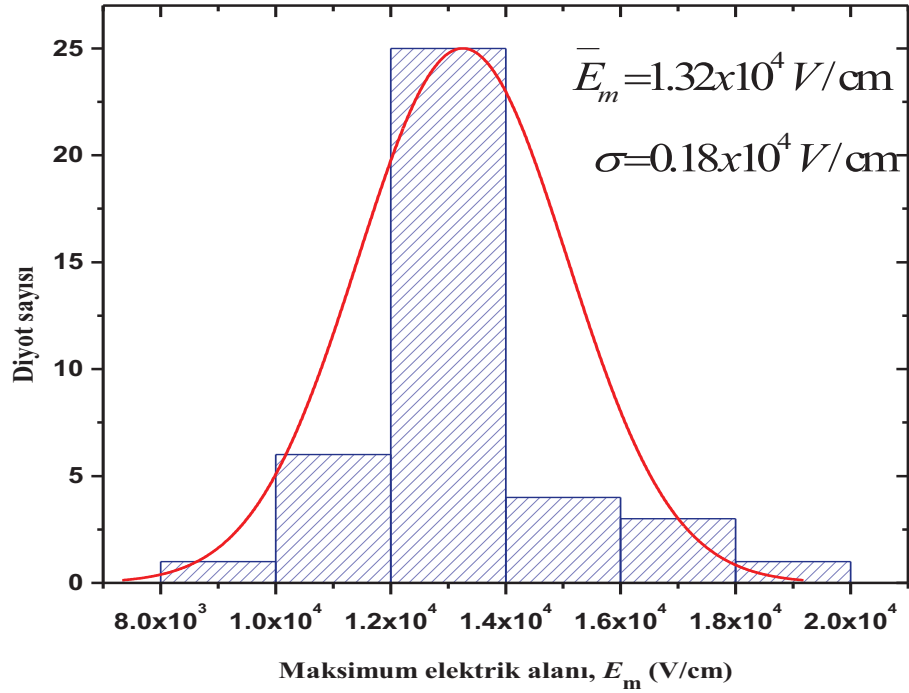


Şekil 4.19 40 adet Schottky diyot için $1/C^2 - V$ eğrileri kullanılarak elde edilmiş difüzyon potansiyeli (V_d) değerlerinin istatistiksel dağılım grafiği.



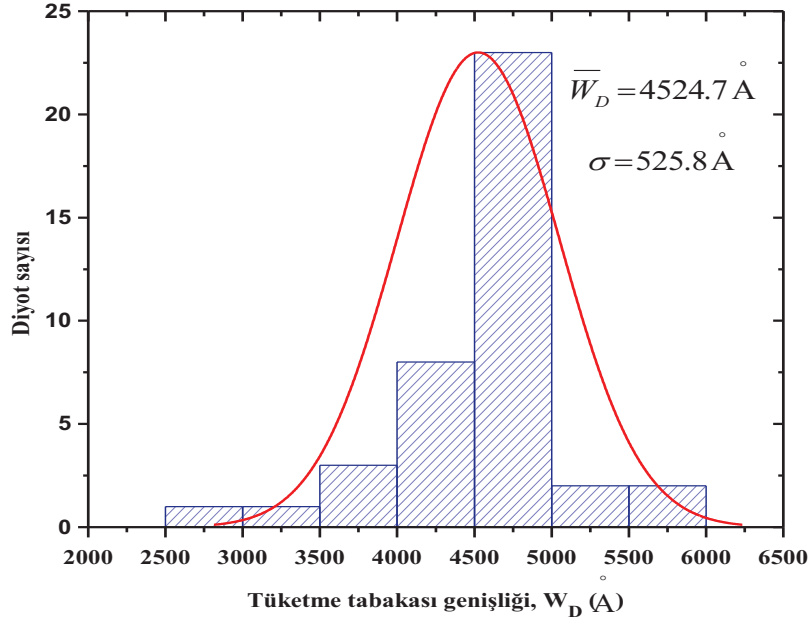
Şekil 4.20 40 adet Schottky diyot için elde edilmiş akseptör taşıyıcı yoğunluğu (N_A) değerlerinin istatistiksel dağılım grafiği.

40 adet Schottky diyot için maksimum elektrik alan (E_m) değerleri denklem (4.21) yardımıyla hesaplanmış ve Gaussian fonksiyonuna fit edilmiştir. Şekil 4.21’de E_m ’nin Gaussian dağılımı görülmektedir. Bu parametrenin istatistik analizlerinden ortalama maksimum elektrik alan $\bar{E}_m = 1.32 \times 10^4$ V/cm ve standart sapması $\sigma = 0.18 \times 10^4$ V/cm olarak bulunmuştur.



Şekil 4.21 40 adet Schottky diyot için elde edilmiş maksimum elektrik alan (E_m) değerlerinin istatistiksel dağılım grafiği.

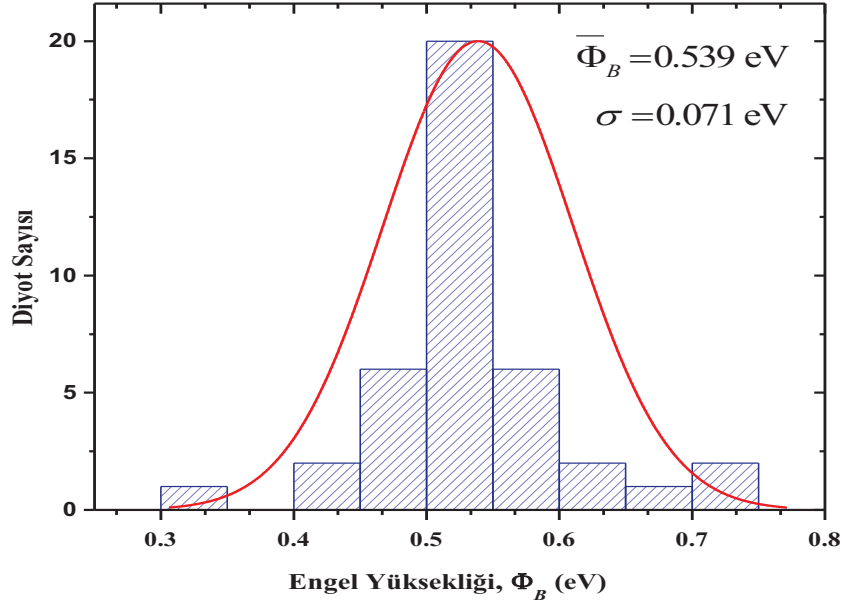
40 adet Schottky diyot için tüketme tabakası genişliği (W_D) değerleri denklem (4.18) yardımıyla hesaplanmış ve Gaussian fonksiyonuna fit edilmiştir. Şekil 4.22’de W_D ’nin Gaussian dağılımı görülmektedir. Bu parametrenin istatistik analizlerinden ortalama tüketme tabakası genişliği $\bar{W}_D = 4524.7$ Å ve standart sapması $\sigma = 525.8$ Å olarak bulunmuştur.



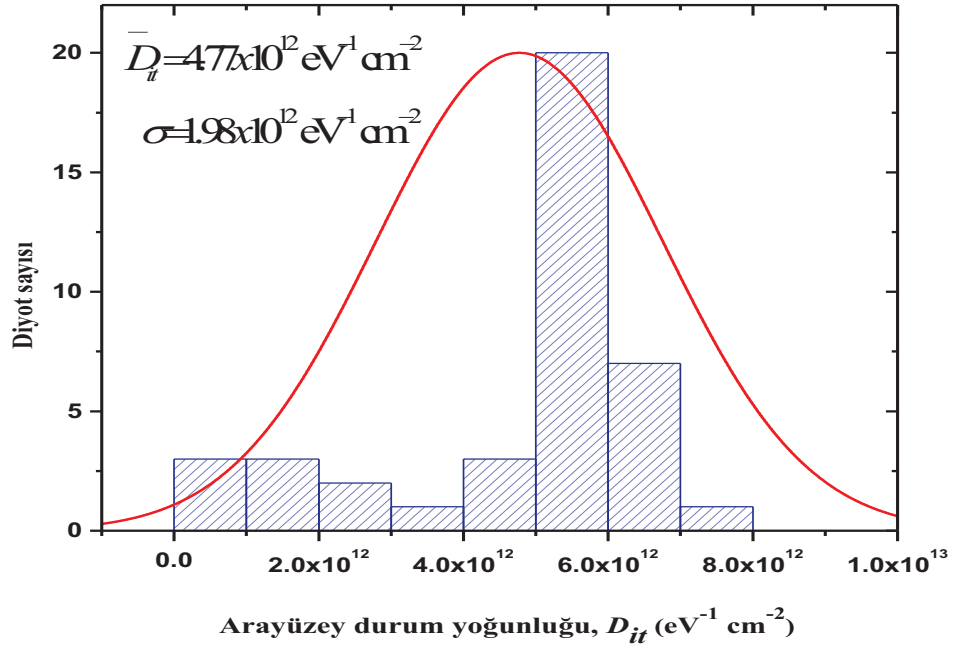
Şekil 4.22 40 adet Schottky diyot için elde edilmiş tüketme tabakası genişliği (W_D) değerlerinin istatistiksel dağılım grafiği.

40 adet Schottky diyot için engel yüksekliği (Φ_B) değerleri denklem (4.23) yardımıyla hesaplanmış ve Gaussian fonksiyonuna fit edilmiştir. Şekil 4.23’de Φ_B ’nin Gaussian dağılımı görülmektedir. Bu parametrenin istatistik analizlerinden ortalama engel yüksekliği $\bar{\Phi}_B = 0.539 \text{ eV}$ ve standart sapması $\sigma = 0.071 \text{ eV}$ olarak bulunmuştur.

40 adet Schottky diyot için arayüzey durum yoğunlukları (D_{it}) değerleri denklem (4.13) yardımıyla hesaplanmış ve Gaussian fonksiyonuna fit edilmiştir. Şekil 4.24’de D_{it} ’nin Gaussian dağılımı görülmektedir. Bu parametrenin istatistik analizlerinden ortalama engel yüksekliği $\bar{D}_{it} = 4.77 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ve standart sapması $\sigma = 1.98 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ olarak bulunmuştur.



Şekil 4.23 40 adet Schottky diyot için elde edilmiş engel yüksekliği (Φ_B) değerlerinin istatistiksel dağılım grafiği.



Şekil 4.24 40 adet Schottky diyot için elde edilmiş arayüzey durum yoğunlukları (D_{it}) değerlerinin istatistiksel dağılım grafiği.

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu tezde, yüksek anahtarlama hızına sahip olmasından dolayı genelde alan etkili transistör ve varaktör olarak dedektörlerde, bilgisayarlarda ve modülatörlerde kullanılan ve son derece önemli devre elemanı olan Schottky diyotları üzerinde çalışılmıştır. Bunun için (100) düzleminde büyütülmüş, 250 μm kalınlıklı, 5 $\Omega\text{-cm}$ öz dirençli bir p-tipi silisyum kristali kullanılmıştır. Çeşitli kimyasal temizlik aşamalarından sonra evaporasyon sistemleri kullanılarak aynı kristal üzerinde 40 adet Al/p-Si Schottky diyotu oluşturulmuştur. Oluşturulan diyotların oda sıcaklığında ve karanlık ortamda bilgisayar kontrollü ölçüm cihazları yardımıyla akım-gerilim ($I-V$), kapasite-gerilim ($C-V$) ve iletkenlik-gerilim ($G-V$) ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümlerden elde edilen veriler yardımıyla çeşitli yöntemler kullanılarak her bir diyot için hesaplamalar yapılmış ve bu hesaplamalar grafiklere aktarılmıştır. Bu grafiklerden her bir diyot için başlıca diyot parametreleri olan idealite faktörü (n), doyma akımı (I_0), difüzyon potansiyeli (V_d) ve engel yüksekliği (Φ_B)'nin yanında yine her bir diyot için seri direnç (R_s), Fermi enerji seviyesi (E_f), tüketim tabakası genişliği (W_D), Schottky alçalması ($\Delta\Phi_B$), maksimum elektrik alan (E_m) ve yüzey durumları (N_{ss}) gibi diyot parametreleri tayin edilmiştir.

Schottky diyotlarının $I-V$ eğrilerinden görüldüğü üzere düz beslem bölgesinde ideallikten sapmalar, ters beslem bölgesinde ise bir doyuma sahip oldukları tespit edilmiştir. Düz beslem bölgesinde üç bölge mevcuttur. Bunlar; yeniden birleşme adı verilen ve eksenden birkaç kT/q kadar uzaklığa kadar uzanan birinci bölge, termoiyonik emisyon akımının geçerli ve lineer olduğu ikinci bölge ve son olarak da seri direncin etkisini göstererek eğriyi aşağı doğru büktüğü üçüncü bölgedir. Diyotların idealite faktörleri ikinci bölgede bulunan doğrunun eğiminden, doyma akımları ise bu doğrunun akım eksenini kestiği noktadan elde edilmiştir. Diyotların idealite faktörleri 1'den büyük bulunmuştur. $I-V$ ölçümlerinden elde edilen ideallik faktörü değerleri 1.2 – 1.8, doyma akımı $9.48 \times 10^{-6} - 1.16 \times 10^{-4} \text{ A}$ ve engel yüksekliği 0.623-0.521 eV arasında bulunmuştur. İdeallik faktörü değerlerinin 1'den büyük çıkması arayüzey durumlarının ve arayüzey tabakasının varlığından kaynaklanmaktadır.

Yapıların arayüzey durum yoğunlukları her bir diyot için enerjinin bir fonksiyonu olarak $I-V$ ölçümlerinden elde edildi. Arayüzey durum yoğunluklarının (N_{ss}) mertebesi $10^{13} eV^{-1}cm^{-2}$ 'dir. Elde edilen veriler ışığında arayüzey enerji dağılım grafiğine bakıldığında tüm diyotlar için N_{ss} değerlerinin yarıiletkenin yasak enerji bant aralığının ortasından başlayarak değerlik bandına doğru eksponansiyel olarak arttığı görülmektedir. Bu durumun nedeni yarıiletkende bulunan alıcıların (katkı atomlarının) değerlik bandına doğru yoğunlaşarak sığ seviyeler oluşturmasıdır. Enerji dağılım grafiğinin iletkenlik bant kenarına doğru olan kıvrılmaları ise derin seviye durumlarına (verici tipi) atfedilmiştir. Ölçümler genelinde elde edilen arayüzey durumları 6.73×10^{12} ile $7.79 \times 10^{13} eV^{-1}cm^{-2}$ arasındadır.

$I-V$ eğrilerinin yüksek voltaj bölgesinde aşağı doğru bükülmesine ve dolayısıyla ideallikten sapmasına neden olan seri direnç değerleri modifiye Norde yöntemi, Cheung yöntemi kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmıştır. 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. Bu durum yavaş taşıyıcı yoğunluğunu oluşturur. Yapıların seri direnç tayininde kullanılan Norde yönteminde, $I-V$ eğrilerinin düz beslem bölgesi baz alınmak suretiyle voltaja bağlı olarak tanımlanmış ve yüksek idealite faktörlü yapılar için modifiye edilmiş bir fonksiyon kullanılmıştır. Bu fonksiyon yardımıyla yapıların seri direnç ve engel yükseklikleri belirlenmiştir. Norde tekniği hesaplamalarından elde edilen seri direnç değerleri 40 adet diyottan birkaç tanesi hariç genelde 11.7 ile 33.8Ω arasındadır. $I-V$ ölçümleri kullanılarak seri direnç tayin edilen bir diğer yöntem de Cheung yöntemi olup, bu yöntemde iki adet fonksiyon tanımlanmıştır. Bu yöntem seri direnç ve engel yüksekliğinin yanında bir de idealite faktörünün belirlenmesine imkân kılar. Cheung tekniği hesaplamalarından elde edilen seri direnç değerleri 40 adet diyottan birkaç tanesi hariç $dV/d\ln(I) - I$ ve $H(I) - I$ fonksiyonları için genel olarak sırasıyla 13.3 ile 39.6Ω ve 12.6 ile 37.7Ω arasındadır. Bu sonuçlar, Norde yönteminden elde edilen seri direnç değerleri ile uyumludur. Diğer taraftan hesaplanan idealite faktörü değerleri de 1.3 ile 1.7 arasındadır.

Yapıların $C-V$ ve $G-V$ ölçümleri, arayüzey durumlarının uygulanan ac sinyali takip edemeyeceği yeterince yüksek bir frekansta (1 MHz) yapılmıştır. Böylece diyot parametrelerinin elde edilmesinde yüzey durumlarından gelebilecek katkılar minimuma indirilmiştir. Ölçümlerden elde edilen veriler yardımıyla yapıların $C-V$ ve $G-V$ eğrileri çizilmiştir. Kapasite eğrilerinden görüldüğü üzere her bir diyot, sıfır beslem yakınlarında bir pik verirken, iletkenlik eğrileri artan ters besleme artmıştır. Kapasite eğrilerinde görülen pikler bu bölgede arayüzey durumlarının var olduğunun bir göstergesidir.

Yapıların kapasite ve iletkenlik ölçümleri üzerindeki seri direnç etkisini ortadan kaldırmak için, bir başka seri direnç hesaplama yöntemi olan admittans tekniği kullanıldı. Seri direnç değerleri uygulanan voltaja bağlı olarak çizildi ve bu eğrilerin sıfır beslem noktasına yakın yerlerde pikler verdiği görüldü. Bu durum seri direncin, kapasite ve iletkenliğin uygulanan voltaja bağımlılığının etkisinde olduğunun bir göstergesidir. Admittans tekniği kullanılarak 40 adet diyot için elde edilmiş seri direnç değerleri birkaç diyot hariç 11.9 ile $35.5\ \Omega$ arasındadır. Diyotların aynı şartlarda ve aynı kristal üzerinde oluşturulmasına rağmen seri direnç değerlerinin oldukça geniş bir aralıkta değişmesi, yarıiletken içerisindeki katkıların düzensiz bir şekilde dağılmış olması ve bunun sonucunda da yüksek öz dirençli bölgeler meydana getirmesidir.

Admittans tekniği, seri dirençleri mevcut diyotların tek bir frekanstaki kapasite ve iletkenlik ölçüm değerlerinin daha doğru elde edilmesine imkân kılar. Bu çalışmada admittans 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 piki olup buradan yüzey durumları hakkında bilgi edinilebilir. Buradan her bir diyot için yüzey durum yoğunlukları elde edilmiştir. Üretilen 40 adet diyot için elde edilmiş yüzey durum yoğunlukları 4.55×10^{11} ile $7.78 \times 10^{12}\ eV^{-1}cm^{-2}$ arasındadır.

Yapıların $1/C^2-V$ eğrileri 1 MHz 'deki düzeltilmiş $C-V$ ölçümlerinden elde edildi. Eğriler oldukça geniş bir voltaj aralığında lineer bir bölge vermektedirler. Bu

lineer bölge kullanılarak her bir diyot için taşıyıcı yoğunluğu (N_A), difüzyon potansiyeli (V_d), Fermi enerji seviyesi (E_f), engel yüksekliği (Φ_B), Schottky alçılması ($\Delta\Phi_B$), tüketim tabakası genişliği (W_D) ve maksimum elektrik alan (E_m) gibi önemli diyot parametreleri elde edilmiş bunların bazıları çizelge 4.4'te verilmiştir. Deneysel olarak elde edilmiş N_A değerleri teorik olarak hesaplanmış olan N_A değeri ($2.77 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) ile uyum içerisinde dir.

Silisyum arayüzeyinde oluşan doğal oksit tabakası kalınlığı $C-V$ ölçümlerinden ortalama olarak 7.7 \AA çıkmıştır. Yüzey hazırlık işlemleri sırasında böyle ince bir oksit tabakasının arayüzeyde oluşması kaçınılmazdır.

Aynı şartlarda ve aynı kristal üzerinde oluşturulmalarına 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 [42,45]. Bu durum metal/yarıiletken arayüzeyinde engel yüksekliği homojensizliklerine sebep olur. Bu tip yapıların arayüzeyi yüzey hazırlama işlemlerine karşı oldukça hassastır. Durum böyle olunca da düşük engel yüksekliğine ve idealite faktörüne sahip diyotlar elde etmek zorlaşır. Yüzey alanı mikro ya da nano mertebesinde olan metal/yarıiletken diyotlar üretildiğinde bu olumsuz durum büyük ölçüde giderilebilecektir. Öte yandan $I-V$ 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 40 adet diyot için birçok parametrenin istatistiksel dağılımları elde edilmiştir. $I-V$ ölçümleri kullanılarak elde edilen ortalama değerler doyma akımı için $3.862 \times 10^{-5} \text{ A}$, idealite faktörü için 1.578 ve engel yüksekliği için 0.559 eV 'dur. Norde ve Cheung yöntemlerinden elde edilen ortalama değerler sırasıyla, engel yükseklikleri ve idealite faktörü için, 0.551 eV , 0.543 eV ve 1.554 'dür. Arayüzey durumları için elde edilen ortalama değer $3.058 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 'dir. Cheung yönteminde kullanılan $dV/d\ln(I) - I$ ve $H(I) - I$

fonksiyonlarından elde edilen ortalama seri direnç değerleri sırasıyla 19.90 ve 18.08 Ω 'dur. C - V ölçümlerinden elde edilen ortalama değerler V_d , W_D , Φ_B , E_m , N_A ve D_{it} için sırasıyla 0.329 eV, $1.915 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $1.32 \times 10^4 \text{ V/cm}$, 0.539 eV, 4524.7 Å ve $4.77 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, olarak bulunmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] Braun, F. 1874. Prog. Ann. Phys., 153, p. 556.
- [2] Sze, S. M., Crowell, C. R. Ve Khang, D., Photoelectric Determine of The Image Force Dielektric Constant for Hot Electrons in Schottky Barriers, J. Appl. Phys. 35, 2534- 2536, 1964.
- [3] Crowell, C. R. And Sze, S. M., Current Transport in Metal-Semiconductor Barriers, Solid-State Elect., 9, 1035 ,1966.
- [4] Irene, E. A., Massoud, H. Z., Tierney, E. 1986. "Silicon oxidation studies: silicon orientation effects on thermal oxidation", Journal of the Electrochemical Society, Vol. 133, No. 6, p. 125.
- [5] Schottky, W. 1938. Naturwissenschaften, 26, p. 84.
- [6] Mott, N. F. 1938. Proc. Camb. Philos. Soc., 34, p. 56.
- [7] ZIEL, A. 1968. Solid-State Physical. Electronics, Prentice-Hall Inc., New Jersey.
- [8] Sze, S. M. 1981. Physics of Semiconductor Devices, second ed., Wiley, NewYork.
- [9] Crowell, C. R. and Rideout, V. L. 1969. Normalized Thermionic-Field Emission In Metal-Semiconductor Barriers. Solid State Electron., 12; 89-105.
- [10] Padovani, F. A. and Stratton, R. 1966. Field and Thermionic-Field Emission in Schottky Barriers. Solid-State Electron., 9; 695-707.
- [11] Padovani, F. A. 1971. The Voltage-Current Characteristic of Metal Semiconductor Contacts, in Semiconductors and Semimetals. Academic Press, New York, 7; 75-146.
- [12] Card, H. C. and Rhoderick, E. H. 1971. Studies of Tunnel MOS Diodes I. Interface Effects In Silicon Schottky Diodes. J. Phys. D: Appl. Phys., 4; 1589-1601.
- [13] Card, H. C. 1976. Aluminum-Silicon Schottky Barriers and Ohmic Contacts in Integrated Circuits. IEEE Trans. On Electron Devices, 23; 538-544.
- [14] Norde, H., 1979. "A Modified Forward I-V Plot for Schottky Diodes with High Series Resistance", J. Appl. Phys., 50: 5052-5053.
- [15] Sato, K. And Yasamura, Y. 1985. "Study of Forward I-V Plot for Schottky Diodes with High Series Resistance", J. Appl. Phys., 60: 1223.

- [16] McLean, A. B. 1986. "Limitations to The Norde I-V Plot, Semicond.", Sci.Technol., 1: 177.
- [17] Cheung, S. K., Cheung, N. W. 1986. Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. Appl. Phys. Lett., 49: 85-87.
- [18] Bohlin, K. E. 1986. Generalized Norde Plot Including Determination of the Ideality Factor. J. Appl. Phys., 60; 1223-1224.
- [19] Cowley, A. M. and Sze, S. M. 1965. Surface States and Barrier Height of Metal-Semiconductor Systems. J. Appl. Phys., 36; 3212-3220.
- [20] Bardeen, J. 1947. Surface states and rectification at a metal semiconductor contact. Phys. Rev., 71; 717-727.
- [21] Nicollian, E. H. and Brews, J. R. 1982. Metal Oxide Semiconductor (MOS) Physics and Technology, John Wiley, New York.
- [22] Tersoff, J. 1984. Phys. Rev. Lett. 52, 465.
- [23] Rhoderick, E. H. 1970. J. Phys. D3, 1153.
- [24] Castagne, R. and Vapaille, A. 1971. "Description of The SiO₂-Si Interface Properties by Means of Very Low Frequency MOS Capacitance Measurements". Surface Sci., 28; 157-193. (Castagne ve Vapaille 1971, Kelberlau ve Kassing 1981),
- [25] Kelberlau, U. and Kassing, R. 1981. Nonequilibrium Properties of MIS-Capacitors. Solid State Electron., 24; 321-327.
- [26] Chattopadhyay, P. 1996. "Capacitance Technique For The Determination of Interface State Density of Metal/Semiconductor Contact". Solid State Electronics, 39;1491-1493.
- [27] Szatkowski, J. and Sieranski, K. 1988. "Interface Effects on Mg-Zn₃-P₂ Schottky Diodes". Solid State Electronics, 31; 257-260.
- [28] Szatkowski, J. and Sieranski, K. 1992. "Simple Interface-Layer Model For The Nonideal Characteristics of The Schottky-Barrier Diode". Solid State Electronics, 35; 1013-1015.
- [29] Card, H. C. and Rhoderick, E. H. 1971. "Studies of Tunnel MOS Diodes I. Interface Effects In Silicon Schottky Diodes". J. Phys. D: Appl. Phys., 4; 1589-1601.

- [30] Card, H. C. 1976. "Aluminum-Silicon Schottky Barriers and Ohmic Contacts in Integrated Circuits". IEEE Trans. On Electron Devices, 23; 538-544.
- [31] Rhoderic, E. M. and Williams, R. H. 1988. "Metal Semiconductor Contacts" 2nd Ed. Clarendon and Oxford.
- [32] Nicollian, E. H., Brews, J. R. 1982. "MOS Physics and Technology", Wiley, New York.
- [33] Maeda, K. 2004. "Energy level broadening of defects causing nonideality in nearly ideal Si Schottky barriers", Appl. Surf. Sci., 237: 165.
- [34] Morgan, D. V., Frey, J. 1979. Schottky barrier height: a design parameter for device applications. Solid-State Electronics, 22(10): 865-873.
- [35] Fonash, S. J. 1975. "Role of the interfacial layer in metal-semiconductor solar cells". J. Appl. Phys., 46(3) :1286-1289.
- [36] Hickmott, T. W. 1980. "Dipole layers at the metal-SiO₂ interface". J. Appl. Phys., 51(9): 4269-4281.
- [37] Meirhaeghe, R. L., Cardon, F., Gomes, W. P. 1980. "Effects of thin oxide layers on the characteristics of GaAs MIS solar cells". Phys. Status Solidi (a), 59(2): 477-484.
- [38] Hill, W. A. Coleman, C. C. 1980. Solid-State Electron. 23, 987.
- [39] Akkal, B., Benamara, A., Gruzza, B. and Bideux, L. 2000. "Characterization of Interface States at Au/InSb/InP(100) Schottky Barrier Diodes As A Function of Frequency". Vacuum, 57; 219-228.
- [40] Jaros, M. 1989. "Physics and Applications of Semiconductor Microstructures", Clarendon Press, Oxford.
- [41] Sing, A., Reinhardt, K. C. and Anderson, W. A. 1990. "Temperature Dependence of Electrical Characteristics of Yb/p-InP Tunnel Metal-Insulator-Semiconductor Junctions", J. Appl. Phys., 68: 3475-3483.
- [42] Werner, J. H. and Güttler, H. H. 1991. "Barrier Inhomogeneities At Schottky Contacts", J. Appl. Phys., 69: 1522-1533.
- [43] Miller S. T. 2005. "Electrical Properties of Inhomogeneous Schottky Diodes", New Developments in Semiconductor Research, Nova Science Publishers, New York, 113-138.

- [44] Selçuk A. B., Ocak S. B., Karadeniz, S. 2012. “Gaussian Distribution on Electrical Characteristics of Al/SiO₂/p-Si Structures” American Journal of Materials Science, 2(4): 125-130.
- [45] Sullivan, J. P., Tung, R. T., Pinto, M. R. and Graham, W. R. 1991. J. Appl. Phys, 70, 7403.

ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında Giresun'da doğdu. İlk, Orta ve Lise öğrenimini Giresun'da tamamladı. 2005 yılında girdiği Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünden Haziran 2010'da mezun oldu. Aynı yıl girdiği Giresun Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans programında eğitime başladı. Halen yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.

Uluslararası Kongreler :

1- Bedri Aydoğan Bayram, Serdar Karadeniz, Behzad Barış, Nihat Tuğluoğlu, "Analysis of electrical properties of numerous schottky junctions prepared on silicon substrate" Türk Fizik Derneği 31. Uluslararası Fizik Kongresi (TFD 31), 21-24 Temmuz 2014, sayfa no:372