



**BAZI İKİLİ VE ÜÇLÜ ALAŞIMLARDAN ÜRETİLEN
ALAŞIM/YARIİLETKEN DOĞRULTUCU KONTAKLARIN
ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİNİN
ZAMANA BAĞLI OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Ahmet TAŞER

**Doktora Tezi
Fizik Anabilim Dalı
Katıhal Fiziği Bilim Dalı
Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM
2018
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**BAZI İKİLİ VE ÜÇLÜ ALAŞIMLARDAN ÜRETİLEN
ALAŞIM/YARIİLETKEN DOĞRULTUCU KONTAKLARIN
ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİNİN ZAMANA BAĞLI
OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Ahmet TAŞER

**FİZİK ANABİLİM DALI
Katıhal Fiziği Bilim Dalı**

**ERZURUM
2018**

Her Hakkı Saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü



TEZ ONAY FORMU

**BAZI İKİLİ VE ÜÇLÜ ALAŞIMLARDAN ÜRETİLEN ALAŞIM/YARIİLETKEN DOĞRULTUCU
KONTAKLARIN ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİNİN ZAMANA BAĞLI OLARAK
ARAŞTIRILMASI**

Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM danışmanlığında, Ahmet TAŞER tarafından hazırlanan bu çalışma, 10/10/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından FİZİK Anabilim Dalı KATİHAL FİZİĞİ Bilim Dalı'nda DOKTORA tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Ahmet Faruk ÖZDEMİR

İmza :

Üye : Prof. Dr. Hayrunnisa NADAROĞLU

İmza :

Üye : Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM

İmza :

Üye : Doç. Dr. Sezai ASUBAY

İmza :

Üye : Doç. Dr. Betül GÜZELDİR

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun 25.10./2018 tarih ve ...42.../...15..... nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

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

ÖZET

Doktora Tezi

BAZI İKİLİ VE ÜÇLÜ ALAŞIMLARDAN ÜRETİLEN ALAŞIM/YARIİLETKEN DOĞRULTUCU KONTAKLARIN ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİNİN ZAMANA BAĞLI OLARAK ARAŞTIRILMASI

Ahmet TAŞER

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

Danışman: Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM

Bu doktora tezi çalışmasında Au, Ag ve Cu metallerinden ve bu metaller kullanılarak hazırlanan ağırlıkça eşit oranlardaki ikili ve farklı oranlardaki üçlü alaşımlardan elde edilen doğrultucu kontakların elektriksel karakteristikleri zamana bağlı olarak incelendi. Bu çalışmada $\langle 111 \rangle$ yönelimine sahip, 1-10 $\Omega \cdot \text{cm}$ öz dirençli ve 400 μm kalınlığında, fabrikasyon olarak tek tarafı parlatılmış n-tipi Si yarıiletken altlık kullanıldı. Ti metali n-Si yarıiletken altlığın mat yüzeyine buharlaştırılarak omik kontak elde edildi. n-Si yarıiletken altlığın parlak yüzeyine Au, Ag ve Cu metali buharlaştırılarak metal/yarıiletken, ikili ve üçlü alaşımlar buharlaştırılarak alaşım/yarıiletken doğrultucu kontaklar elde edildi. Metal/yarıiletken ve alaşım/yarıiletken doğrultucu kontakların hemen karanlıkta ve oda sıcaklığında akım-voltaj (I-V) ve kapasite-voltaj (C-V) karakteristikleri incelendi. Doğrultucu Kontakların zamana bağlı elektriksel karakteristiklerin incelenmesi için I-V ve C-V ölçümleri 1, 7, 15, 30, 90, 180 ve 365 gün sonra tekrarlandı. Doğrultucu kontakların zamana bağlı düz beslem I-V karakteristiklerinden idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri Termiyonik Emisyon, Cheung ve Norde metotları yardımı ile hesaplandı. Ayrıca doğrultucu kontakların C-V karakteristikleri zamana ve frekansa bağlı olarak araştırıldı ve ters beslem C^{-2} -V grafiklerinden difüzyon potansiyelleri, taşıyıcı konsantrasyonları, Fermi enerjileri ve engel yükseklikleri değerleri hesaplandı. Sonuçlar karşılaştırıldığında alaşım/yarıiletken doğrultucu kontakların metal/yarıiletken kontaklardan daha kararlı yapıya sahip oldukları görüldü.

2018, 146 sayfa

Anahtar Kelimeler: Alaşım/Yarıiletken Schottky Kontak, Norde Metodu, Cheung Metodu, Yaşlanmanın Etkisi, Elektriksel Karakteristikler

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

TIME-DEPENDENT INVESTIGATION OF THE ELECTRICAL CHARACTERISTIC OF ALLOY/SEMICONDUCTOR RECTIFIER CONTACTS FABRICATED FROM SOME BINARY AND TRIPLE ALLOYS

Ahmet TAŞER

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

Supervisor: Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM

In this PhD thesis study, the depending on time the electrical characteristics of rectifier contacts obtained Au, Ag and Cu metals and the from binary alloys at weights equal and different proportions of triple alloys prepared by using these metals were investigated. In this study, a n-type Si semiconductor wafer with <111> orientation, which would be one-side polished as fabrication with a resistivity of 1-10 Ω .cm and a thickness of 400 μ m, was used. Ti metal was evaporated on the matt surface of the n-Si semiconductor wafer to form ohmic contact. Metal/semiconductor rectifier contacts by evaporating Au, Ag and Cu metals and alloy/semiconductor rectifier contacts by evaporating binary and triple alloys were obtained on the polished surface of the n-Si semiconductor wafer. Current-voltage (I-V) and capacity-voltage (C-V) characteristics of metal/ semiconductor and alloy/ semiconductor rectifier contacts were examined in the darkness and room temperature. This rectifier contacts I-V and C-V measurements were repeated after 1, 7, 15, 30, 90, 180 and 365 days for the time-dependent electrical characteristics. The ideality factor, barrier height and series resistance values of the rectifier contacts with time-dependent forward bias I-V characteristics were calculated with the help of Thermionic Emission, Cheung and Norde methods. In addition, the C-V characteristics of the rectifier contacts were investigated with respect to time and frequency, and the diffusing potentials, carrier concentrations, Fermi energier and barrier heights were calculated from the reverse bias C^{-2} -V graphs. When the results are compared, it was observed that alloy/ semiconductor rectifier contacts have more stable structure than metal/ semiconductor contacts.

2018, 146 pages

Keywords: Alloy/Semiconductor Schottky Contacts, Norde Method, Cheung Method, Aging Effect, Electrical Characteristics

TEŞEKKÜR

Doktora tezi olarak sunduğum bu çalışma Atatürk Üniversitesi, Fen Fakültesi Fizik Bölümü, Katıhal Elektronik Proses Laboratuvarında yapılmıştır. Tez çalışmalarımı yapmamda benden desteğini ve engin bilgisini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM'a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarım sırasında çalıştığım numunelerin hazırlanması ve ölçümlerinin yapılmasında bana büyük katkıları olan, bilgi ve desteğini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Betül GÜZELDİR'e, Sayın Öğr. Gör. Oğuzhan ÖZAKIN'a, ve laboratuvardaki çalışma arkadaşlarım Sayın Cengiz AYKAÇ'a ve Sayın Zeynep ORHAN'a çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca her zaman yanımda olan, sabır gösteren ve benden desteklerini esirgemeyen çok değerli aileme ve nişanlım Şeydanur AKTAŞ'a çok teşekkür ederim.

Ahmet TAŞER

Eylül 2018

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	11
2.1. Giriş	11
2.2. Yarıiletken Malzemelerin Temel Özellikleri	11
2.3. Valans ve İletkenlik Bantlarındaki Hallerin İşgal Edilmesi	12
2.4. Yarıiletken Malzemelerin Elektriksel Özellikleri	14
2.4.1. Enerji Bant Yapısı	15
2.4.2. Fermi Seviyesi	16
2.4.3. Sığ (Shallow) Haller	17
2.4.4. Derin (Deep) Haller	17
2.4.5. Safsızlıklar ve Kusurlar	17
2.5. Silisyum Yarıiletkeninin Fiziksel ve Malzeme Özellikleri	18
2.5.1. Kristal Yapısı.....	19
2.5.2. Elektriksel ve Optik Özellikleri.....	20
2.6. Yarıiletken Yüzeyleri	25
2.7. Schottky Diyotların Teorisi ve Çalışması	27
2.8. Schottky Engel Yüksekliği	34
2.8.1. Görüntü Yük Potansiyeli (Image Charge Potential) Nedeniyle Engel Alçalması	35
2.8.2. Tünelleme Nedeniyle Engel Alçalması	38
2.8.3. Elektrostatik Perdelemekten Dolayı Engel Alçalması	41
2.9. Yüzey Hallerinin Varlığında Schottky Engel Yüksekliği Teorisi.....	42
2.10. Arayüzey Kimyasal Bağlanmaya Bağlı Schottky Engel Yüksekliği Teorisi	46

2.11. Schottky Diyodun Akım-Voltaj Karakteristikleri	49
2.12. Schottky Diyotlarda Eklem Kapasitesi.....	50
2.13. Schottky Diyotlarda Seri Direncin Hesaplanması İle İlgili Teoriler	53
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	56
3.1. Giriş	56
3.2. Alaşımların Hazırlanması.....	56
3.3. EDAX Ölçümlerinin Alınması	57
3.4. n-Si Yarıiletkenin Temizlenmesi.....	58
3.5. n-Si Yarıiletkenine Omik Kontak Yapılması	58
3.6. Alaşım/Yarıiletken Doğrultucu Kontakların Elde Edilmesi	59
3.7. Akım-Voltaj ve Kapasite-Voltaj Ölçüm Sistemleri	60
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	62
4.1. Giriş	62
4.2. Alaşımların EDAX Ölçümleri.....	62
4.3. Alaşım-Yarıiletken Schottky Diyotların Oda Sıcaklığında ve Zamana Bağlı Olarak Alınan Akım-Voltaj Karakteristiklerinin İncelenmesi	63
4.3.1. Au/n-Si/Ti, Ag/n-Si/Ti ve Cu/n-Si/Ti Schottky Diyotların Zamana Bağlı I-V Ölçümlerinden Diyot Parametrelerinin Hesaplanması	63
4.3.2. AuAg(1:1)/n-Si/Ti, AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky Diyotların Zamana Bağlı I-V Ölçümlerinden Diyot Parametrelerinin Hesaplanması.....	81
4.3.3. AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti ve AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky Diyotların Zamana Bağlı I-V Ölçümlerinden Diyot Parametrelerinin Hesaplanması	94
4.4. Alaşım-Yarıiletken Schottky Diyotların Oda Sıcaklığında ve Zamana Bağlı Olarak Alınan C-V Karakteristiklerinin İncelenmesi.....	110
4.4.1. Au/n-Si/Ti, Ag/n-Si/Ti ve Cu/n-Si/Ti Schottky Diyotların Oda Sıcaklığında ve Zamana Bağlı Olarak Alınan C-V Karakteristiklerinin İncelenmesi.....	110
4.4.2 AuAg(1:1)/n-Si/Ti, AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky Diyotların Oda Sıcaklığında ve Zamana Bağlı Olarak Alınan C-V Karakteristiklerinin İncelenmesi.....	119

4.4.3 AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti ve AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky Diyotların Oda Sıcaklığında ve Zamana Bağılı Olarak Alınan C-V Karakteristiklerinin İncelenmesi	125
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	132
KAYNAKLAR	143
ÖZGEÇMİŞ	147



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

μ	Mobilite
μ_e	Elektronun mobilitesi
μ_h	Boşluğun mobilitesi
Au	Altın
Ag	Gümüş
Cu	Bakır
A	Diyodunun etkin alanı
A^*	Richardson sabiti
W	Deplasyon bölgesinin genişliği
E_a	Akseptör enerji düzeyi
E_c	İletkenlik bandının tabanı
E_d	Donör enerji düzeyi
E_f	Fermi enerji seviyesi
E_g	Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
E_H	Hidrojen atomunun iyonlaşma enerjisi
E_{ss}	Arayüzey hallerinin enerjisi
eV	Elektronvolt
E_v	Valans bandının tavanı
I_0	Doyma akımı
I	Schottky diyot kontak akımı
k	Boltzmann sabiti
m_e	Elektronun kütlesi
m_e^*	Elektronun etkin kütlesi
m_h	Boşluğun kütlesi
m_h^*	Boşluğun etkin kütlesi
N_a	Akseptör taşıyıcı konsantrasyonu

N_d	Donör taşıyıcı konsantrasyonu
N_{ss}	Yarıiletkenle dengede olan arayüzey hal yoğunluğu
q	Elektronun yükü
Q_m	Metalin yüzey yük yoğunluğu
Q_{ss}	Yarıiletkenin yüzey yük yoğunluğu
R_s	Seri direnç
V_d	Difüzyon potansiyeli
δ	Arayüzey tabakasının kalınlığı
ϵ_0	Boş uzayın dielektrik sabiti
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
λ	Dalga boyu
$\rho(x)$	Uzay yük yoğunluğu
ρ	Özdirenç
σ	İletkenlik
Φ_B	Schottky engel yüksekliği
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
χ	Yarıiletkenin elektron ilgisi
I-V	Akım-Voltaj
C-V	Kapasite-Voltaj
EDAX	Energy dispersive x-ray analysis
CNL	Yük Nötrallığı Seviyesi
SBH	Schottky Engel Yüksekliği
SD	Schottky Diyot
TE	Termiyonik Emisyon
CBM	İletkenlik Bandının Minimumu
VBM	Valans Bandının Maksimumu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Silisyumun kristal yapısı..	20
Şekil 2.2. Silisyum yarıiletkenin yasak enerji aralığı.	23
Şekil 2.3. Yalıtkan, yarıiletken ve iletken malzemelerin enerji bant diyagramı.....	23
Şekil 2.4. Bir yarıiletkende direkt ve indirekt bant yapısı.	25
Şekil 2.5. Yüzey tükenme ve yığılma koşulları altında bant bükülmesi ve yüzey dipolü.....	27
Şekil 2.6. Metal yarıiletken kontakta önce Schottky engel yüksekliği bant diyagramı.....	28
Şekil 2.7. Metal yarıiletken kontakta difüzyon potansiyeli bant diyagramı	29
Şekil 2.8. Schottky kontak deplasyon bölgesinin aksedilen elektrik dipol potansiyelleri	30
Şekil 2.9. Enerji bant diyagramı ile Schottky diyot boyunca ilerleyen elektrik akımı oluşumu.	32
Şekil 2.10. Enerji bant diyagramı ile Schottky diyotta uygulanan ters beslem voltajı ile artan difüzyon potansiyeli.	32
Şekil 2.11. (a) Sol: Metal-yarıiletken arayüzeyine ve yüzey yüklerine yakın olan bir elektronun neden olduğu alan, Sağ: Arayüzeyin iki tarafında iki zıt yükün neden olduğu alan, (b) Yarıiletken içindeki SBH'nin maksimum değerini düşüren ve çeken görüntü kuvvet etkisini gösteren diyagram.	36
Şekil 2.12. İndüklenmiş yük etkisinden dolayı bir Schottky ekleme engel potansiyeli azalır. Metalin üstündeki x mesafesindeki bir elektron indüklenen bir imaj yükünü görür.	37
Şekil 2.13. Düz beslem altında alan emisyonu ve termiyonik alan emisyonu. Burada E_{Fm} ve E_{FS} sırasıyla metalin ve yarıiletkenin Fermi seviyeleri, V uygulama voltajı ve E_m termiyonik alan emisyonuna katkı sağlayan maksimum enerjidir.	39
Şekil 2.14. Elektrostatik perdelemeye bağlı olarak engel alçalması. Burada Φ_{eff} ve Φ_B orijinal ve etkili Schottky engel yüksekliğini ve ΔE_{ES} elektrostatik perdelemeye bağlı olarak Schottky engel düşüşünü temsil etmektedir.....	41

Şekil 2.15. Bir ara yüzey tabakası ile metal- n-tipi yarıiletken kontağın enerji bant diyagramı. Φ_m metalin iş fonksiyonu; Φ_B metal-yarıiletken yüzey engeli; Φ_0 yük nötrallik seviyesi; $\Delta\Phi_n$ imaj kuvveti engel alçalması; Φ_n yarıiletkenin iletkenlik bandı ve Fermi seviyesi arasındaki enerji farkı; Δ_0 ara yüzey tabakası boyunca ki potansiyel; χ yarıiletkenin elektron ilgisi; V_d difüzyon potansiyeli; ϵ_s ve ϵ_i yarıiletken ve ara yüzey tabakasının dielektrik sabiti; δ arayüzey tabakasının kalınlığı; Q_{ss} yarıiletkenin yüzey yük yoğunluğu; Q_m metalin yüzey yük yoğunluğu	43
Şekil 3.1. Omik ve Schottky kontak yapımında kullanılan termal buharlaştırma sistemi.....	60
Şekil 3.2. Akım-voltaj ölçümünde kullanılan KEİTLEY 2400 cihazı	61
Şekil 3.3. Kapasite-voltaj ölçümlerinde kullanılan HEWLET PACKART 4192 A cihazı.	61
Şekil 4.1. (a) Au/n-Si/Ti, (b) Ag/n-Si/Ti ve (c) Cu/n-Si/Ti Schottky diyotların farklı günlerdeki akım-voltaj karakteristikleri.	66
Şekil 4.2. Au/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) N_{ss} ve (b) doğrultma oranı değişimleri.....	69
Şekil 4.3. Ag/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) N_{ss} ve (b) doğrultma oranı değişimleri.....	69
Şekil 4.4. Cu/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) N_{ss} ve (b) doğrultma oranı değişimleri.....	70
Şekil 4.5. (a) Au/n-Si/Ti, (b) Ag/n-Si/Ti ve (c) Cu/n-Si/Ti diyotlarının üç farklı düz beslem voltajlarında zamana bağlı diyot akımı değişimleri.....	71
Şekil 4.6. Au/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) $dV/d(\ln I)$ -I ve (b) $H(I)$ -I grafikleri.....	73
Şekil 4.7. Ag/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) $dV/d(\ln I)$ -I ve (b) $H(I)$ -I grafikleri.....	74
Şekil 4.8. Cu/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) $dV/d(\ln I)$ -I ve (b) $H(I)$ -I grafikleri.....	74
Şekil 4.9. (a) Au/n-Si/Ti, (b) Ag/n-Si/Ti ve (c) Cu/n-Si/Ti Schottky diyotlarının farklı günlerdeki $F(V)$ - V değişimleri.....	76

Şekil 4.10. (a) Au/n-Si/Ti, (b) Ag/n-Si/Ti ve (c) Cu/n-Si/Ti Schottky diyotlarının zamana bağlı idealite faktörü ve engel yüksekliği değişimleri.	79
Şekil 4.11. (a) Au/n-Si/Ti, (b) Ag/n-Si/Ti ve (c) Cu/n-Si/Ti Schottky diyotlarının zamana bağlı seri direnç değişimleri.....	80
Şekil 4.12. (a) AuAg(1:1)/n-Si/Ti, (b) AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve (c) AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının farklı günlerdeki akım-voltaj karakteristikleri	82
Şekil 4.13. AuAg(1:1)/n-Si/Ti Schottky diodunun farklı günlerdeki (a) N_{ss} ve (b) doğrultma oranı değişimleri.	85
Şekil 4.14. AuCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diodunun farklı günlerdeki (a) N_{ss} ve (b) doğrultma oranı değişimleri.	85
Şekil 4.15. AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diodunun farklı günlerdeki (a) N_{ss} ve (b) doğrultma oranı değişimleri.	86
Şekil 4.16. (a) AuAg(1:1)/n-Si/Ti, (b) AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve (c) AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının üç farklı düz beslem voltajlarındaki zamana bağlı diyot akımı değişimleri.....	87
Şekil 4.17. AuAg(1:1)/n-Si/Ti Schottky diodunun farklı günlerdeki (a) $dV/d(\ln I)$ -I ve (b) $H(I)$ -I grafikleri.	87
Şekil 4.18. AuCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diodunun farklı günlerdeki (a) $dV/d(\ln I)$ -I ve (b) $H(I)$ -I grafikleri.	88
Şekil 4.19. AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diodunun farklı günlerdeki (a) $dV/d(\ln I)$ -I ve (b) $H(I)$ -I grafikleri.	88
Şekil 4.20. (a) AuAg(1:1)/n-Si/Ti, (b) AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve (c) AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının farklı günlerdeki $F(V)$ - V değişimleri.	90
Şekil 4.21. (a) AuAg(1:1)/n-Si/Ti, (b) AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve (c) AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının zamana bağlı idealite faktörü ve engel yüksekliği değişimleri.....	93
Şekil 4.22. (a) AuAg(1:1)/n-Si/Ti, (b) AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve (c) AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının zamana bağlı seri direnç değişimleri.....	94
Şekil 4.23. (a) AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, (b) AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti, (c) AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti ve (d) AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının farklı günlerdeki akım-voltaj karakteristikleri.....	96

Şekil 4.24. AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) N_{SS} ve (b) doğrultma oranı değişimleri.....	99
Şekil 4.25. AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) N_{SS} ve (b) doğrultma oranı değişimleri.....	99
Şekil 4.26. AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) N_{SS} ve (b) doğrultma oranı değişimleri.....	100
Şekil 4.27. AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) N_{SS} ve (b) doğrultma oranı değişimleri.....	100
Şekil 4.28. (a) AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, (b) AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti, (c) AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti ve (d) AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti diyotlarının üç farklı doğru beslem voltajlarında diyot akımlarının zamana bağlı değişimleri.....	101
Şekil 4.29. AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) $dV/d(\ln I)$ -I ve (b) $H(I)$ -I grafikleri.....	102
Şekil 4.30. AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) $dV/d(\ln I)$ -I ve (b) $H(I)$ -I grafikleri.....	102
Şekil 4.31. AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) $dV/d(\ln I)$ -I ve (b) $H(I)$ -I grafikleri.....	103
Şekil 4.32. AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) $dV/d(\ln I)$ -I ve (b) $H(I)$ -I grafikleri.....	103
Şekil 4.33. (a) AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, (b) AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti, (c) AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti ve (d) AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının farklı günlerde ölçülen $F(V)$ - V değişimleri.....	104
Şekil 4.34. (a) AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, (b) AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti, (c) AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti ve (d) AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının farklı metotlarla hesaplanan idealite faktörleri ve engel yüksekliklerinin zamana bağlı değişimleri.....	108
Şekil 4.35. (a) AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, (b) AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti, (c) AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti ve (d) AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının Cheung ve Norde metotlarından hesaplanan seri direnç değerlerinin zamana bağlı değişimleri.	109

Şekil 4.36. (a) Au/n-Si/Ti, (b) Ag/n-Si/Ti ve (c) Cu/n-Si/Ti Schottky diyotlarının farklı günlerde oda sıcaklığında ve $f=500$ kHz frekansta alınan kapasite-voltaj karakteristikleri.	112
Şekil 4.37. (a) Au/n-Si/Ti, (b) Ag/n-Si/Ti ve (c) Cu/n-Si/Ti Schottky diyotlarının farklı günlerde oda sıcaklığında ve $f=500$ kHz frekanstaki $C^{-2}-V$ değişimleri.....	115
Şekil 4.38. (a) AuAg(1:1)/n-Si/Ti, (b) AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve (c) AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının farklı günlerde oda sıcaklığında ve $f=500$ kHz frekanstaki kapasite-voltaj karakteristikleri.	120
Şekil 4.39. (a) AuAg(1:1)/n-Si/Ti, (b) AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve (c) AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının farklı günlerde oda sıcaklığında ve $f=500$ kHz frekanstaki $C^{-2}-V$ değişimleri.	121
Şekil 4.40. (a) AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, (b) AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti, (c) AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti ve (d) AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının oda sıcaklığında, farklı günlerde ve $f=500$ kHz frekansta alınan kapasite-voltaj karakteristikleri	126
Şekil 4.41. (a) AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, (b) AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti, (c) AgCu(1:1:2)/n-Si/Ti ve (d) AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının $C^{-2}-V$ değişimleri	127

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Bazı yaygın yarıiletkenlerin temel özellikleri.....	16
Çizelge 2.2. Silisyum yarıiletkeninin bazı özellikleri.....	19
Çizelge 2.3. Germanyum (Ge), Silisyum (Si) ve Galyum Arsenik (GaAs) için farklı sıcaklıklarda enerji bant aralıkları	24
Çizelge 4.1. Alaşımların EDAX yöntemi ile tayin edilen ağırlıkça yüzde oranları	62
Çizelge 4.2. Au/n-Si/Ti diyodunun ln(I)-V grafiklerinden zamana bağlı olarak hesaplanan bazı parametreleri	66
Çizelge 4.3. Ag/n-Si/Ti diyodunun ln(I)-V grafiklerinden zamana bağlı olarak hesaplanan bazı parametreleri	67
Çizelge 4.4. Cu/n-Si/Ti diyodunun ln(I)-V grafiklerinden zamana bağlı olarak hesaplanan bazı parametreleri	67
Çizelge 4.5. Zamana bağlı olarak Au/n-Si/Ti Schottky diyodunun Norde ve Cheung metodlarına göre hesaplanan diyet parametreleri.....	77
Çizelge 4.6. Zamana bağlı olarak Ag/n-Si/Ti Schottky diyodunun Norde ve Cheung metodlarına göre hesaplanan diyet parametreleri.....	77
Çizelge 4.7. Zamana bağlı olarak Cu/n-Si/Ti Schottky diyodunun Norde ve Cheung metodlarına göre hesaplanan diyet parametreleri.....	78
Çizelge 4.8. Zamana bağlı olarak AuAg(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun termiyonik emisyon metoduna göre hesaplanan diyet parametreleri.....	83
Çizelge 4.9. Zamana bağlı olarak AuCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun termiyonik emisyon metoduna göre hesaplanan diyet parametreleri	83
Çizelge 4.10. Zamana bağlı olarak AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun termiyonik emisyon metoduna göre hesaplanan diyet parametreleri.....	84
Çizelge 4.11. Zamana bağlı olarak AuAg(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun Norde ve Cheung metodlarına göre hesaplanan diyet parametreleri	90
Çizelge 4.12. Zamana bağlı olarak AuCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun Norde ve Cheung metodlarına göre hesaplanan diyet parametreleri	91
Çizelge 4.13. Zamana bağlı olarak AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun Norde ve Cheung metodlarına göre hesaplanan diyet parametreleri	91

Çizelge 4.14. Zamana bağlı olarak AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun termiyonik emisyon metoduna göre hesaplanan diyot parametreleri.....	96
Çizelge 4.15. Zamana bağlı olarak AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun termiyonik emisyon metoduna göre hesaplanan diyot parametreleri.....	97
Çizelge 4.16. Zamana bağlı olarak AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti Schottky diyodunun termiyonik emisyon metoduna göre hesaplanan diyot parametreleri.....	97
Çizelge 4.17. Zamana bağlı olarak AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun termiyonik emisyon metoduna göre hesaplanan diyot parametreleri.....	98
Çizelge 4.18. Zamana bağlı olarak AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun Norde ve Cheung metodlarına göre hesaplanan diyot parametreleri	105
Çizelge 4.19. Zamana bağlı olarak AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun Norde ve Cheung metodlarına göre hesaplanan diyot parametreleri	106
Çizelge 4.20. Zamana bağlı olarak AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti Schottky diyodunun Norde ve Cheung metodlarına göre hesaplanan diyot parametreleri	106
Çizelge 4.21. Zamana bağlı olarak AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun Norde ve Cheung metodlarına göre hesaplanan diyot parametreleri	107
Çizelge 4.22. Zamana bağlı olarak farklı frekanslarda Au/n-Si/Ti Schottky diyodunun ters beslem C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplanan parametreleri.....	116
Çizelge 4.23. Zamana bağlı olarak farklı frekanslarda Ag/n-Si/Ti Schottky diyodunun ters beslem C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplanan parametreleri.....	117
Çizelge 4.24. Zamana bağlı olarak farklı frekanslarda Cu/n-Si/Ti Schottky diyodunun ters beslem C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplanan parametreleri.....	118
Çizelge 4.25. Zamana bağlı olarak farklı frekanslarda AuAg(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun ters beslem C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplanan parametreleri.....	122
Çizelge 4.26. Zamana bağlı olarak farklı frekanslarda AuCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun ters beslem C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplanan parametreleri.....	123

Çizelge 4.27. Zamana bağlı olarak farklı frekanslarda AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun ters beslem C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplanan parametreleri.....	124
Çizelge 4.28. Zamana bağlı olarak farklı frekanslarda AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun ters beslem C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplanan parametreleri	128
Çizelge 4.29. Zamana bağlı olarak farklı frekanslarda AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun ters beslem C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplanan parametreleri	129
Çizelge 4.30. Zamana bağlı olarak farklı frekanslarda AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti Schottky diyodunun ters beslem C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplanan parametreleri	130
Çizelge 4.31. Zamana bağlı olarak farklı frekanslarda AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun ters beslem C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplanan parametreleri	131

1. GİRİŞ

Doğrultucu metal-yarıiletken kontaklar, engel oluşumu ile ilgili modeli W. Schottky tarafından ileri sürüldüğü için Schottky engel olarak bilinir. Bilinen metal-yarıiletken diyotlar yüz yıldan daha eskidir. Braun 1874’de bakır, demir ve gümüş sülfid kristalleri üzerine metal kontakların doğrultma doğası olduğunu bildirdi. O zamandan beri yürütülen sayısız deneysel ve teorik çalışmalara rağmen metal yarıiletken eklemeler tam olarak anlaşılamamıştır. Bunun sebebi belki de performanslarının birçok işleme bağlı olmasıdır.

Metalik ince bir telin yarıiletken bir yüzeye teması ile elde edilen nokta kontak diyotlar kablosuz haberleşme sistemlerinde radyo dalgası detektörleri olarak kullanılmıştır. Ancak daha sonra 1920 yılının başlarında gelişen vakum diyotları nokta kontak detektörlerin yerini almıştır. İkinci dünya savaşı esnasında kısa seviyeli mikrodalga detektörleri ve frekans dönüştürücüler gibi kullanım nedeniyle nokta kontak diyotlar tekrardan önem kazanmıştır (Rhoderick and Williams, 1988).

Nokta kontak doğrultucuların karakteristikleri çok güvenilir değildi. Sonradan nokta kontakların yerini, yarıiletkenin uygun şekilde hazırlanmış yüzeyine ince bir metalik filmin biriktirilmesi ile elde edilen doğrultucular almıştır. Bazı aygıtlar üzerine yapılan çalışmalarda kullanılan bu kontaklar çok üstün karakteristikler göstermiştir ve metal-yarıiletken davranışların anlaşılmasını sağlamıştır (Sze *et. al* 1964).

Metal-yarıiletken kontakların doğrultma etkisinin anlaşılmasına yönelik ilk önemli adım, yarıiletken ve metal arasındaki ara yüzeyde bir potansiyel engelinin varlığından bahseden Schottky tarafından gerçekleştirilmiştir. Daha sonra Schottky ve Mott engel oluşum mekanizmalarını açıklamışlardır. Ayrıca engelin şekli ve engel yüksekliğini hesaplamak için modeller önermişlerdir. Schottky engel kontaklarının anlaşılması için diğer önemli

bir gelişme de termoiyonik emisyon ile akımın engel üzerinden geçtiğini ileri süren Bethe tarafından ikinci dünya savaşı sırasında yapılmıştır (Sze 1981).

1960'lar da Schottky engel diyotlar üzerine yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları yeniden büyük bir hareketlilik kazanmıştır. Bu faaliyetler yarıiletken teknolojisinde metalik kontakların önemi ile birlikte etkili bir esin kaynağı olmuştur. Bu gelişmelerin sonucu olarak Schottky engellerin başka uygulama alanları ortaya çıkmıştır.

1970'ler de çalışmalar iki yönde ağırlık kazanmıştır. İlk olarak önceki yıllarda Schottky engellerin araştırılması ve geliştirilmesi için yapılan çalışmalardan kazanılan bilgiler Schottky engellerinin kullanıldığı aygıtların endüstriyel üretiminde kullanılmıştır. İkinci olarak da metal yarıiletken ara yüzeylerinin tam olarak anlaşılması için yoğun bir çaba gösterilmiştir (Brillson 1982; Schottky 1938).

Cowley and Sze 1965'te yarıiletken yüzeylerin enerji durumlarını hesaba katarak metal-yarıiletken kontak sistemlerinin engel yükseklikleri için teori sunmuşlardır. Geppert ve arkadaşları 1966 da çeşitli sistemler için engel yüksekliğinin yayınlanan değerlerini kullanarak Schottky teorisinin doğruluğunu ve farklı yarıiletkenler üzerine Au, Ag, Cu, Al, Ni, In, Pt, Pd ve Mg gibi metallerin vakum biriktirme tekniği ile oluşturulan kontakların elektriksel ve optik özelliklerini incelemişlerdir. Bu tür çalışmalarla Schottky diyotların engel yüksekliklerinin, metalin iş fonksiyonu, yarıiletkenin elektron ilgisi ve yüzey durumu gibi parametrelere bağlı olduğu belirlenmiştir. Ancak yarıiletken altlıklar üzerine biriktirilen metal filmlerin etkin iş fonksiyonu kesin değildir. Araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar metalin iş fonksiyonu değerinin önemini vurgulamaktadır. Dahası yarıiletken yüzey durumlarının enerji dağılımı belirgin değildir. Bu faktörler teorilerin ve deneylerin kesin olarak ilişkilendirilmesinde bazı zorluklar sunmaktadır (Rhoderick and Williams 1988).

Yapılan bazı çalışmalarda yarıiletken üzerine biriktirilen alaşım metallerinin bileşenlerine bağlı olarak engel yüksekliklerinin çeşitliliği alaşımların iş fonksiyonunda ki değişime bakılarak yorumlanmıştır (Miura *et al.* 2004).

Son zamanlarda metal-silikon ara yüzeyinde oluşan Schottky engelinin deneysel çalışmaları engel yüksekliğini belirlemede ara yüzey durumlarının çok önemli bir rol oynadığını vurgulamaktadır. Örneğin Si üzerine epitaksiyel ve epitaksiyel olmayan NiSi_2 biriktirildiğinde engel yüksekliğinin 0,14 eV'luk bir farklılık gösterdiği görülmüştür. Ancak n-Si üzerine epitaksiyel olmayan NiSi_2 , NiSi ve Ni_2Si biriktirildiğinde benzer engel yüksekliklerine sahip olduğu bulunmuştur. Ara yüzey bileşimi Schottky engel yüksekliğinin ara yüzey durumlarından büyük ölçüde etkilendiği ifade edilmiştir (Tung *et al* 1991).

Doğal olarak bu durumlar Schottky engeli üzerindeki safsızlık etkileri ile ilgili soruya yol açmaktadır. Böyle bir safsızlık etkisi Si yüzeyindeki Fermi seviyesinin enerji aralığındaki değerini bir miktar değiştirebilir ve bu safsızlığın küçük bir miktarı engel yüksekliğini değiştirmek için yeterli olabilir. Bundan dolayı bir metal-Si ara yüzeyi boyunca metal, Si yüzeyi için safsızlık gibi kabul edilebilir (Muret 1982).

Ara yüzey durumlarına ve bileşenlere ek olarak engel yüksekliğini belirlemede metalin ara yüzeydeki kimyasal reaksiyonları da birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır (Brillson 1982).

Arızumı *et al.* (1968), Altın-Gümüş alaşım ince filmini, n-tipi silisyum üzerine vakum kaplama tekniği ile hazırlamışlardır. Kontakların karakteristiklerini akım-voltaj (I-V) ve kapasite-voltaj (C-V) ölçümleri ile incelemişlerdir. Sonuçlar, alaşımın bileşimine bağlı olarak engel yüksekliğinin $0,62 \pm 0,02 \text{ eV}$ dan $0,80 \pm 0,02 \text{ eV}$ a kadar lineer olarak değiştiğini göstermiştir. Bileşime bağlı olarak iş fonksiyonunun lineer olarak değiştiğini yorumlamışlardır.

Thompson *et al.* (1981), farklı yüzde oranlarda hazırlanan Gd-Pt ve Gd-V alaşımlarını n-tipi ve p-tipi Si yarıiletken üzerine buharlaştırarak farklı Schottky kontaklar elde etmişlerdir. Çeşitli ısıt işlemlerden sonra bu kontakların yapısal ve elektriksel özelliklerini X-ışını kırınımı (XRD), backscattering spektroskopisi ve I-V ölçümleri ile incelemişlerdir.

Babcock and Tu (1982), Ti-W (Ti, Ti_8W_2 , Ti_4W_6 , Ti_2W_8) alaşımlarındaki W konsantrasyonunu artırarak silisyumdaki kontak reaksiyonlarını ve Schottky engel yüksekliği üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. (XRD), Rutherford backscattering spektroskopisi ve taramalı elektron mikroskopunu (SEM) kontak reaksiyonlarını analiz etmek için kullanmışlardır. Schottky engel yükseklikleri diyotların I-V ölçümlerinden belirlenmiştir. Dört nokta prob ölçümleri de filmin elektriksel direncini hesaplamak için kullanılmıştır.

Okumura and Tu (1985), Tungsten ve Platinyum alaşımlar ile n-tipi GaAs üzerine Schottky kontaklar yapmışlardır. Schottky engel yükseklikleri, farklı oranlarda elde edilen alaşımlar için ($W_{50}Pt_{50}$ ve $W_{80}Pt_{20}$) I-V ve C-V ölçümlerinden hesaplanmıştır. C-V tekniği ile engel yüksekliğinin değeri $0,90 \pm 0,02$ eV olarak hesaplanmıştır ve $350^\circ C$ de 20 saat tavlamanın engel yüksekliği üzerinde hiçbir etkisinin olmadığı görülmüştür. Ancak tavlama ile I-V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliğinin $0,6$ eV'dan $0,7$ eV'a yükseldiği belirlenmiştir. Yapılan çalışmayla $W_{50}Pt_{50}$ alaşımının $W_{80}Pt_{20}$ alaşımına göre daha karalı olduğu tespit edilmiştir.

Aboelfotoh (1987), hem n-tipi hem de p-tipi Si(001) üzerine %23 Ti konsantrasyonuna sahip bir Ti-W alaşımını buharlaştırarak elde ettiği diyotların Schottky engel yüksekliğini I-V tekniğini kullanarak $170-295^\circ K$ sıcaklıklar arasında hesaplamıştır. Auger elektron spektroskopisi, Rutherford backscattering spektroskopisi ve XRD tekniği ile Si ve alaşım arasındaki reaksiyonları incelemiştir. Sonuçlar bu alaşım-Si sistemindeki ara yüzey reaksiyonlarından Ti difüzyonunu ve Si baskınlığını göstermiştir. Ayrıca engel yüksekliğinde Ti' un W den daha baskın olduğu görülmüştür.

Huang and Jean (1994), n-GaAs üzerine buharlaştırdıkları Ta ve Ta-Al alaşım metallerinin metalürjik kararlılığını ve elektriksel özelliklerini incelemişlerdir. Elektron tabancası ile Ta₅₅Al₄₅, Ta₃₇Al₆₃ ve Ta₃₀Al₇₀ alaşım filmlerini elde etmişlerdir. Kontaklara 400-900°C sıcaklık aralığında 20 saniye hızlı tavlama işlemi yapılmıştır. XRD, SEM ve Auger spektroskopisi ile alaşımların yapısal özellikleri çalışılmıştır. Schottky diyotların gövde direnci ve elektriksel özellikleri I-V ve dört nokta prob ölçümleri ile değerlendirilmiştir. Ta-Al alaşım metallerinin saf Ta metilden daha kararlı olduğu görülmüştür. Ta-Al/n-GaAs kontakları 900 °C ye kadar tavlandığında, kontakların ara yüzeylerinde oluşan reaksiyonlara rağmen ara yüzey parlaklığı, pürüzsüzlüğü ve kontakların metalürjik kararlılığının bozulmadığı görülmüştür. Ta/n-GaAs kontakların ise 600 °C'nin üstündeki sıcaklıklarda tavlandığında ara yüzey pürüzsüzlüğünü kaybettiği gözlemlenmiştir. Bütün temel olarak kararlı Ta-Al/n-GaAs diyotların Schottky engel yükseklikleri 700 °C'nin üstündeki tavlama sıcaklıklarında artmıştır. Tavlama sıcaklığının bir fonksiyonu olarak kontakların elektriksel özelliklerinin değişimi ara yüzeydeki difüzyon ve reaksiyonlarla bağdaştırılmıştır.

Huang and Pang (1997), n-GaAs üzerine yapılan Pd-Al alaşım Schottky kontakların termal kararlılığını XRD, kesit iletim elektron mikroskobu (XTEM) ve Auger derinlik profillemeye metotları ile araştırmışlardır. Schottky diyotların elektriksel karakteristikleri I-V ölçümleri ile değerlendirilmiştir. Pd₄₀Al₆₀, Pd₄₈Al₅₂, Pd₅₂Al₄₈ ve Pd₆₈Al₃₂ gibi dört farklı alaşım kompozisyonu çift elektron tabancalı buharlaştırma ile elde edilmiştir. Daha sonra kontaklar 500-1000 °C sıcaklıklarında 20 sn hızlı termal işlemle tavlansmıştır. n-GaAs üstüne büyütülen Al miktarı fazla olan filmlerin 1000 °C sıcaklığın üstünde kimyasal olarak daha kararlı olduğu görülmüştür. Ancak ne zaman ara yüzey difüzyonu belirginleşmiş ve ara yüzeyi pürüzlü olmaya başlamış, kontaklar da bozulmaya başlamış ve diyot karakteristikleri kötü bir durum sergilemiştir. Pd miktarı fazla olan filmler kimyasal olarak daha az kararlı ve ara yüzey reaksiyonu artan Pd içerik miktarı ile daha düşük sıcaklıklarda meydana gelmiştir. GaAs üzerine Pd-Al alaşım metalizasyonlarının hepsinin arasında en kararlı durumu Pd₄₈Al₅₂ kontağı sergilemiştir. 900 °C de 20 sn tavlanan Pd₄₈Al₅₂/n-GaAs Schottky diyot için engel yüksekliği 0,97 eV ve idealite faktörü 1,09 olarak elde edilmiştir.

Ayyıldız *et al.* (1999), NiTi/n-GaAs Schottky engel diyotlarını %50 Ni ve %50 Ti içeren NiTi alaşımlarının 10^{-5} tor basınçta vakum kaplama cihazında elde edilmesi ve liquid-encapsulated Czochralski metodu ile elde edilen Au-Ge(88%,12%) omik kontaklı n-GaAs üzerine NiTi alaşımlarının yaklaşık olarak 1 mm çapa sahip noktalar halinde buharlaştırılması ile elde etmişlerdir. Elde edilen NiTi/n-GaAs Schottky engel diyotları 100°C den 300°C ye kadar 5 dakikalık ve 350°C den 650°C ye kadar 1 dakikalık zaman dilimleri arasında tavlamışlardır ve I-V tekniğini kullanarak tavlama sıcaklığının etkisini incelemişlerdir. Bu kontaklar için engel yüksekliğinin artan tavlama sıcaklığı ile arttığını belirlemişlerdir.

Ayyıldız and Türüt (1999), Ni/-, Ti/-, ve NiTi alaşım/n-GaAs Schottky engel diyotlarını üretmişlerdir ve 50°C veya 100°C 'lik adımlarla $100-650^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında 5 dakika boyunca diyotları tavlamışlardır. ϕ_b ve n değerlerini Ni/-, Ti/-, ve NiTi alaşım/n-GaAs Schottky engel diyotları için sırasıyla 0.73, 0.64, 0.68 eV ve 1.02, 1.08, 1.10 olarak belirlemişlerdir. NiTi/n-GaAs diyodunun idealite faktörü 400°C tavlamaya kadar değişmeden kalırken 500°C 'den sonra 1.02 ye azaldığı gözlenmiştir. Aynı zamanda idealite faktörü 1'e yaklaşırken artan tavlama sıcaklığı ile engel yüksekliğinde de artma meydana gelmiştir. NiTi/n-GaAs diyodunun termal kararlılığı 500°C 'ye kadar yapılan tavlama işlemlerinde sabit kalmıştır. Sonuç olarak NiTi/n-GaAs kontakın Ni/n-GaAs ve Ti/n-GaAs tipi kontaklardan daha iyi performansa sahip olduğunu göstermişlerdir.

Gümüş *et al.* (2002), Moleculer-beam epitaxy (MBE) yöntemi ile elde edilen n-GaAs altlık üzerine CrNiCo alaşım Schottky kontaklarının I-V karakteristiklerini 130-330 K sıcaklıkları arasında ölçülmüşler ve ara yüzeyde etkili olan engel yüksekliğinin homojen olmamasından dolayı engel yüksekliklerini bir Gaussian dağılımının varsayımına bağlı olduğunu yorumlamışlardır. Daha sonra engel yüksekliğinde oluşan Gaussian dağılımının n idealite faktörünü artırdığını, Φ_B engel yüksekliğini azalttığını ve düşük sıcaklık değerlerinde aktivasyon enerjisinin lineer olmamasından sorumlu olduğunu belirlemişlerdir. Engel yüksekliğinin bir Gaussian dağılımının kanıtı olduğunu elde etmek için Φ_B-1/T grafiğini çizmişlerdir. Bu grafikten sırasıyla ortalama engel yüksekliği Φ_B ($T=0$)=1,02 eV, ve ters beslem standart sapma da $\sigma_0=0,105\text{V}$ olarak elde edilmiştir.

Aygıtın sıcaklığa bağlı I-V karakteristiklerinden, engel yüksekliğinin Gaussian dağılımı ile termoiyonik emisyon tekniğinin temeline dayandığı sonucuna varmışlardır. Düz band engel yüksekliğinin sıcaklık katsayısı için $-0,305 \text{ meV/K}$ değeri elde edilmiştir. GaAs için bu değer literatür ile çok yakın bir benzerlik göstermiştir.

Sağlam *et al.* (2004), Polianilin/p-tipi Si/Al yapısının karakteristik parametreleri üzerine yaşlanmanın etkilerini detaylı bir şekilde sunmuşlardır. Polianilin film anodizasyon işlemi ile bir p-tipi Si altlık üzerine elde edilmiştir. Polianilin/p-tipi Si/Al yapısı oda sıcaklığında alınan I-V eğrileri ile doğrultma özelliği göstermiştir. Yapının I-V eğrileri Polianilin/p-tipi Si/Al yapısı üretildikten 15, 30, 60, 90 ve 120 gün sonra ölçülmüştür. Polianilin/p-tipi Si/Al yapısının engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç gibi karakteristik parametrelerinin artan yaşlanma zamanı ile yavaşça değiştiği görülmüştür. Diyot arayüzey tabakasına atfedilen arayüzey durumları ve seri dirençten dolayı birden daha büyük bir idealite faktörü ile ideal olmayan bir davranış göstermiştir.

Sağlam *et al.* (2004), Polipirol/p-tipi Si/Al yapısının karakteristik parametreleri üzerine yaşlanmanın ya da zamana bağlılığın etkilerini detaylı bir şekilde sunmuşlardır. Polipirol film anodizasyon işlemi yoluyla bir p-tipi Si altlık üzerine elde edilmiştir. Polipirol /p-tipi Si/Al kontak oda sıcaklığında alınan I-V eğrileri ile doğrultma özelliği göstermiştir. Diyodunun I-V eğrileri Polipirol/p-tipi Si/Al kontak üretildikten 15, 30, 60 ve 90 gün sonra ölçülmüştür. Polipirol/p-tipi Si/Al yapısının engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç gibi karakteristik parametrelerinin artan yaşlanma zamanı ile yavaşça değiştiği görülmüştür. Buna ek olarak aygıtın ara yüzey durumunun yoğunluk dağılımı doğru beslem I-V karakteristiklerinden elde edilmiştir. Diyotta artan yaşlanma zamanı ile ideal olmayan I-V karakteristiği göstermesine sebep oksijenin ilk katkı maddesinin yerini alması gösterilmiş ve bu sürecin kesinlikle diyodunun yaşlanmasında önemli rol oynadığı tespit edilmiştir.

Güzeldir *et al.* (2011), Cd/CdS/n-Si/Au-Sb yapısını Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction (SILAR) metoduyla elde ederek bu yapının karakteristik parametrelerini zamana bağlı olarak incelemişlerdir. Yapının I-V, C-V ve kapasite-frekans (C-f)

karakteristiklerini yapı elde edildikten 1, 3, 5, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150 ve 165 gün sonra ölçmüşlerdir. Engel yüksekliği, idealite faktörü, seri direnç gibi yapının karakteristik parametrelerini I - V ölçümlerinden ve 500 kHz ve oda sıcaklığında alınan ters beslem C^2 - V ölçümlerinden hesaplamışlardır. Ayrıca ara yüzey yoğunluk dağılımını ve zaman sabitini yaşlanma zamanının bir fonksiyonu olarak Schottky Kapasitans Spektroskopi metodunu kullanarak C - f ölçümlerinden hesaplamışlardır. Cd/CdS/n-Si/Au-Sb yapısının engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç gibi karakteristik parametrelerinin artan yaşlanma zamanı ile hafifçe değiştiğini gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda yaşlanma zamanı ile aygıtın doğrultma oranının arttığını ve aygıtın I - V karakteristiklerinin zamanla daha iyileştiğini tespit etmişlerdir.

Jun *et al.* (2015) TiW alaşım/p-InP Schottky engel diyotlarını 300 K ile 400 K arasındaki farklı sıcaklıklar için I - V ve C - V ölçümlerini kullanarak incelemişlerdir. Engel yüksekliğini ve idealite faktörünü termiyonik emisyon (TE) teorisinden elde etmişlerdir. Artan sıcaklık ile engel yüksekliğinin arttığını ve idealite faktörünün azaldığını belirlemişlerdir. Buna ek olarak C - V özelliklerini seri direnç etkisini dikkate alarak incelemişlerdir.

Sağlam and Güzel (2016) Cu/CuS/n-GaAs/In yapısının elektriksel özellikleri üzerindeki yaşlanma etkilerini araştırmışlardır. CuS ince filmleri oda sıcaklığında, SILAR yöntemi ile n-tipi GaAs altlık üzerine biriktirmişlerdir. Filmlerin yapısal ve morfolojik özelliklerini SEM ve XRD teknikleri ile gerçekleştirmişlerdir. Cu/CuS/n-GaAs/In yapısının oda sıcaklığındaki $I - V$ ölçümlerini, aygıtın elektriksel karakteristiklerindeki değişimi, yaşlanma süresinin bir fonksiyonu olarak incelemek için gerçekleştirmişlerdir. Bu yapı için idealite faktörü (n), engel yüksekliği (Φ_B), seri direnç (R_s), sızıntı akımı (I_0) ve arayüz durumları (N_{ss}) gibi temel elektriksel parametreleri hesaplamışlardır. Sonuç olarak aygıtın elektrik parametrelerinin neredeyse değişmeden kaldığını gözlemlemişlerdir.

Taşer *et al.* (2017) Ag/n-Si/Ti, Cu/n-Si/Ti ve AgCu/n-Si/Ti Schottky diyotların idealite faktörü, engel yüksekliği, seri direnç, arayüzey hal yoğunluğu ve doğrultma oranı gibi

diyot parametrelerinde yaşlanma süresinin etkilerini araştırmışlardır. Ag/n-Si/Ti, Cu/n-Si/Ti ve AgCu/n-Si/Ti diyotlarının I-V karakterizasyonunu hemen karanlık koşullarda oda sıcaklığında yapmışlar ve yaşlanma süresinin etkilerini araştırmak için, diyotların I-V ölçümleri 1, 7, 15, 30 ve 90 gün sonra tekrarlamışlardır. Diyodunun karakteristik parametrelerini, yaşlanma süresine göre alınan I-V ölçümlerinden hesaplanmışlar ve sonuç olarak AgCu alaşımından yapılan diyodunun elektriksel özelliklerinin diğer iki diyottan daha kararlı olduğunu gözlemlemişlerdir.

Metal/yarıiletken kontakların elektriksel karakteristiklerinin kararlılıkları devre elemanı teknolojisinde büyük öneme sahiptir. Metal/yarıiletken kontaklara alternatif olarak, daha kararlı ara yüzeylere sahip alaşım/yarıiletken kontakların ortaya çıkması ile gözler alaşımlara çevrilmiştir. Alaşım yapmak metalin bazı özelliklerini değiştirmeyi ve hatta ona yeni özellikler kazandırmayı amaçlar. Saf metaller belirli özelliklere sahiptir. Bu nedenle sınırlı kullanım alanları vardır. Endüstrinin gerektirdiği sayısız özellikler (mukavemet, uzama, şekil alma, yüzey parlaklığı, elektrik ve ısı iletkenliği vb.) kazandırmak için alaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Alaşımların fiziksel ve kimyasal özellikleri onu oluşturan metallerinkinden tamamen farklı olabilir. Saf bir metal binde bir oranında başka bir metalle alaşım oluşturduğunda bazı özellikleri tamamen değişebilir.

Alaşımların bu özelliklerini kullanarak birçok alaşım/yarıiletken kontaklar üzerine çalışmalar yapılmıştır. Alaşım/yarıiletken kontakların uygulama sıcaklığı ve tavlama sıcaklığı altındaki yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında metal/yarıiletken kontaklardan daha kararlı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Alaşım/yarıiletken kontakları oluşturan alaşım bileşenlerinin oranlarının da kontak kararlılığında büyük rol oynadığı bilinmektedir (Aboelfotoh 1987; Gümüş *et al.* 2002; Jun *et al.* 2015).

Yukarıda özet olarak sunulan literatürden de anlaşılacağı gibi, çeşitli metaller ve alaşımlar doğrultucu kontakların üretiminde kullanılmıştır ve hâlâ kullanılmaktadır. Bu

alaşım/yarıiletken kontakların termal kararlılıkları (numune sıcaklığına veya termal tavlamaya bağlı olarak) çeşitli tekniklerle incelenmiştir. Fakat farklı oranlarda hazırlanan ikili ve üçlü alaşımlardan üretilen alaşım/yarıiletken doğrultucu kontakların elektriksel karakteristiklerinin zamana bağlı olarak incelenmesi řu ana kadar literatürde bulunmamaktadır. Alaşım oranlarının değişmesiyle alaşım/yarıiletken ara yüzeyindeki kimyasal reaksiyonlar değişebilir ve zamanla daha kararlı elektriksel karakteristiklere sahip diyotlar üretilir. Bu durum teknolojiye büyük kazanımlar sağlayabilir. İşte bu sebepten dolayı bu tez çalışmasında, kendi araştırma laboratuvarımızda farklı oranlarda ikili ve üçlü alaşımlar üretilerek bu alaşımlardan alaşım/yarıiletken diyotlar hazırlanmış ve elektriksel karakteristikleri zamana bağlı olarak incelenmiştir. Böylece diyot üretiminde kullanılabilecek alaşımların oranları tespit edilmeye çalışılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Giriş

Günlük hayatın her alanında kullandığımız malzemeler elektriksel iletkenliklerine göre; iletkenler (metaller), yarıiletkenler ve yalıtkanlar olacak şekilde kategorize edilirler. Malzemelerin iletkenliğini, örgü yapılarındaki parçacık yoğunluğu ve bunların katı içerisinde kazandıkları hareket kabiliyetleri belirlemektedir.

Mevcut malzemelerin gelişen teknoloji karşısında yetersiz kalmasından dolayı yapılan çalışmaların yeni yarıiletkenler üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Bu yapılanmanın en önemli sebeplerinden birisi yarıiletkenlerin tamamen iletken ve yalıtkan malzemelerden farklı özelliğe sahip olmasıdır.

Yalıtkan ve yarıiletken kristallerin iletkenlik özelliklerinin araştırılabilmesi, ancak, uygun kontakların kristallere uygulanması ile mümkündür. Kontak; kristal ile kristale uygulanacak olan kontak malzemesinin birbirlerine en az dirençle, idealde ise sıfır dirençle temas etmeleri olarak düşünülebilir. İdeal kontak, yüzeylerin temiz ve pürüzsüz olmasına bağlıdır (Rhoderick and Williams 1988).

2.2 Yarıiletken Malzemelerin Temel Özellikleri

Yarıiletkenler, yalıtkanlar ve metaller arasında elektriksel iletkenliğe sahip malzemelerdir. Bu iletkenlik sıcaklık değişimi, safsızlık kapasitesi ve optik soğurma ile değişiklik gösterebilir. Elektriksel özelliklerde ki bu değişim elektronik aygıtlarda kullanılan yarıiletkenler için temel özelliktir.

Yarıiletken malzemeleri elektriksel olarak karakterize edebilmek için yarıiletken malzemelerin temel özelliklerinin anlaşılması gereklidir. Bir yarıiletken malzemenin elektrik iletkenliği işgal edilmiş hallerde ki taşıyıcıların (iletkenlik bandındaki elektronlar ya da valans bandındaki hollerin) hareketi ile sağlanır. Bu elektron ve hollerin konsantrasyonu yarıiletken içine isteyerek katılan safsızlık miktarı ile kontrol edilebilir. Yarıiletkenler, atomlarının en yakın komşu atomlar arasındaki kuvvetli kovalent bağlarla bir araya getirilmesi ile diğer malzemelerden ayırt edilirler.

2.3 Valans ve İletkenlik Bantlarındaki Hallerin İşgal Edilmesi

Bütün katılar elektronlar içerir. Bunun yanı sıra yarıiletkenlerin elektriksel karakterizasyonu için elektronların uygulanan bir elektrik alana tepkisini bilmek gereklidir. Asal yarıiletkenlerde, valans bandındaki hallerin hepsini doldurmak için yeterince elektron vardır. İletkenlik bandı, valans bandından uyarılan elektronların çoğunu içerir. Aygıt üretimi için kullanılan bir yarıiletken malzemenin elde edilmesi için yarıiletken malzemeyi belirli safsızlık atomları ile katkılamak gereklidir. Genel olarak IV. grup n-tipi yarıiletken malzemeler, yarıiletken içine V. grubu elementlerin atomları eklenerek ekstra elektronların oluşturulması ile elde edilirler. Benzer olarak IV grubu p-tipi yarıiletken malzemeler, III grubu elementlerin eklenmesi ile yalnızca üç kovalent bağın tamamlanması ve boşlukların oluşturulması ile elde edilirler. Üzerine ışık düşürülen bir yarıiletken yasak enerji aralığındaki enerji seviyelerindeki kusurlar ile karşılaşabilirler. Serbest taşıyıcıların bazıları bu kusurlarda hapsolürler ve bu durum yarıiletkenlerin elektriksel özelliklerini değiştirebilir.

Yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronların toplamı

$$n = \int_{E_c}^{E_{top}} N(E)F(E) dE \quad (2.1)$$

eşitliği ile verilir. Burada $N(E)$ iletkenlik bandındaki durum yoğunluğu ve $F(E)$ belirli bir durumun işgal edilme ihtimaliyetidir.

E_{top} iletkenlik bandının en üst enerjisi ve E_c iletkenlik bandının en alt enerjisidir. Bir enerji halinin işgal edilme durumu Fermi Dirac dağılım fonksiyonu ile verilir;

$$F(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)} \quad (2.2)$$

Burada k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık ve E_F Fermi enerjisidir. İletkenlik bandındaki durum yoğunluğu aşağıdaki bağlantıdan hesaplanabilir (Zeghbroeck 2004):

$$N(E) = M_c \frac{\sqrt{2}}{\pi^2} \frac{(E - E_c)^{1/2}}{\hbar^3} (m_{de})^{3/2} \quad (2.3)$$

Bağıntıda M_c iletkenlik bandındaki minimum eşdeğer sayısı, $\hbar$ Plank sabiti ve m_{de} elipsoidal enerji yüzeyinin temel eksenleri boyunca etkin kütlelerin geometrik ortalamasıdır. Eşitlik (2.2) ve (2.3) kullanılarak ve eşitlik (2.1) integrali değerlendirilerek;

$$n = N_c \frac{\sqrt{2}}{\pi^2} F_{1/2} \left(\frac{E_F - E_c}{kT} \right) \quad (2.4)$$

eşitliği elde edilir.

N_c iletkenlik bandındaki durumların etkin yoğunluğu tanımlayan

$$N_c \equiv 2 \left(\frac{2\pi m_{de} kT}{h^2} \right)^{3/2} M_c \quad (2.5)$$

denklem ve $F_{1/2}(\eta_f)$ Fermi-Dirac integralidir. Boltzmann istatistik durumu için, diğer bir ifade, dejenere olmayan yarıiletkenlerde E_c 'nin birkaç kT altındaki Fermi seviyesi için, $\pi^{1/2} e^{\eta_f}/2$ integral yaklaşımı ile (2.4) eşitliği aşağıdaki gibi olur;

$$n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \quad (2.6)$$

Benzer argümanla valans bandındaki boşlukların konsantrasyonu

$$p = N_V \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{1/2}\left(\frac{E_V - E_F}{kT}\right) \quad (2.7)$$

bağıntısından bulunabilir. Burada N_V valans bandındaki durumların etkin yoğunluğu

$$N_V \equiv 2 \left(\frac{2\pi m_{dh} kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (2.8)$$

ve m_{dh} valans bandının etkin kütle durumlarının yoğunluğudur.

$$m_{dh} = \left(m_{lh}^{3/2} + m_{hh}^{3/2} \right)^{2/3} \quad (2.9)$$

Burada m_{lh} ve m_{hh} sırasıyla “hafif” ve “ağır” hallere işaret eder. Sonuç olarak valans bandındaki boşlukların yoğunluğu aşağıdaki şekilde verilir;

$$p = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right) \quad (2.10)$$

2.4 Yarıiletken Malzemelerin Elektriksel Özellikleri

Donör yoğunluğu (N_D), akseptör yoğunluğu (N_A), özdirenç (ρ), taşıyıcı ömrü (τ) ve mobilite (μ) gibi parametreler çoğunlukla yarıiletkenlerin elektriksel olarak karakterize edilmesinde önemlidir.

Toplam özdirenç iki katkının toplamı olarak verilebilir.

$$\rho = \rho_0 + \rho_i \quad (2.11)$$

Burada ρ_0 kirlilikten dolayı saçılmalara bağlı ve ρ_i fononlar tarafından saçılan elektronların sebep olduğu özdirençtir. Mobilite taşıyıcıların bir elektrik alan etkisi altında hareket edebildikleri kolaylığın bir ölçüsüdür ve saçılma olasılığının tersi ile orantılıdır. Eğer taşıyıcıların etkin yoğunluğu N ve özdirenç ρ biliniyor ise o zaman mobilite iletkenlik σ ile de ilişkilendirilerek aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\sigma = 1/\rho = q\mu N \quad (2.12)$$

burada q elektronik yüküdür.

2.4.1 Enerji bant yapısı

Yarıiletkenlere metallerin bant teorisi uygulanarak yarıiletkenlerin özellikleri başarılı bir şekilde açıklanabilir. Bir katıdaki elektronları tanımlamak için kuantum mekaniğinin uygulanmasının en önemli sonucu bandların içerisinde elektronların ve hollerin müsaadeli enerji seviyelerinin olmasıdır. En düşük enerji bandı ya da valans bandı (E_V) Pauli dışarlama prensibi yüzünden elektronlar ile tamamen doludur. En yüksek enerji bandı yalıtılmış atomdaki işgal edilmemiş en yüksek seviyelerden oluştuğu için, sıfır sıcaklıkta üst enerji bandı normal olarak boştur.

Mükemmel bir kristalde bant aralığı içinde enerji seviyesi olmadığından dolayı bu iki bant arasında ki enerji bölgesi yasak enerji aralığı ya da bant aralığı olarak isimlendirilir. Örneğin n tipinde elektronlar bazı kaynaklardan gelen enerji ile iletkenlik bandına geçerek elektriği geçirebilir. Bant aralığının genişliği bu geçiş için gerekli enerjinin miktarını belirler. Bundan dolayı bant aralığının genişliğine bağlı olarak bir malzeme

yalıtkan veya yarıiletken olarak sınıflandırılabilir. Bir takım araştırmacılar yarıiletkenleri optik geçiş deneyleri yardımı ile direkt veya indirekt bant yapılı malzemeler olarak sınıflandırmışlardır. En yaygın yarıiletkenlerin temel özelliklerinin yanı sıra enerji aralıkları değerleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Bazı yaygın yarıiletkenlerin temel özellikleri

Yarıiletken	Kristal Yapısı	Eg(eV)		Band Aralığı Tipi	Erime Noktası (K)	Mobilite(cm ² /V.s)	
		0 K	300 K			Elektron	Holl
GaAs	Cub. Z.B	1.52	1.42	D	1238	8500	400
Ge	f.c.c	0.74	0.66	I	937	3900	1900
Si	f.c.c	1.17	1.12	I	1415	1500	450
GaSb	Cub. Z.B	0.81	0.72	D	712	5000	860
GaP	Cub. Z.B	2.34	2.26	I	1460	110	75
AlSb	Cub. Z.B	1.68	1.58	D	1065	200	420
InAs	Cub. Z.B	0.42	0.36	D	942	33000	460
InSb	Cub. Z.B	0.23	0.17	D	530	80000	1250
InP	Cub. Z.B	1.42	1.35	I	1060	4600	150

I-indirekt ve D- direkt band aralığı
f.c.c- yüzey merkezli kübik yapı

2.4.2 Fermi seviyesi

Asal bir yarıiletken için Fermi seviyesi yasak enerji aralığının ortasına çok yakın yerlerde konumlanır. Kirlilik atomları girildiğinde yük nötrallığını korumak için Fermi seviyesi kendini ayarlamalıdır. Asal bir yarıiletken için iletkenlik bandındaki elektron sayısı valans bandındaki boşlukların sayısına eşittir.

Asal yarıiletken için Fermi seviyesi (2.6) ve (2.10) denklemleri yardımı ile

$$E_F = \frac{E_C}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{m_p}{m_n} \right) \quad (2.13)$$

şeklinde elde edilir.

2.4.3 Sığ (Shallow) haller

Sığ haller valans bandının yakınlarında akseptör halleri ve iletkenlik bandının yakınlarında donör halleri olarak bulunurlar.

2.4.4 Derin (Deep) haller

Derin haller yasak enerji aralığındaki sığ (shallow) seviyelerinden daha derine konumlandırılmasına göre sınıflandırılırlar. Derin haller ışımsız rekombinasyon merkezleri olma eğilimi gösterirler. Kapasitans temelli teknikler dahil olmak üzere çeşitli teknikler bu hallerin elektriksel karakterizasyonu için fırsatlar sunmaktadır.

2.4.5 Safsızlıklar ve kusurlar

Bir yarıiletkende bulunan az miktardaki safsızlık yarıiletkenin elektronik özelliğini şiddetli bir şekilde etkiler. Bu olay yarıiletken teknolojinin temelini oluşturur. Yarıiletkenlerdeki kirlilikler iki tiptir. Birincisi iletkenlikten sorumlu ve sahip oldukları enerji seviyeleri yasak enerji aralığı içinde iletkenlik ya da valans bandına yakın sığ enerji seviyelerine sahip kirlilikler. Bunlara dopant kirlilikleri denir.

Ana atomun periyodik tabloda sağ tarafındaki elementlerden gelen dopant atomları, ana atomlardan daha fazla eşleşmemiş valans elektronlarına sahip olması ve yarıiletkeni n tipi yapmasından dolayı donör atomları olarak adlandırılırlar. Ana atomun periyodik tabloda sol tarafında kalan elementlerden gelen dopant atomları ise, yerel bağlanma gereksinimini karşılama amacıyla ana atomdan elektron alırlar ve yarıiletkeni p tipi yapmasından dolayı akseptör atomları olarak adlandırılırlar.

İkinci tip kirlilikler, bant kenarına doğru uzanan enerji seviyelerine sahip ve genellikle derin kusur halleri, tuzaklar, rekombinasyon merkezleri, jenerasyon merkezleri, derin

seviyeler ya da derin kirlilikler olarak adlandırılan kirliliklerdir. Nötral bir yarıiletken malzemede bir elektron tuzağı elektron yakalama oranının hol(boşluk) yakalama oranından daha büyük olduğu bir kusur olarak tanımlanır. Aksine bir rekombinasyon merkezi hem elektron hem de boşluk yakalama oranları büyük olan bir kusur olarak tanımlanır.

Kusurlar, atomik boyutta lokalize olan atomlar arasında boş kalan atom boşlukları ve atomlar arasında fazladan bulunan atomlardır. Bir Frenkel kusuru bir atomun örgü yapısından çıkartılması ve daha sonra örgü yapısı içinde ara bir konuma yerleştirilmesi esasına dayanarak oluşur. Böylece bir boşluk-ara yer çifti oluşur. Bu kusur diğer kusurların oluşumunda önemli bir rol oynayabilir. Bir Frenkel kusurunun oluşması adına bir yerdeğiştirme ortaya çıkması için belirli bir minimum enerji örgü atomuna iletilmelidir.

Termal emisyon özellikleri bakımından bu kusurlar çoğunluk veya azınlık taşıyıcı tuzakları olarak tanımlanabilirler. Bir çoğunluk taşıyıcısının termal emisyon oranı bir azınlık taşıyıcısının termal emisyon oranından çok daha büyük olduğu yerde kusur çoğunluk taşıyıcı tuzağı olarak tanımlanır. Bir azınlık taşıyıcı tuzağı tam tersi bir tanıma sahiptir. Bu tanımlardan açıkça görülmüştür ki bir elektron tuzağı p tipi malzemelerde azınlık taşıyıcı tuzağı iken n tipi malzemelerde çoğunluk taşıyıcı tuzağıdır.

2.5 Silisyum Yarıiletkeninin Fiziksel ve Malzeme Özellikleri

Çeşitli nedenlerden dolayı önemli olduğu için günümüzde çok bilinen ve kullanılan yarıiletken malzeme periyodik tabloda IV grupta bulunan ve yaklaşık olarak 1.1 eV'luk enerji aralığına sahip silisyumdur (Si). Silisyum diyotlar, transistörler ve entegre devreler gibi elektronik aygıtların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır.

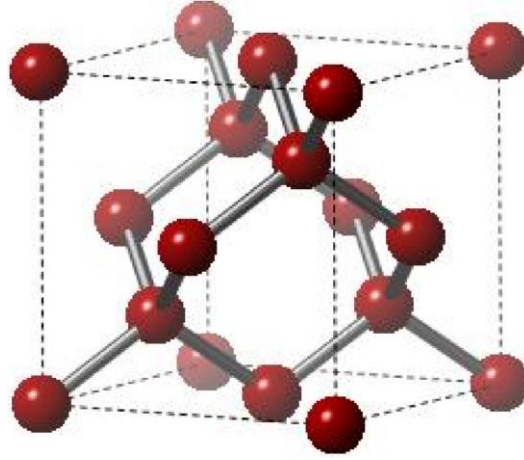
Silisyum yarıiletkeninin bazı fiziksel ve malzeme özellikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Silisyum yarıiletkeninin bazı özellikleri

ÖZELLİKLERİ	
ERİME NOKTASI (°C)	1420
KAYNAMA NOKTASI (°C)	2355
SERTLİK	6.5
ÖZGÜL ISI SIĞASI (J/G.K)	0.7
ISI İLETKENLİK (W/M.K)	150
ÖRGÜ PARAMETRESİ (NM)	0.543
YOĞUNLUK (G/CM ³)	2.33
YASAK BANT ARALIĞI, 300 K (EV)	1.1
ELEKTRONLARIN MOBİLİTESİ, 300 K (CM ² /V.S)	1350
HOLLERİN MOBİLİTESİ, 300 K (CM ² /V.S)	480
ÖZDEN YÜK TAŞIYICILARININ KONSANTRASYONU, 300 K (CM ⁻³)	1.5x10 ¹⁰
DİELEKTRİK KATSAYISI	12
KIRILMA İNDİSİ	3.9
MOLAR HACMİ	12.06 mL /mol
ÖZİSİ (300 K)	4.8 cal /mol°C
BUHARLAŞTIRMA ISISI	71 kcal /mol
BUHAR BASINCI (1000°C)	1.33 x 10 ⁻⁵ Pa

2.5.1 Kristal yapısı

Saf kristal silisyum saydam olmayan koyu gri renkli, parlak, sert ve kırılğan bir yapıya sahiptir. Silisyum kristal ve kübik yapısı bakımından elmasa benzerlik gösterir ve yüzey merkezli kübik bir yapıya sahiptir. Elmas yapısında kristalleşen silisyumun örgü sabiti $a=5,43 \text{ Å}$ 'dur. Şekil 2.1 de silisyumun kristal yapısının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.1 Silisyumun kristal yapısı.

2.5.2 Elektriksel ve optik özellikleri

Elektriksel özellikleri:

Katı cisimler elektrik özelliklerine (özdirencine) göre; iletkenler, yalıtkanlar ve yarıiletkenler olmak üzere üçe ayrılırlar. İletkenlerde sıcaklık arttıkça iletkenlik azalırken yarıiletkenlerde artmaktadır. $T = 0 \text{ K}$ ’ de iyi birer yalıtkandırlar ve elektriksel özdirençleri oda sıcaklığında 10^{-4} - $10^{10} \text{ } (\Omega\text{cm})$ arasında değişmektedir (Caferov 2000). Bazı katkı atomları yarıiletken malzemeye katılarak istenilen özelliklerde yarıiletkenler elde edilebilir.

Günümüzde en çok bilinen ve kullanılan yarıiletken, Si atomu periyodik tablonun IV. grubunda yer aldığından periyodik tablonun V. grup elementlerinden (As, Sb, P, N) biri ile katkılandığında, n-tipi Si elde edilir. V. Grup elementlerinin son yörüngelerinde bulunan beş değerlik elektronu Si atomunun son yörüngesinde bulunan dört değerlik elektronu ile kovalent bağ kurar, geriye kalan elektron ise katkı atomuna zayıf elektriksel kuvvet ile bağlıdır ve çok kolay iyonlaşır. Katkı atomu Si kristaline bir elektron vermiş olduğundan dolayı bu elektron örgü içinde serbest hareket edebilir. Elektron veren katkı atomu donör (verici), donör atomları ile katkılanmış Si ise n-tipi olur.

Donör atomlarının yarıiletken içerisinde bulundukları enerji düzeyi yasak bant aralığında ve iletim bandı alt sınırı yakınındadır. n-tipi yarıiletkende donörün iyonlaşmasıyla değerlik bandında boşluk oluşmaz. Donör konsantrasyonuna bağlı olarak n-tipi yarıiletkende elektron konsantrasyonu boşluk konsantrasyonundan büyük olacağından, elektriksel iletkenlikte elektronların rolü daha fazla olacaktır. Bu nedenle n-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlar (n) azınlık yük taşıyıcıları ise boşluklardır (p).

Donör enerji düzeyi E_d ,

$$E_d = \left(\frac{1}{\epsilon_s}\right)^2 \left(\frac{m_e^*}{m_e}\right) E_H \quad (2.14)$$

bağıntısı ile verilir.

Burada; ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, m_e elektronun kütlesi, m_e^* elektronun etkin kütlesi ve E_H hidrojen atomunun iyonlaşma enerjisidir (13.6 eV).

Si atomu periyodik tablonun IV. grubunda yer aldığından periyodik tablonun III. grup elementlerinden (In, Ga, Al, B) biri ile katkıldığında, p-tipi Si elde edilir. III. grup elementlerinin son yörüngelerinde bulunan üç değerlik elektronu Si atomunun son yörüngesinde bulunan dört değerlik elektronundan üçü ile kovalent bağ kurar. III. grup atomun bir elektron eksikliği olduğundan atomun elektron bağlarından biri boş kalır ve oluşan bu boşluğa Si'dan kapılan bir elektron yerleşir. Böylece boşluk, elektronun yerine geçer. Katkı atomu Si kristalinden bir elektron almış olduğundan akseptör (alıcı), akseptör atomları ile katkılanmış Si atomu ise p-tipi olur.

Akseptör atomlarının yarıiletken içinde bulundukları enerji düzeyi, yasak bant aralığında ve değerlik bandı üst sınırı yakınındadır. p-tipi yarıiletkende akseptör atomunun değerlik bandından bir elektron koparmasıyla değerlik bandında boşluk oluşur. Ancak bu boşluğa

karşılık iletim bandına bir elektron çıkmaz. Akseptör konsantrasyonuna bağlı olarak p-tipi yarıiletkenlerde değerlik bandındaki boşluk konsantrasyonu iletim bandındaki elektron konsantrasyonundan büyük olacağından, elektriksel iletkenlikte boşlukların rolü daha fazla olacaktır. Bu nedenle p-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk yük taşıyıcıları boşluklar, azınlık yük taşıyıcıları ise elektronlardır (Ceylan 2005).

Akseptör enerji düzeyi E_a ,

$$E_a = \left(\frac{1}{\epsilon_s}\right)^2 \left(\frac{m_h^*}{m_h}\right) E_H \quad (2.15)$$

burada;

ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, m_h boşluğun kütlesi, m_h^* boşluğun etkin kütlesi ve E_H hidrojen atomunun iyonlaşma enerjisidir (13.6 eV).

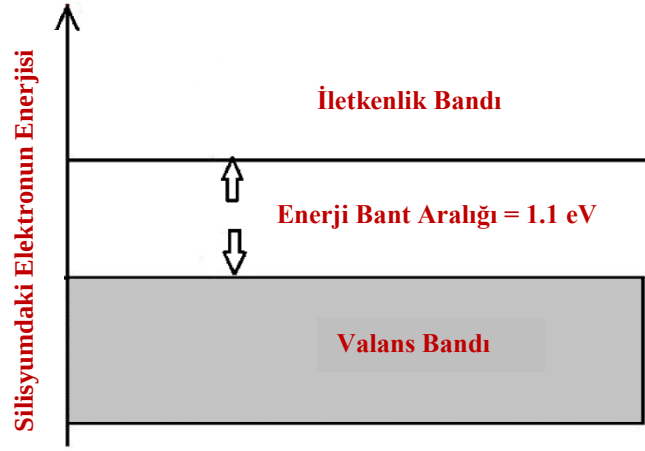
Bir yarıiletkeninde, elektriksel iletkenliğe elektronlar ve boşluklar birlikte katkıda bulunurlar.

$$\sigma = (nq\mu_e + pq\mu_h) \quad (2.16)$$

Burada n elektronun yoğunluğu, p boşluğun yoğunluğu, μ_e elektronun mobilitesi, μ_h boşluğun mobilitesi, q elektronun yükü ve σ elektriksel iletkenliktir.

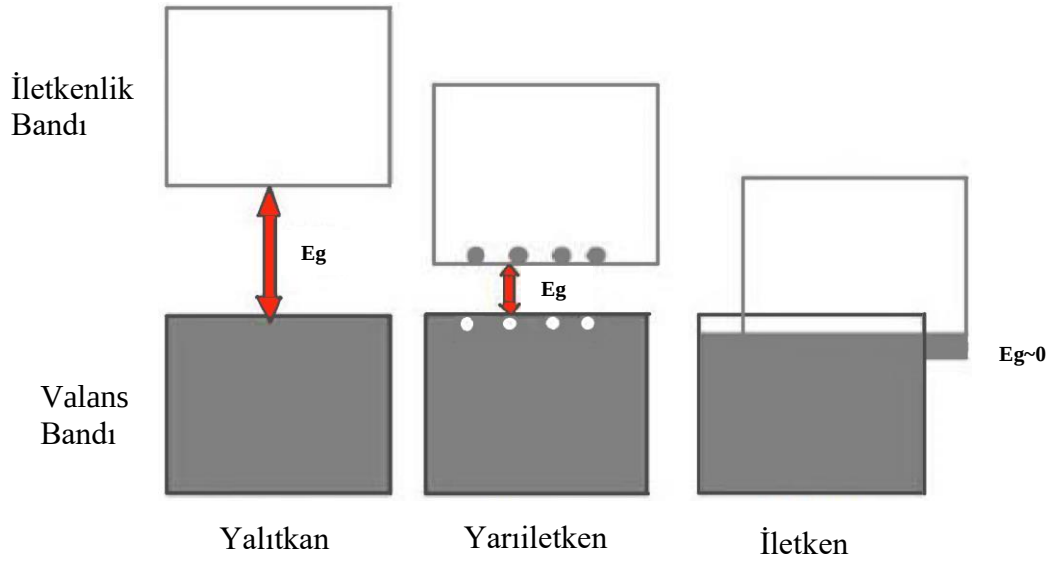
Optik özellikleri:

İletim bandının taban ve değerlik bandının tavan enerjilerinin farkı yarıiletkenin yasak enerji bant aralığı olarak bilinmektedir.



Şekil 2.2 Silisyum yarıiletkenin yasak enerji aralığı.

İyi iletkenlerde yüksek yük taşıyıcı yoğunluğu vardır, yalıtkanlarda ise yük taşıyıcı yoğunluğu hemen hemen sıfırdır. Yarıiletkenler teknolojik malzemelerin önemli bir grubunu oluştururlar ve yük taşıyıcı yoğunlukları, yalıtkanlarla iletkenler arasındadır. Şekil 2.3’de yalıtkan, yarıiletken ve iletken malzemelere ait bant diyagramları verilmiştir.



Şekil 2.3 Yalıtkan, yarıiletken ve iletken malzemelerin enerji bant diyagramı.

Yarıiletkenlerin bant aralıkları sıcaklık artıka azalma eğilimindedir. Bunun nedeni ısııl enerjinin artmasıyla atomik titreşimlerin genliğinin artması dolayısıyla atomların arasındaki aralığın büyümesidir. Bu etki malzemenin genleşme katsayısıyla ölçülür.

Artmış olan atomlar arası uzaklık malzemedeki elektronlar tarafından görülen ortalama potansiyeli azaltır, böylece enerji bant aralığı azalmış olur. Si, Ge ve GaAs yarıiletkenlerinin farklı sıcaklıklardaki yasak enerji aralıkları değerleri Çizelge 2.3’de verilmiştir.

Çizelge 2.3 Germanyum (Ge), Silisyum (Si) ve Galyum Arsenik (GaAs) için farklı sıcaklıklarda enerji bant aralıkları

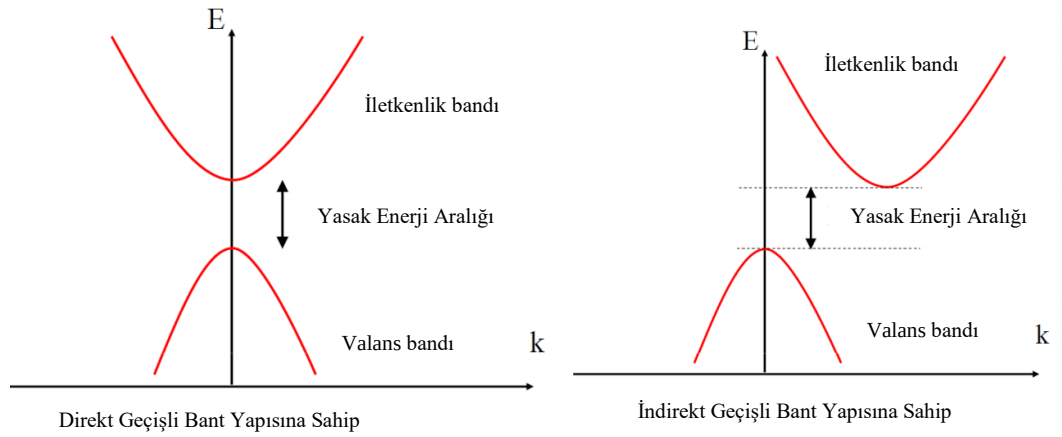
T(K)	Germanyum (eV)	Silisyum (eV)	Galyum Arsenik (eV)
300	0.66	1.12	1.42
400	0.62	1.09	1.38
500	0.58	1.06	1.33
600	0.54	1.03	1.28

Yarıiletkendeki temel soğurma olayında, yarıiletken malzeme üzerine gelen bir fotonun enerjisi yarıiletkenin yasak enerji aralığına eşit veya ondan büyük olduğunda, bu foton yarıiletkenin valans bandındaki bir elektron tarafından soğurularak bir elektron-boşluk çifti oluşturulur. Böylece değerlik bandındaki bir elektron iletkenlik bandına geçer. Bir fotonun momentumu h/λ (λ : ışığın dalga boyu), kristalin momentumu h/a (a , örgü sabiti) ile karşılaştırıldığında çok küçük olduğundan foton soğurma esnasında elektronun momentumu korunmalıdır.

Valans bandındaki elektronun iletkenlik bandına geçişi direkt ve indirekt geçişler olmak üzere iki şekildedir.

Direkt bant yapılı yarıiletkenlerde iletkenlik bant kenarının en alt noktası ile valans bandının en üst kenarı enerji momentum uzayında $k=0$ değerinde bulunmaktadır. Direkt bant geçişinde valans bandında bulunan bir elektron, yarıiletkenin yasak enerji aralığına eşit veya bu değerden daha büyük olan bir fotonu ($h\nu \geq E_g$) soğurarak iletkenlik bandına geçer. Bu geçiş sonrasında valans bandında bir boşluk meydana gelir. Geçiş sırasında elektronlar dalga vektörlerini değiştirmezler ve $k=0$ ’da momentumu korunur.

İndirekt bant geçişlerinde iletim bandının minimumu ile valans bandının maksimumu enerji-momentum uzayında aynı k değerine sahip olmadığından ($\Delta k \neq 0$) elektron, valans bandının üst sınırından iletim bandının alt sınırına doğrudan (direk) geçiş yapamaz. Valans bandından iletim bandına bir elektronun momentumunu koruyarak geçiş yapabilmesi için bir fotonun soğurulması ve ardından da bir fononun salınması veya saçılması gerekir. Foton, elektronun iletim bandına geçebilmesi için yarıiletkenin yasak enerji aralığı değeri kadar ya da bu değerden daha büyük olan gerekli enerjiyi sağlarken, fonon bu geçişte momentum korunumu için gerekli momentumu sağlar. Bir yarıiletkende direkt ve indirekt bant yapısı Şekil 2.4’de gösterilmektedir. Silisyum indirekt geçişli bant yapısına sahip bir yarıiletkendir.



Şekil 2.4 Bir yarıiletkende direkt ve indirekt bant yapısı.

2.6 Yarıiletken Yüzeyleri

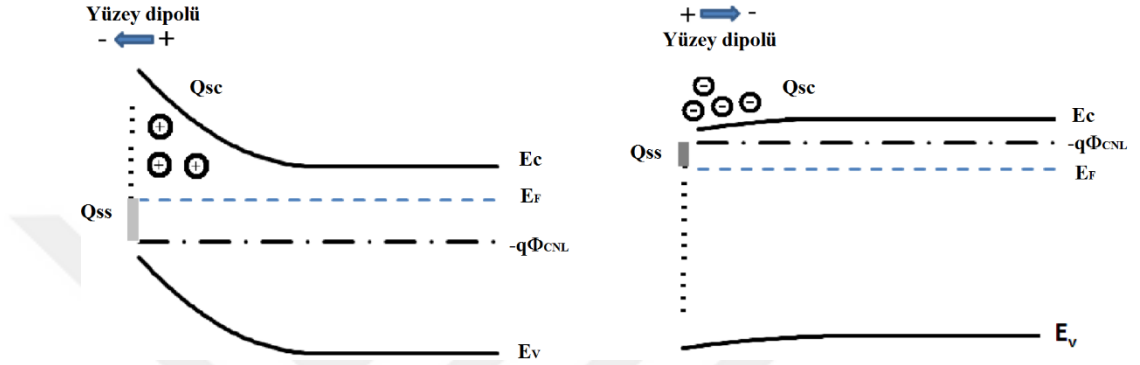
Yüzey, yarıiletken aygıtların genellikle elektronik özelliklerini belirlemede önemli bir rol oynar. Yüzey kristalin periyodik yapısının kesildiği, temelde kusurların olduğu yerdir. Henüz bölünmüş bir wafer gibi pasifleştirilmemiş bir yüzey dengesiz enerji durumunu temsil eden çok sayıda boş bağlara sahiptir. Bu şartlar altında yüzey daha düşük enerjili bir yüzey yapısı oluşturmak için kendiliğinden yeniden yapılandırılabilir. Yüzeyin yeniden yapılanması yük nötrallliğini korumaya duyulan ihtiyaç ve kimyasal bağlar ile belirlenerek oluşturulur (Duke 1996). Örneğin silikon dört değerlikli ve sp^3 orbitallerini

kullanarak kovalent bağlanır. $\langle 111 \rangle$ yönelimine sahip bir tek kristal silisyum yüzeyindeki yüzey atomlarının tetragonal bağları bir sp^2 hibritleşmesi ve bir yalın çift (bağ yapmamış bir elektron) oluşturulacak şekilde koparılır. Yalın çift bir bağ çifti ile kıyaslandığında yüksek bir enerjiye sahiptir ve toplam yüzey enerjisine katkıda bulunur. Ayrıca yalın çift sp^3 orbitalleri ile etkileşir ve tetrahedral yapıyı bozar. Buna karşılık olarak yüzey serbest enerjisini en aza indirmek için ve ayrıca toplam yük nötrallığını sağlamak için yüzey yeniden yapılanma eğilimi gösterir. Büyütme şartları, yabancı kirlilikler ve kusurlar tarafından oluşturulan kinetik kısıtlamalar yüzeyin son atomik yapısını etkileyebilir.

Bir yarıiletken yüzeyi doğal olarak bazı yüzey durumlarını içerir ve bu durumlar yarıiletken yüzeyin karakteristikleridir. Yüzeydeki atomik ve elektronik yapı ayrıntılarına bağlı ayırık enerji durumları yarıiletkenin bant aralığı içine dağılabilir. Yüzey durumları iletkenlik bandının minimum (CBM) değerine daha yakın olan donör tipinin yoğunluğu ile ya donör ya da akseptör tipi olabilir. Diğer yandan akseptör durumları valans bandının minimum (VBM) değerine yakın daha yoğun olma eğilimi gösterirler ve bant aralığı içinde belirli bir konumda bu donör durum yoğunluğu ile akseptör durum yoğunluğu denk gelir. Bu kesişme noktası yük nötrallığı seviyesi (CNL) olarak bilinir ve heteroeklem ve ara yüzey fiziğinde önemli bir anlama sahiptir.

Asal Fermi enerji seviyesi ve CNL arasındaki bağıl farkı yarıiletken yüzeyde bulunan asal bant bükülmesi, yük durumu ve yükün mevcut büyüklüğü belirler. CNL Fermi seviyesi altında olduğu zaman pozitif yük yüzey durumu içinde depolanır ve n tipi bir yarıiletken için biraz aşağı doğru bant bükülmesi ve yüzey yükü birikimi ile sonuçlanır. Aksine CNL Fermi seviyesinin üstünde olduğu zaman yüzey durumu içinde net bir negatif yük görülür ve sonuç olarak bantların yukarı doğru bükülmesi sonucu yüzey tükenmiş durumda olur (Moormann *et al.* 1979). Şekil 2.5'te tartışılan iki farklı durum gösterilmektedir. Yarıiletken içinde indüklenen yük Q_{sc} ile birlikte yüzey durumlarında depolanan yük Q_{ss} bir yüzey dipol tabakası oluşturur. CNL Fermi seviyesindeki konuma denk geldiğinde düz bant durumu ortaya çıkar. Fakat çoğu yarıiletkende CNL ya yüzeyin tükenmesi ya da birikmesi durumuna göre yaklaşık 10 eV yükselme ile Fermi seviyesinden farklıdır.

Yüzey dipolünün büyüklüğü ve yönü yarıiletken bant yapısına, yarıiletkenin büyümesine ve yüzey hazırlama şartlarına bağlıdır. Doğal yüzeyin karmaşık atomik ve elektronik yapısı üzerine yüzey özelliklerinin bağımlılığı dışında, yüzey özellikleri yarıiletken üzerine bir metal tabakasının oluşturulmasıyla da etkilenebilir.



Şekil 2.5 Yüzey tükenme ve yığılma koşulları altında bant bükülmesi ve yüzey dipolü

2.7 Schottky Diyotların Teorisi ve Çalışması

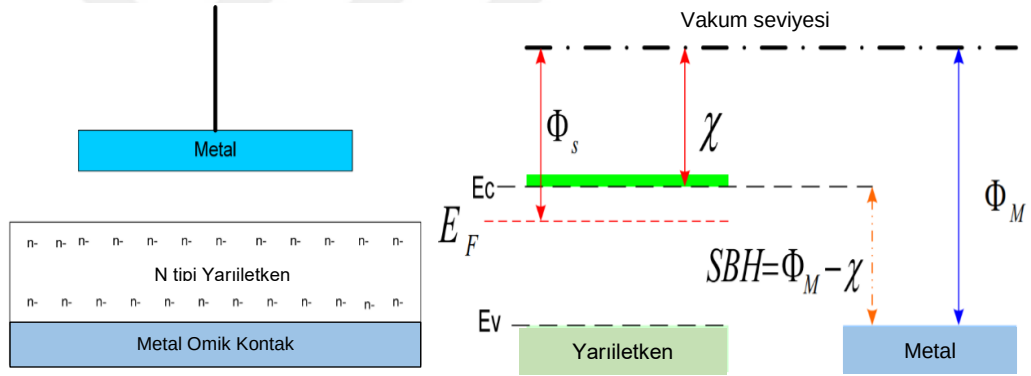
Nokta kontak diyotlar yapılan katıhal yarıiletken aygıtların en eskilerindendir. Diyotların bu tipleri yarıiletken yüzeyine metalin temas ettirilmesi ile elde edilir. Nokta kontak diyot daha sonra yaklaşık olarak 1938’de diydunun çalışması ile alakalı bir teori ortaya koyan Walter H. Schottky tarafından incelenmiştir. Sonradan bu aygıt, katkısından dolayı onuruna Schottky diyot adı verildi. Bu diydunun üretiminin kolaylığından dolayı Schottky diyot yarıiletken üretiminde deneysel süreçlerin test edilmesinde mükemmel bir seçimdir.

Bu çalışma için, yarıiletken olarak n-tipi Si kullanılmıştır. Bu aygıtın diğer yarısını oluşturan metal daima bol miktarda serbest elektron yük taşıyıcılarına sahiptir. Metal ayrıca bir elektronun atomdan vakum seviyesine çıkması için gerekli enerji olan iş fonksiyonu Φ_m ’ye sahiptir. Şekil 2.6’da ayrı ayrı hem metalin hem de yarıiletkenin özellikleri gösterilmiştir. Metalden yarıiletken malzemeye yük taşıyıcısı aktarmak için gereken potansiyel enerji elektron volta (eV) ile ölçülen Schottky engel yüksekliğidir.

Schottky engel yüksekliği değeri metalden bir elektronun yarıiletken tarafına geçebilmesi için gerekli enerjiye karşılıktır. Aşağıdaki (2.17) eşitliği ile bir Schottky diyot için Schottky engel yüksekliği hesaplanabilir. Bu bağıntıdanda görüldüğü gibi engel yüksekliği metal iş fonksiyonuna ve yarıiletken elektron ilgisine bağlıdır.

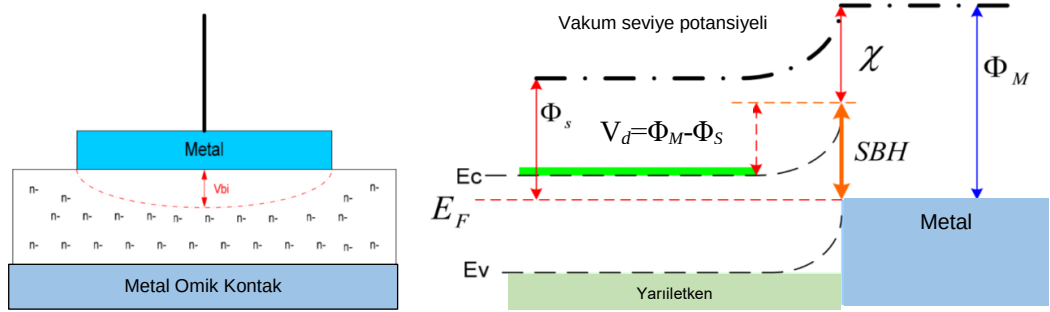
$$\Phi_B = \Phi_M - \chi \quad (2.17)$$

Yani ideal bir diyot için Schottky engel yüksekliği sabittir. Bu değer metal ve yarıiletkenin bileşimine özgüdür. İdeal olarak bu düz beslem voltajı ya da akım akışı ile değişmez. Bununla birlikte, SBH düşmesi olgusu, elektrik alanın artması nedeniyle ters yönde meydana gelebilir (Zeghbrouck 2004).



Şekil 2.6 Metal yarıiletken kontakta önce Schottky engel yüksekliği bant diyagramı

Metal ile yarıiletken kontak haline getirildiği zaman iki malzemenin de Fermi enerji durumları dengede değildir ve seviyeler dengeye ulaşmak için yükler hareket ederler. Daha basit bir anlatımla n tipi yarıiletkendeki elektronlardan bazıları metal içine geçerler, geride deplasyon bölgesi olarak adlandırılan serbest yük taşıyıcılarının olmadığı bir bölge bırakırlar ve bu bölgeyi geçmek için gerekli enerji difüzyon potansiyeli olarak bilinir. Bu kavram Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Metal yarıiletken kontakta difüzyon potansiyeli bant diyagramı

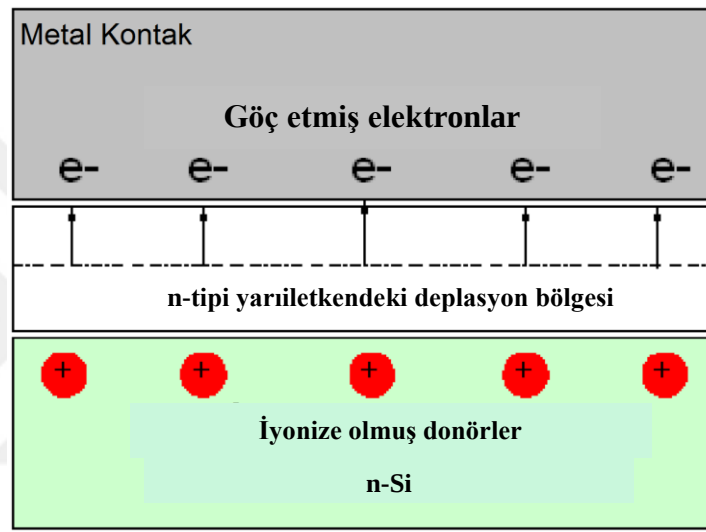
Ayrıca denge kontak potansiyeli olarak ta adlandırılan difüzyon potansiyeli (Fermi seviyeleri dengeye ulaştığında oluşan) V_d yarıiletkenin iletkenlik bandından metale daha fazla yük hareketini önleyen mekanizmadır. Bu difüzyon potansiyeli V_d yarıiletkenin ve metalin iş fonksiyonları farkıdır.

$$V_d = \Phi_m - \Phi_s \quad (2.18)$$

Difüzyon potansiyeli V_d , uygulama voltajı ve katkı konsantrasyonu deplasyon bölgesinin genişliğinde büyük bir rol oynar. Bu deplasyon bölgesi taşıyıcı yüklerden arındırılması ile yarıiletken içerisinde temel olarak bir yalıtkan tabaka gibi davranır. Deplasyon bölgesinin genişliği hem difüzyon potansiyeli hem de katkı konsantrasyonu ile ilişkilidir. Burada V_a , N_a ve N_d akseptör/donör taşıyıcı konsantrasyonları ile uygulanan beslem voltajıdır ve bu voltaj n-materyalindeki elektronların metal içerisine göç etmesinden ve yarıiletken içinde deplasyon bölgesinin oluşmasından sorumludur. n tipi yarıiletken metal içine geçen elektronlar (donörler) ve yarıiletken içerisindeki deplasyon bölgesinde pozitif elektrik akseden (akseptör) bir potansiyele sahip olduğu var sayımı ileri sürülmüştür. Böylece pn eklemler için verilen eşitlik (2.19) $N_a=N_d$ durumunda Schottky diyodunun modellenmesi için de kullanılabilir (Streetman 1990).

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon(V_d - V_a)}{q} \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right)} \quad (2.19)$$

Aşağıdaki Şekil 2.8'in gösterimi metal içinde aksedilen elektrik alandan dolayı N_a katkı konsantrasyonunun neden N_d ye eşit olabileceğini düşünmemize yardımcı olur (Zeghbrouck 2004). Bu deplasyon genişliği elektrik akımının geçmesine veya engel olmasına izin verecek şekilde ağıta uygulanacak bir potansiyel ile ayarlanabilir. Bir düz beslem voltajı V_a Schottky diyoda uygulandığı zaman yarıiletken materyalin iş fonksiyonu Φ_s azalır ve böylece difüzyon potansiyeli de azalır.



Şekil 2.8 Schottky kontak deplasyon bölgesinin aksedilen elektrik dipol potansiyelleri.

Diyot boyunca üstel akım aşağıdaki (2.20) eşitliği yardımı ile modellenenabilir. Diyot boyunca ilerleyen akım uygulama voltajı V_a 'ya üstel olarak bağlıdır. I_0 doyma akımı denge koşullarında hem eşit hem de zıt akımlar ile deplasyon bölgesinde oluşur, böylece

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV_a}{kT}} \right) \quad (2.20)$$

denklemini yazılabilir (Streetman 1990).

Şekil 2.9'da doğru beslenmiş diyodunun enerji bant diyagramı gösterilmiştir. Deplasyon bölgesi düz beslem boyunca azalır ve elektronlar Schottky engeli üzerinden geçerek n tipi

yarıiletken malzemeden metal kontak içerisine doğru hareket ederler. Yarıiletkenin Fermi seviyesi enerji bant diyagramında uygulanan voltaj değeri ile birlikte yükselir. Unutulmamalıdır ki yarıiletken altındaki metal lineer bir akım voltaj ilişkisine sahip omik kontak için hazırlanmıştır ve Schottky diyot akımının ideal analizinde önemli bir rol oynamayan çok küçük bir dirence sahiptir (Zeghbroeck 2004).

Schottky kontağın ters beslem modunda uygulanan voltaj difüzyon potansiyelini güçlendirir ve yarıiletken içerisinde daha geniş bir deplasyon bölgesi oluşturur. Daha büyük negatif değerli uygulama voltajları

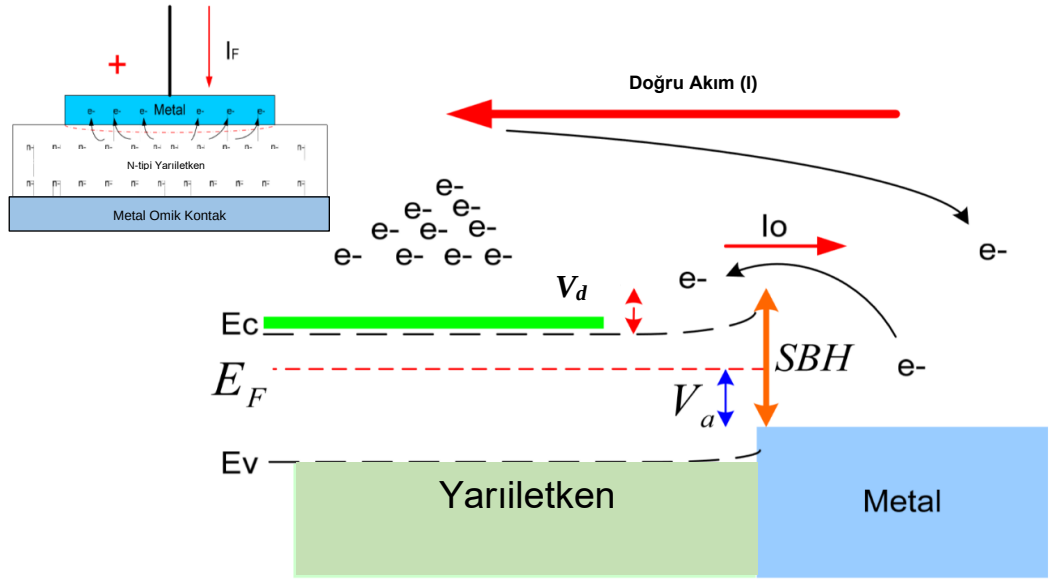
$$I_R = -I_0 \quad (2.21)$$

olmasını sağlar.

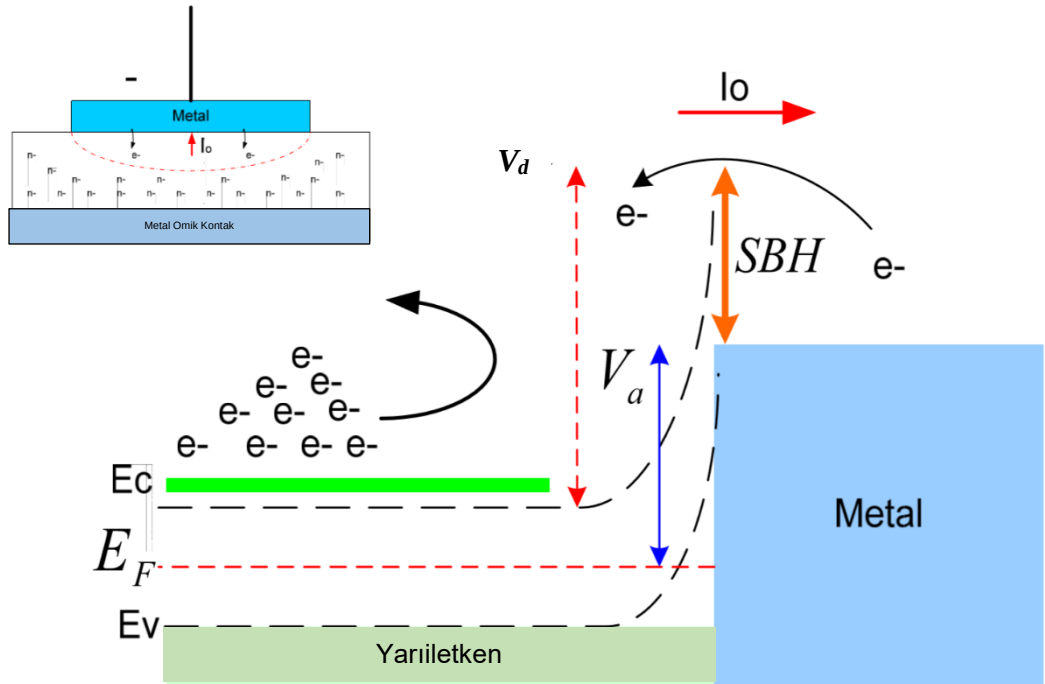
Termal denge altında aygıtın I_0 doyma akımı elektronun yükü ve termal voltaj ile birlikte eşitlik (2.17) de verilen diyodun bilinen engel yüksekliği vasıtasıyla yaklaşık olarak verilebilir (Streetman 1990).

$$I_0 \propto e^{\frac{-q\Phi_B}{kT}} \quad (2.22)$$

Ters beslem boyunca deplasyon bölgesi genişler ve yalnızca termal dengede oluşan I_0 doyma akımını oluşturan elektronlar Schottky engelinin üstünden geçerler. Şekil 2.10'da bir diyodunun ters beslem voltaj ile enerji bant diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2.9 Enerji band diyagramı ile Schottky diyot boyunca ilerleyen elektrik akımının oluşumu.



Şekil 2.10 Enerji band diyagramı ile Schottky diyotta uygulanan ters beslem voltajı ile artan difüzyon potansiyeli.

İdeal Schottky diyotta akımın büyüklüğünü etkileyen özellikler materyalin sıcaklığı (T), yarıiletkendeki metalin kontak alanı (A) ve sıcaklık ve akım yoğunluğu ile ilişkili

materyal için Richardson sabitidir (A^*). Materyal için bilinen bu değerler ile Schottky diyot kontak akımının daha doğru ve kapsamlı formülü eşitlik (2.23) ile ifade edilebilir. Bu eşitlik ayrıca n idealite faktörüne göre ideal diyot performansından sapmayı da barındırır. Bu değer idealite faktörü olarak bilinir ve ideal diyot için yaklaşık olarak 1'e eşittir.

$$I = AA^*T^2 e^{\frac{-q\Phi_B}{kT}} \left(e^{\frac{qV_a}{nkT}} - 1 \right) \quad (2.23)$$

Şimdi Schottky diyotu daha doğru tanımlayabilmek için ideal olmayan, Schottky diodunun bazı yönlerini tartışmak gereklidir. Materyalin değişik özellikleri ve fabrikasyon eşitlik (2.23) de verilen diyot performansında kayda değer bir sapmaya neden olacaktır. İdeal diyot özelliklerinden sapmanın sebeplerinden bazıları offset potansiyelleri ve direnç olabilir. Ters yönde taşıyıcı jenerasyonu akımın I_0 'dan daha büyük olmasına neden olur ve bu durumda ters beslem elektrik akım iletimi Zener ve Çığ olayları ile açıklanır (Streetman 1990).

Düşük kaliteli omik kontak veya Schottky kontak arayüzeyi dirence neden olabilir. Bunların her ikisi de diyot içerisinde yüksek bir seri dirence katkı sağlayacaktır. Diyoda yüksek akım ve voltaj uygulandığında eksponansiyel I-V eğrileri lineer olacak. Bu noktada I-V eğrisinin lineer kısmı (2.24) eşitliğinin yardımı ile değerlendirilebilir ve diodun toplam seri direnci için bir değer akımdaki değişime karşılık voltajdaki değişim bulunarak hesaplanabilir.

$$R_s = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (2.24)$$

Bir Schottky diodun ters beslemde çalışması esnasında, diodun uygulanan ters polarite ile yüksek direnç modunda olması gerekir. Bu sırada akım akışını meydana getiren çeşitli mekanizmalar vardır. Nötral geçiş bölgesinde taşıyıcı jenerasyonu ısıl aktiviteye ve materyalde hangi taşıyıcı jenerasyon-rekombinasyon merkezleri olabileceği açısından

yarıiletkenin doğasına bağlı olarak meydana gelir. Diyodun önemli bir yönü, ters beslem modundaki diyot elektrik akımını eksponansiyel iletmeye başladığı zaman oluşan voltaj ters kırılma voltajıdır. Genelde ters beslem kırılmasına katkıda bulunan iki mekanizma vardır. Bu mekanizmalar Çığ çoğalması ve kuantum mekaniksel tünelleme olarak bilinir. Bu iki kırılma mekanizmalarından hiç biri diyota zarar vermez, ancak kalıcı aygıt arızasına neden olabilecek voltaj kırılmalarına bağlı yüksek akımlardan dolayı diyotta ısınmalar meydana gelebilir (Chilukuri and Balagia 1999). Çığ kırılması, cihaza büyük bir elektrik potansiyeli uygulandığında gerçekleşen darbe iyonizasyonu ile oluşturulur ve yüksek enerjili elektronlar engeli geçecek ve diğer elektron-boşluk çiftlerinin oluşmasını tetikleyecektir. Zener kırılması yasak bölgedeki engelin içinden yüklerin geçmesine etkili bir şekilde izin veren kuantum mekaniksel tünelleme olarak bilinen bir mekanizmaya atfedilir. Kırılma durumundaki ters beslem voltajının, N_d doping konsantrasyonu ve E_c kritik elektrik alanı ile ilişkili olarak aşağıdaki (2.25) eşitliği ile verilebileceği tahmin edilebilir.

$$V_{RB} \approx \frac{\epsilon_0 \epsilon_m (E_c)^2}{2qN_d} \quad (2.25)$$

Yukarıda anlatılan olgulardan kaynaklanan akımı azaltmanın en iyi yolu aygıtdaki elektrik alan şiddetini azaltmaktır. Schottky kontağı çevreleyen elektrik alan yoğunluğuna en çok etki eden parametrelerden biri diyot eklemine oluşturmak için yarıiletken ile kontak halindeki metalin fiziksel şeklidir. Schottky diyot kontakların tasarımı ve yapımı için kullanılan birçok teknik ters kırılma voltajı artırılabilir diye çeşitli kontak geometrileri uygulamaktadır.

2.8 Schottky Engel Yüksekliği

Schottky engel yüksekliği metalin iş fonksiyonu (Φ_m) ve yarıiletkeninin elektron ilgisine (χ) bağlıdır.

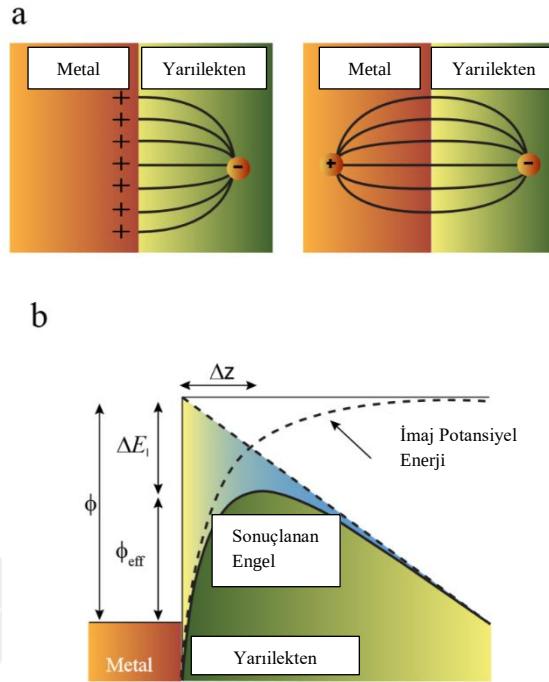
$$\Phi_B = \Phi_m - \chi \quad (2.17)$$

Bu bağıntı Schottky-Mott bağıntısı olarak adlandırılır. Schottky modelini belirleyen bu engel birkaç varsayıma dayanmaktadır; (a) metal ve yarıiletken bir araya getirildiğinde Φ_m ve χ 'nin yüzey dipolüne katkısı değişmez, (b) yarıiletkenin yüzeyinde mevcut hiç bir lokalize durumlar yoktur ve metal ile iyi bir kontak oluşturur. Schottky engel yüksekliğini belirleyen daha karmaşık yaklaşımlarda imaj potansiyeli, tünelleme ve elektrostatik perdelemenin etkisi dikkate alınmalıdır. Bu üç mekanizma aşağıdaki gibi tartışılmıştır:

1. Görüntü yük alçalması
2. Tünellemeden dolayı alçalma
3. Elektrostatik perdelemekten dolayı alçalma

2.8.1 Görüntü yük potansiyeli (image charge potential) nedeniyle schottky engel alçalması

Eşitlik (2.27)'e göre ters beslemde akım yoğunluğu değeri bir sabittir. Ancak gerçek bir aygıtta ters akım aslında beslem voltajı ile artmaktadır. Bu ilk kez Schottky tarafından incelenmiş imaj kuvvetinden dolayı engel alçalması etkisine atfedilmiştir.



Şekil 2.11 (a) Sol: Metal-yarıiletken arayüzeyine ve yüzey yüklerine yakın olan bir elektronun neden olduğu alan, Sağ: Arayüzeyin iki tarafında iki zıt yükün neden olduğu alan **(b)** Yarıiletken içindeki SBH'nin maksimum değerini düşüren ve çeken görüntü kuvvet etkisini gösteren diyagram.

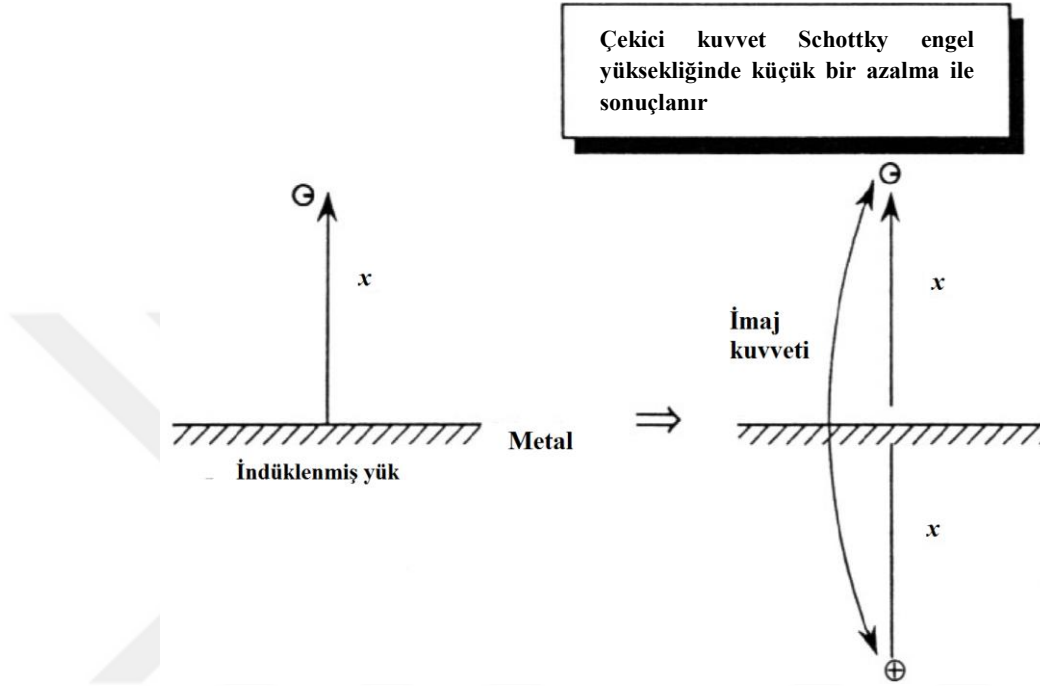
Bir elektron metal yüzeyinden x mesafede olduğu zaman bir pozitif yük metal yüzey üzerinde indüklenecaktır (Şekil 2.11). Elektron ve indüklenen pozitif yük arasındaki çekim kuvveti, elektron ve $-x$ de bulunan elektrona eşit olan bir yük ile arasında var olan kuvvete eşdeğerdir. Bu pozitif yük imaj yükü, çekici kuvvete imaj kuvveti olarak adlandırılır ve aşağıdaki eşitlik ile verilir;

$$F_x^{im} = -\frac{q^2}{4\pi(2x)^2\epsilon_0} = -\frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 x^2} \quad (2.26)$$

Burada ϵ_0 boşluğun geçirgenliğidir. Sonsuzdan x noktasına bir elektron taşımak için yapılan iş;

$$E'(x) = -\int_x^\infty F_x^{im} dx = -\frac{q}{16\pi\epsilon_0} \int_x^\infty \frac{1}{x^2} dx = -\frac{q}{16\pi\epsilon_0 x} \quad (2.27)$$

eşitliği ile verilir. Bu enerji terimi metal yüzeyinden x mesafesindeki bir elektronun potansiyel enerjisine karşılık gelmektedir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 İndüklenmiş yük etkisinden dolayı bir Schottky eklemde engel potansiyeli azalır. Metalin üstündeki x mesafesindeki bir elektron indüklenen bir imaj yükünü görür.

Harici bir elektrik alan uygulandığında mesafenin bir fonksiyonu olarak toplam potansiyel enerji $E(x)$;

$$\begin{aligned}
 E(x) &= -q\Phi'(x) = -\frac{q^2}{16\pi\epsilon_s\epsilon_0 x} - q\Phi(x) \\
 &= -\frac{q^2}{16\pi\epsilon_s\epsilon_0 x} + \frac{q^2 N_d}{2\epsilon_s\epsilon_0} (x_m - x)^2
 \end{aligned} \tag{2.28}$$

$E(x)$, aşağıdaki eşitlik ile çözümlenen x' de maksimum değere sahiptir.

$$\frac{q^2}{16\pi\epsilon_s\epsilon_0 x'^2} - \frac{q^2 N_d}{\epsilon_s\epsilon_0} (x_m - x') = 0 \tag{2.29}$$

$x' \ll x_m$ olmasından dolayı

$$x' = -\frac{1}{4(\pi N_d x_m)^{1/2}} \quad (2.30)$$

Bunun için

$$\begin{aligned} \Delta\Phi &= \Phi(x=0) - \Phi'(x=x') \\ \Delta\Phi &= -\frac{q}{2\varepsilon_s\varepsilon_0}x_m^2 - \frac{q}{16\pi\varepsilon_s\varepsilon_0x'} + \frac{q}{2\varepsilon_s\varepsilon_0}(x_m - x')^2 \end{aligned} \quad (2.31)$$

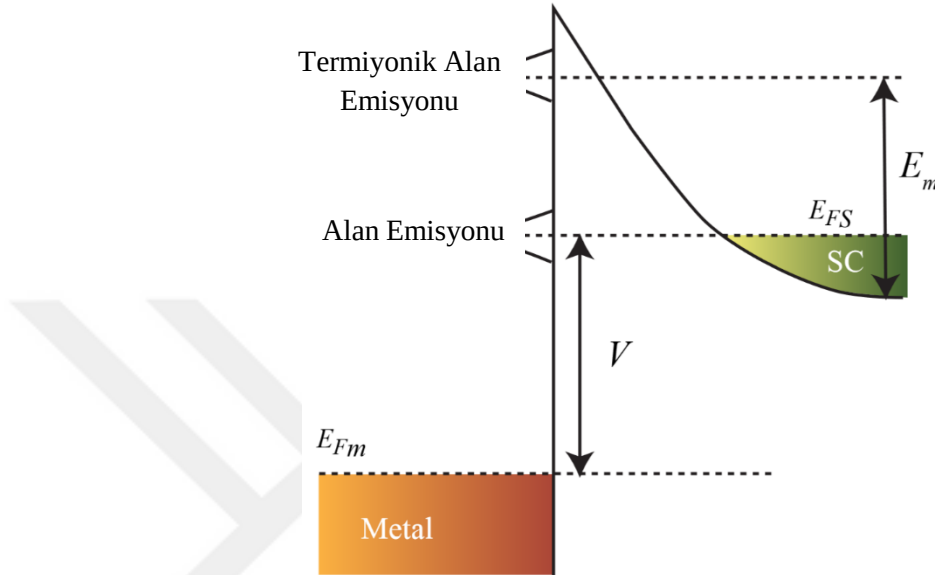
yazılabilir. Burada $(x_m - x')^2 = x_m^2 - 2x_mx' + (x')^2$ olduğundan dolayı, $2x_mx' \gg (x')^2$ ve $\Delta\Phi(x=x') = \Phi'(x=x') - \Phi'(x=x') \approx 0$ olur ve böylece imaj kuvvetinin etkisinden dolayı Schottky engelini alçalmasını belirtmek için bir ifade elde ederiz.

$$\Delta\Phi \approx -\frac{qN_d}{\varepsilon_s\varepsilon_0}x_mx' = \frac{1}{4} \left[\frac{2q^3N_d}{\pi^2(\varepsilon_s\varepsilon_0)^3} \left(V_d - V_B - \frac{kT}{q} \right) \right]^{1/4} \quad (2.32)$$

İmaj kuvveti etkisi yüksek elektrik alan altında Schottky engelini önemli ölçüde alçaltır. Ayrıca bu etki ters beslem voltajına çok kuvvetli bir şekilde bağlı olarak niçin $J_s^{schottky} > J_s^{p-n}$ olduğunu da açıklamaktadır.

2.8.2 Tünelleme nedeniyle engel alçalması

Etkin Schottky engel yüksekliğinin alçalmasına neden olabilecek ikinci mekanizma ya direkt ya da termal tünellemedir. Düz beslem altında düşük sıcaklıklarda aşırı katkılı yarıiletkenlerde elektronlar yarıiletkenin Fermi seviyesinden metale Schottky engeli boyunca direkt tünelleyebilirler. Ters beslem içinde metalden yarıiletken tünelleme aynı koşullarda gerçekleşebilir. Bu elektronlardan kaynaklanan akım Şekil 2.13'te gösterildiği gibi alan emisyonu olarak adlandırılır.



Şekil 2.13 Düz beslem altında alan emisyonu ve termiyonik alan emisyonu. Burada E_{Fm} ve E_{FS} sırasıyla metalin ve yarıiletkenin Fermi seviyeleri, V uygulama voltajı ve E_m termiyonik alan emisyonuna katkı sağlayan maksimum enerjidir.

Elektronlar belli bir termal enerjiye sahip oldukları zaman engel boyunca termal olarak tünelleme yapabilirler. Engel daha yüksek enerjilerde daha ince olduğundan dolayı yüksek enerjili elektronlar daha yüksek tünelleme olasılığına sahiptir. Öte yandan yüksek enerjili elektronlar az sayıdadır. Şekil 2.13'te gösterildiği gibi (E_m ile gösterilmiştir) bu termiyonik alan emisyonuna maksimum katkı sağlayan belirli bir miktarda enerjiye sahip elektronlar anlamına gelir. Schottky engeli üçgensel potansiyel engeline benzetildiğinde engel yüksekliğinden daha düşük bir ΔE enerjiye sahip bir elektron için tünelleme olasılığı (P) aşağıdaki denklem ile verilir (Rhoderick and Williams 1988).

$$P = \exp \left[-\frac{2}{3} (\Delta E)^{3/2} / E_{00} V_d^{1/2} \right] \quad (2.33)$$

Burada ΔE engelin üst kısmının altındaki elektronun enerjisi ve V_d difüzyon potansiyelidir. E_{00} tünelleme teorisinde önemli bir rol oynayan parametredir ve Schottky engelin difüzyon potansiyelidir. Öyle ki deplasyon bölgesinin kenarındaki iletim bandının

altına denk gelen bir elektron için iletim olasılığı e^{-1} 'e eşittir (Rhoderick and Williams 1988) ve aşağıdaki gibi verilir.

$$\Delta E_{00} = \frac{\hbar}{2} \sqrt{\frac{N_d}{m^* \epsilon_s}} \quad (2.34)$$

Burada $\hbar$ Planck sabiti, N_d donör konsantrasyonu ve ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabitidir.

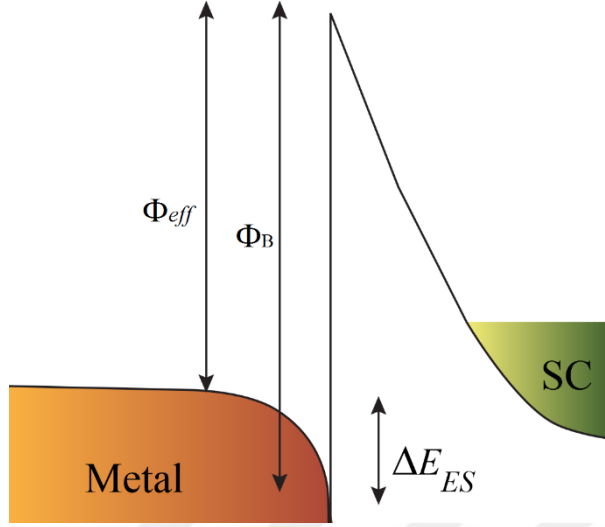
Denklem (2.33)'den E_{00} 'nin sıfır değerini alması tünelleme olasılığının sıfır olabileceği çıkarımına ve daha yüksek değeri daha yüksek tünelleme olasılığına yol açar. Ayrıca daha yüksek elektron enerjisi demek olan daha düşük bir ΔE değeri daha yüksek bir tünelleme olasılığı ortaya çıkarır. ΔE sıfıra gittiğinde yani elektron Schottky engeline eşit bir enerjiye sahip olduğunda, elektron engeli aşmak için yeterli enerjiye sahip olduğu için tünelleme olasılığının 1 e gitmesini bekleriz. Tünelleyen elektronlar Schottky engelinin maksimumdan daha düşük bir enerji ile engeli geçebildiğinden dolayı direkt ve termal tünelleme etkin Schottky engel yüksekliğini düşürür. Bu etkilere bağlı olarak Schottky engel yüksekliğinin azaltılması miktarı (Prietsch 1995)

$$\Delta E_T = \sqrt{q^2 \hbar^2 / 32 \pi^3 \epsilon_s \Delta Z^3 m_e^*} \quad (2.35)$$

bağıntısıyla verilir. Burada ΔZ yarıiletken içerisinde maksimum potansyelin bulunduğu konumdur ve değeri

$$\Delta Z = \frac{1}{4} \sqrt{q^2 / [2 \pi^2 \epsilon_s \epsilon_0 N_d (\Phi_B - V_N - kT)]} \quad (2.36)$$

bağıntısıyla hesaplanabilir. Burada m_e^* yarıiletkendeki etkin elektron kütlesidir.



Şekil 2.14 Elektrostatik perdelemeye bağlı engel alçalması. Burada Φ_{eff} ve Φ_B orijinal ve etkin Schottky engel yüksekliğini ve ΔE_{ES} elektrostatik perdelemeye bağlı olarak Schottky engel düşüşünü temsil etmektedir.

2.8.3 Elektrostatik perdelemeye bağlı engel alçalması

Schottky engelinin alçalmasına neden olabilen üçüncü mekanizma elektrostatik perdelemeye bağlıdır. İdeal Schottky teorisinde metaldeki potansiyel dağılımının sabit olduğu kabul edilebilir. Ancak metalin yüzeyinde indüklenen serbest yük taşıyıcılarının büyüklüğü arttığı zaman bu durum yarıiletken ile arayüzeye yakın metalde ihlal edilebilir (Perlman 1969). Nb:SrTiO₃ gibi büyük bir dielektrik sabitine sahip yarıiletkenli arayüzeyde durum böyledir. Elektrik yerdeğiştirmenin korunumundan dolayı Şekil 2.14'te de görüldüğü gibi, bu büyük dielektrik sabiti eklemenin metal tarafında gerilim düşmesine neden olur (Hikita *et al.* 2011). Bu engel potansiyeli bir elektronu metalden yarıiletkenine uyarmak için gerekli olan enerjiye karşılık gelir. Şekil 2.14'te görüldüğü gibi bu engel metaldeki voltaj düşüşü ile azalır. Sıfır uygulama beslemi için bu değer aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\Delta E_{ES} = \sqrt{2\Phi_B q N_d \epsilon_S / \epsilon_0 \epsilon_M^2 \lambda^2} \quad (2.37)$$

İmaj kuvveti ve tünelleme ile engel alçalmasının aksine elektrostatik perdelemeyen dolayı engel alçalması yarıiletkenin dielektrik sabitinin karekökü ile orantılıdır. Böylece rölatif dielektrik sabitinin daha yüksek değerleri için Schottky engeli daha büyük miktarda azalır.

2.9 Yüzey Hallerinin Varlığında Schottky Engel Yüksekliği teorisi

Bir metal-n tipi yarıiletken kontağın enerji bant diyagramı Şekil 2.15'te gösterilmektedir. Şekilde metal ve yarıiletken arasındaki kontağın atomik boyut mertebesinde bir ara yüzey tabakasına sahip olduğunu ve ara yüzeydeki yüzey hallerinin yoğunluğunun (birim alan başına eV) yalnızca yarıiletken yüzeyin bir özelliği olduğunu ve metalden bağımsız olduğunu kabul ediyoruz. Φ_0 enerjisi, yarıiletken yüzeyindeki valans bandı kenarında ölçülür ve yarıiletken yüzeyindeki yük nötrallığı için bu seviyenin altındaki bütün yüzey halleri doldurulmuştur. Bu ayrıca yük nötrallığı seviyesi (CNL) olarak da adlandırılır. Φ_B miktarı metal yarıiletken kontaktaki Schottky engel yüksekliği ve $\Delta\Phi_n$ engelin imaj kuvvet azalmasıdır (Sze 1981). Ara yüzey tabakası birkaç angströmlük bir kalınlığa sahiptir ve potansiyel engelinden daha büyük enerjiye sahip elektronların bu tabakayı geçebildikleri kabul edilecektir.

$$Q_{SC} = [2e\epsilon_S N_d (\Phi_B + \Delta\Phi_n - \Phi_n - kT/e)]^{1/2} C/cm^2 \quad (2.39)$$

Burada N_d bulk yarıiletkenin donör yoğunluğudur. Yarıiletken yüzeyindeki eşdeğer yüzey yük yoğunluğu denklemi (2.38) ve (2.39)'un toplamı ile verilir. Ara yüzey tabakasında hiçbir uzay yükü etkisi yokken metal yüzeyin de zıt ve tamamen eşit yüklü Q_m yükü şekillenir. Böylesi bir etki ince ara yüzey tabakası için ihmal edilir ve Q_m değeri

$$Q_m = -(Q_{SS} - Q_{SC}) = eD_S(E_g - \Phi_0 - \Phi_B - \Delta\Phi_n) - [2e\epsilon_S N_d (\Phi_B + \Delta\Phi_n - \Phi_n - kT/e)]^{1/2} \quad (2.40)$$

şeklinde yazılabilir.

Ekleme hiçbir gerilim uygulanmamışken ara yüzey tabakası üzerindeki Δ_0 potansiyeli metal ve yarıiletkendeki yüzey yükleri için Gauss yasasının uygulanması ile elde edilir.

$$\Delta_0 = -\delta(Q_m/\epsilon_i) \quad (2.41)$$

Burada ϵ_i ve δ sırasıyla ara yüzey tabakasının dielektrik sabiti ve kalınlığıdır. Δ_0 için başka bir ilişki Şekil 2.15'teki enerji bant diyagramının incelenmesi ile elde edilebilir.

$$\Delta_0 = \Phi_m - (\chi + \Phi_B + \Delta\Phi_n) \quad (2.42)$$

Dengede metal-arayüzey tabakası-yarıiletken sistemi boyunca Fermi seviyesinin sabit olması gerçeğinden bu sonuçlara ulaşılmıştır. Eğer Δ_0 denklem (2.41) ve (2.42) eşitlenerek yok edilirse ve elde edilen Φ_m denklem (2.40)'da yerine yazılırsa,

$$(\Phi_m - \chi) - (\Phi_B + \Phi_n) = \left[\frac{2e\epsilon_S N_D \delta^2}{\epsilon_i^2} (\Phi_B + \Delta\Phi_n - \Phi_n - kT/e) \right]^{1/2} - \frac{eD_S \delta}{\epsilon_i} (E_g - \Phi_0 - \Phi_B - \Phi_n) \quad (2.43)$$

denklemini elde ederiz. Şimdi bu denklem (2.43) Φ_B için çözülebilir. V_1 , α ve γ nicelikleri aşağıdaki gibi tanımlanırsa,

$$V_1 = 2e\epsilon_S N_D \delta^2 / \epsilon_i^2; \alpha = eD_S \delta / \epsilon_i; \gamma = 1/(1 + \alpha) = \epsilon_i / (\epsilon_i + e\delta D_S) \quad (2.44)$$

denklem (2.43) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Phi_B = [\gamma(\Phi_m - \chi) + (1 - \gamma)(E_g - \Phi_0) - \Delta\Phi_n] + \left\{ \gamma^2 V_1 / 2 - \gamma^{3/2} \left[\frac{V_1(\Phi_m - \chi) + (1 - \gamma)(E_g - \Phi_0) V_1 / 2 - \Delta\Phi_n}{V_1(\Phi_n + kT/e)/\gamma + \gamma V_1^2 / 4} \right]^{1/2} \right\} \quad (2.45)$$

γ ve ϵ_i değerlerinin tahmin edilmesi durumunda denklem (2.44) V_1 'in hesaplanması için kullanılabilir. İyi temizlenmiş yarıiletken altlıklar için arayüzey tabakası 4 veya 5 Å'luk atomik boyutta bir kalınlığa sahip olacaktır. Böyle ince bir tabakanın dielektrik sabiti boş uzay değerine oldukça yakın olabilir ve bu yakınlık ϵ_i için daha düşük bir sınırı temsil etmesinden dolayı V_1 in beklenilenden daha büyük olmasına sebep olur. $\epsilon_s \sim 10 \epsilon_i$ ve $N_D < 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ için V_1 0.01 eV mertebesinde küçüktür ve denklem (2.45) de büyük parantez içindeki terim muhtemelen 0.04 eV'dan daha azdır. Denklem (2.45) deki bu terim ihmal edilirse denklem aşağıdaki gibi olur.

$$\Phi_B = \gamma(\Phi_m - \chi) + (1 - \gamma)(E_g - \Phi_0) - \Delta\Phi_n \quad (2.46)$$

burada $\gamma = \left(1 + \frac{e^2 \delta D_S}{\epsilon_i} \right)^{-1}$ dir.

Farklı yarıiletken sistemler için γ , Φ_0 ve D_s 'nin deneysel değerleri denklem (2.46)'da Φ_B 'nin deneysel değerinin yerleştirilmesi ile elde edilebilir. Silikon için elde edilen γ , Φ_0 ve D_s değerleri sırasıyla 0.27 ± 0.05 , 0.30 ± 0.36 ve $2.7 \pm 0.7 \times 10^{13}$ haller/cm²/eV şeklindedir (Monch 1990). GaAs için elde edilen γ , Φ_0 ve D_s değerleri sırasıyla 0.07 ± 0.05 , 0.53 ± 0.33 eV ve $12.5 \pm 10.0 \times 10^{13}$ haller/cm²/eV şeklindedir.

2.10 Arayüzey Kimyasal Bağlanmaya Bağlı Schottky Engel Yüksekliği Teorisi

Bir metal ile bir yarıiletken eklem haline getirildiğinde ve termodinamik dengeye ulaşıldığında kimyasal bağlanma meydana gelecektir. Bağlanma geometrisi muhtemelen bir yerden bir yere değişen polikristal metal-yarıiletken arayüzeyin sıradan bir yerinde bölgesel olarak değişen bir arayüzey dipolüne neden olur. Bu durumda ölçülen SBH arayüzey dipolünün ağırlıklı ortalamalarının yansımasıdır. Arayüzey yapısının rastgeleliğinden dolayı muhtemel arayüzey dipolleri bulk-türetilmiş özellikler kullanılarak tahmin edilebilir. Bu nedenle moleküler sistemler için geliştirilen kimyasal fizikteki bazı teknikler kullanılarak elektrik dipolü analiz edilebilir. Yüksek mertebeden terimleri ihmal ederek (Iczkowsky and Margrave 1961, Rappe and Goddard 1991) çok atomlu bir molekülün toplam enerjisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$E_{\text{tot}}(Q_A, \dots, Q_N) = \sum_A \left(E_A^0 + U_A Q_A + \frac{1}{2} Y_A Q_A^2 \right) + \sum_{A \neq B} \frac{Q_A Q_B J_{AB}}{2} \quad (2.47)$$

Burada E_A^0 A atomunun yüksüz durumda enerjisi, $-eQ_A$ A atomundaki net yük, $U_A = \chi_A/2 + I_A/2$ Mulliken potansiyeli, $Y_A = I_A - \chi_A$ idem potansiyeli ve $J_{AB} = q^2/\epsilon_0 d_{AB}$ atomik konumları A ve B de bulunan iki yük arasındaki Colombik etkileşimdir. χ elektron ilgisi, I iyonizasyon potansiyeli ve d_{AB} A ve B atomları arasındaki mesafedir. Termal dengede kimyasal potansiyel aynı molekülün bütün atomları için sabittir ve atomlar arasındaki yük transferi tahmin edilebilir. Bu yaklaşım küçük heteronükleer moleküller için deneylerle uyumlu değerlikte dipoller sağlamıştır (Winkler and Pantelides 1997). Yukardaki yöntemi bir metal yarıiletken arayüzeyine uygulamak için, tüm metal yarıiletken bölgenin toplamı çok büyük bir “molekül” olarak görülebilir. Bir metal ve yarıiletkenin kesik

örgüleri düz bir arayüzey düzlemi üzerinde atomik olarak bağ oluşturabilir. N_B metal-yarıiletken arayüzeyi şekillendiren kimyasal bağların yoğunluğudur. Genelde arayüzeye paralel her düzlemde birim alan başına yarıiletkenin (veya metalin) atomlarının toplam sayısı N_B 'ye eşit değildir ve hatta daha düşüktür. Örgü uyumsuzluğu, yapı uyumsuzluğu, karmaşık arayüzey, eğik bantların oluşması ve benzeri bütün olaylar metal ile yarıiletken arayüzeyini şekillendiren etkin bağların sayısını azaltma eğilimindedir. Tüm metal-yarıiletken sistem için toplam enerji denklemini yazabiliriz. Kolaylık olması için yalnız bağlanma ile alakalı doğrudan arayüzey düzlemlerinde Q nun sadece metal ve yarıiletken atomları için sıfır olmadığını kabul edebiliriz. Aynı zamanda sadece en yakın komşu yüksüz atomlar arasındaki etkileşimleri alabiliriz.

$$E_{MS} = \sum_i \left(E_M^0 + U_M Q_M + \frac{1}{2} Y_M Q_M^2 \right) + \sum_i \left(E_g^0 + U_S Q_S + \frac{1}{2} Y_S Q_S^2 \right) + \sum_i Q_{M_i} Q_{S_i} J_{MS} + \sum_{i,j}^{\text{yakın kom.}} \left[J_{MM} Q_{M_i} Q_{M_j} + J_{SS} Q_{S_i} Q_{S_j} \right] \quad (2.48)$$

Arayüzeydeki bir metal atomunun gerek duyduğu kimyasal potansiyel $\mu_M = \partial E_{MS} / \partial Q_{M_i}$, yarıiletken atomunun gerek duyduğu kimyasal potansiyel $\mu_S = \partial E_{MS} / \partial Q_{S_i}$ 'ye eşittir. Simetriden dolayı arayüzeydeki bağlı her metal atomu net $-qQ_M$ ve her yarıiletken atomu da net $+qQ_M$ yüküne sahiptir. Böylece aşağıdaki denklem elde edilir.

$$Q_M = \frac{U_S - U_M}{Y_M + Y_S + 4J_{MM} - 2J_{MS} + 4J_{SS}} \quad (2.49)$$

Aslında burada kullandığımız düzlemde en yakın dört komşu vardır. Atomlar arasından ziyade iki kristal arasında yük transferini analiz etme ruhu içinde atomların bulk özellikler kazanmasına izin verebiliriz. Bir bulk metal için iyonizasyon potansiyeli ve elektron ilgisi, Φ_m metalin iş fonksiyonu olarak tanımlanır. Böylece $U_M = \Phi_m$ ve $Y_M = 0$ 'dır. Bir yarıiletken için iyonizasyon potansiyeli ve elektron ilgisi, χ , onun E_g bant aralığına göre farklılık gösterir. Bu yüzden $U_S = \chi + E_g/2$ ve $Y_S = E_g$ 'dir. Bir katı içinde yer alan

Coulombik etkiler gerçeği hesaba katıldığında, ilgili dielektrik ortam tarafından perdelemeye varsayılır. Böylece denklem (2.49) aşağıdaki gibi olur.

$$Q_M = \frac{\Phi_M - \chi - E_g/2}{E_g + \kappa} \quad (2.50)$$

Burada κ bütün sıçrama etkileşimlerinin toplamı, diğer bir deyişle $\kappa = 4q^2/(\epsilon_s d_B) - 2q^2/(\epsilon_i d_{MS})$ ve d_{MS} arayüzeydeki metal ve yarıiletken atomlar arasındaki mesafedir. Bu arayüzey dipol tabakası boyunca voltaj düşüşü artık hesaplanabilir.

$$V_{ara} = \frac{-q d_{MS} N_B}{\epsilon_i} \frac{(\Phi_M - \chi - E_g/2)}{E_g + \kappa} \quad (2.51)$$

Buradaki V_{ara} aşağıdaki denklemdeki gibi SBH ile ilişkilidir.

$$\Phi_B = \Phi_M - \chi_S + q V_{ara} \quad (2.52)$$

Denklem (2.51) denklem (2.52) de yerine koyulursa

$$\Phi_B = \left[1 - \frac{q^2 d_{MS} N_B}{\epsilon_i (E_g + \kappa)} \right] (\Phi_M - \chi) + \frac{q^2 d_{MS} N_B}{\epsilon_i (E_g + \kappa)} \frac{E_g}{2} \quad (2.53)$$

denklemini elde edilir.

$$\Phi_B = \gamma_B (\Phi_M - \chi) + (1 - \gamma_B) \frac{E_g}{2} \quad (2.54)$$

Burada $\gamma_B = 1 - \frac{q^2 d_{MS} N_B}{\epsilon_i (E_g + \kappa)}$ dir. Denklem (2.54) de denklem (2.46)'da verilen arayüzey durumları modellerinden tahmin edilenlere benzer olarak SBH'nin metalin iş fonksiyonuna bağlı olduğu görülmektedir. Denklem (2.54) de arayüzey bölgesinin dielektrik sabiti ϵ_i , yarıiletkenin ve metalin dielektrik sabitleri arasında bir değere sahiptir.

2.11 Schottky Diyodun Akım-Voltaj Karakteristikleri

Eklem boyunca elektron iletimi ağırlıklı olarak termiyonik emisyonla gerçekleşir. Denge halinde elektron iletimi her iki yönde de eşit olarak gerçekleşir, sonuçta eklem boyunca akım oluşmaz. Bir düz beslem uygulandığı zaman, potansiyel engeli düşer, bu yarıiletkeniden metale elektron emisyonunda bir artış sağlar. Her iki yöndeki akım eklemdaki elektron yoğunluğu ile orantılıdır, bu elektron yoğunluğu Maxwell-Boltzmann dağılımından bulunabilir. Bunun için enerji basit bir şekilde engel yüksekliği (Φ_B) ile yükün (q) çarpımıdır. Sıfır beslem şartı altında elektron yoğunluğu aşağıdaki gibi verilir.

$$n_1 = n_d \exp\left(\frac{-E}{kT}\right) = n_d \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT}\right) \quad (2.55)$$

burada n_1 eklemdaki elektron yoğunluğu, n_d yarıiletkenin doping yoğunluğu, k Boltzmann sabiti ve T mutlak sıcaklıktır.

Doğru beslem uygulandığı zaman, potansiyel engeli uygulanan voltaj ile azalır ve bu yüzden eklemda oluşan elektron yoğunluğu;

$$n_2 = n_d \exp\left(\frac{-q(\Phi_B - V)}{kT}\right) \quad (2.56)$$

olur. Burada V uygulama voltajıdır ve doğru beslenmiş eklemda pozitifdir.

Eklem boyunca akım bu iki durum arasındaki fark ile doğru orantılıdır ve aşağıdaki denklem ile sonuçlanır;

$$n_2 - n_1 = n_d \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (2.57)$$

Akım yük yoğunluğu farkı ile doğrudan orantılıdır, bu nedenle akımın voltaj ile ilişkili olduğu gösterilebilir.

$$I(V) = I_0 \left(\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right) \quad (2.58)$$

burada I_0 ters doyma akımıdır. Bu denklem ideal diyot denklemi olarak bilinir.

Sızıntı, kuantum tünelleme ve yük oluşumu gibi diğer etkilerin olabildiği durumlarda ters doyma akımının hesaplanması çok daha karmaşıktır. Ancak bu ikincil etkilerin ihmal edilebileceği varsayılırsa daha sonra ideal bir ifade elde edilebilir.

$$I_0 = AA^* T^2 \exp \left(\frac{-q\Phi_B}{kT} \right) \quad (2.59)$$

Burada A^* modifiye edilmiş Richardson sabiti ve A eklem bölgesinin alanıdır.

2.12. Schottky Diyotlarda Eklem Kapasitesi

Schottky tabakasının arınma (depletion) bölgesi paralel levhalı kondansatör gibi davranır. İdeal bir metal n-tipi yarıiletken Schottky diyod göz önüne alalım. Ters beslem durumunda, uygulama gerilimi artırıldığında yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar metalden uzaklaşırlar ve buna bağlı olarak gerilim artmasından dolayı arınma bölgesinin genişliği artar. Aynı zamanda yarıiletkende metale yakın önemli bir hol konsantrasyonu varsa hollerin yeni Fermi seviyesi metaldeki Fermi seviyesiyle çakışacağından hol konsantrasyonu azalacaktır. Deplasyon bölgesindeki bu yük değişimi kapasite değişimine sebep olacaktır. Dolayısıyla bu tür diyotlar varaktör (değişken kapasitör) olarak da kullanılırlar. Ayrıca, ters beslem altındaki kontak (engel) sıgasından diyot parametreleri ile ilgili bilgiler de elde edilebilir. Metal-yarıiletken kontağın potansiyel dağılımı ve yük yoğunluğu arasındaki ilişki Poisson denklemi ile verilir.

$$\nabla^2 \Psi(x) = \frac{d^2 \Psi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (2.60)$$

Burada ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, ϵ_0 boş uzayın dielektrik sabiti ve $\rho(x)$ uzay yük yoğunluğudur.

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

$$\rho(x) = q(N_d - n) \quad (2.61)$$

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

$$\rho(x) = qN_d \quad (2.62)$$

bağıntısı yazılır. $\rho(x)$ 'in bu değeri, (2.60) denkleminde yerine konulursa, tek boyutta Poisson denklemi

$$\frac{d^2 \Psi(x)}{dx^2} = -\frac{qN_d}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (2.63)$$

şeklinde verilir.

Denklem (2.63) aşağıdaki sınır şartları altında çözülürse $\Psi(x)$ 'i bulabiliriz. Sınır şartları:

1. $x=0$ 'da $\Psi(x)=0$
2. $x \geq d$ 'de $\Psi(x)=V_d \pm V$
3. $x=d$ 'de $\frac{d\Psi(x)}{dx} = 0$

şeklindedirler. (2.63) denkleminin üçüncü sınır şartları altında, ilk integraliyle kontak bölgesindeki elektrik alan elde edilir.

$$E(x) = -\frac{d\Psi(x)}{d(x)} = \frac{qN_d}{\varepsilon_s\varepsilon_0}(x - d) \quad (2.64)$$

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

$$\Psi(x) = -\frac{qN_d}{\varepsilon_s\varepsilon_0}\left(\frac{1}{2}x^2 - xd\right) \quad (2.65)$$

Denklem (2.65) ikinci sınır şartı altında çözülürse, Schottky tabakasının W genişliği bulunur.

$$(V_d \pm V) = -\frac{qN_d}{2\varepsilon_s\varepsilon_0}W^2 \quad W = \left[\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_0}{qN_d}(V_d \pm V)\right]^{1/2} \quad (2.66)$$

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

$$Q = qN_dW = [2\varepsilon_0\varepsilon_sqN_d(V_d \pm V)]^{1/2} \quad (2.67)$$

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

$$C = \frac{dQ}{dV} = \left[\frac{\varepsilon_0\varepsilon_sqN_d}{2(V_d \pm V)}\right]^{1/2} = \frac{\varepsilon_s\varepsilon_0}{W} \quad (2.68)$$

Bu sonuca göre arınma bölgesinin kapasitesi, akseptör veya donör yoğunluğu ile doğru, uygulanan gerilim ve Schottky bölgesinin genişliği ile ters orantılıdır. (2.68) denkleminde N_d 'yi ve V_d 'yi veren ifadeleri elde edebiliriz.

Son denklem;

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_d + V)}{\epsilon_0 \epsilon_s q N_d} \quad (2.69)$$

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

$$N_d = \frac{2}{q \epsilon_0 \epsilon_s} \frac{dV}{d(1/C^2)} \quad (2.70)$$

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

2.13. Schottky Diyotlarda Seri Direncin Hesaplanması İle İlgili Teoriler

Bazı araştırmacılar Schottky Diyot (SD) parametrelerini belirlemek için farklı yöntemler önermişlerdir. Temel standart metot $\ln I - V$ grafiğinde lineer bölgenin mevcudiyetini gerektirir ve daha sonra sırasıyla Φ_B ve n parametreleri grafiğin kesişiminden ve eğiminden elde edilebilir. Maalesef bu basit analiz asıl önemli olan R_s seri direncinin varlığı için başarısızdır.

Genelde bir seri direncin varlığı parametrelerin çıkarımını önemli ölçüde zorlaştırır ve akım-voltaj denklemini aşağıdaki forma dönüştürür. Bu nedenle seri direnç hesaplamalarında analitik yöntemler kümesi önerilmiştir.

$$I = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{nkT} \right] - 1 \right\} \quad (2.71)$$

Bu metotlar basit cebirsel yaklaşım ve voltaja göre akımın türevi (Mikhelashvili *et al.*1999) veya integrali (Kaminski *et al.*1991, Durmuş and Atav 2011), farklı sıcaklıklarda veya harici bir dirençle birkaç I-V ölçümü gibi bazı yardımcı fonksiyonlar (Norde 1979) kullanılarak karakterize edilir. Diğer yandan parametrelerin çıkartılması çok boyutlu bir sayısal optimizasyon problemidir ve literatürde çeşitli sayısal yöntemler önerilmiştir (Ortiz-Conde *et al.* 1999). Bu yöntemlerde genellikle ölçülen ve fit edilen akım değerleri farkını aza indirmek için eğim alçalması teknikleri kullanılmaktadır. Bazı araştırmacılar (2.71) eşitliğinin çözümünü elde etmek için Lambert W fonksiyonunu kullanmışlardır.

Sayısal yöntemlerin elde edilen parametreler açısından genel olarak daha yüksek bir seviyeye sahip olduğu söylenir. Ancak nispeten daha uzun bir hesaplama zamanı gerektirebilir ve genel olmaktan ziyade yerel yaklaşımlar eğiliminde olabilir. Literatürde bu yöntemler çok sayıda mevcut olmasına rağmen temel olarak sadece birkaç yönetime odaklanılmıştır.

Ayrıca son zamanlarda evrimsel algoritma (EA) teknikleri yarıiletken cihazlarda parametre belirlemek için kullanılmıştır (Ye *et al.* 2009). EA gerçek değerli, çok modlu objektif fonksiyonların optimizasyonunda çok etkili olduğu görülen olasılıklı optimizasyon yöntemidir. Sayısal yöntemlerin aksine EA türev bilgisi gerektirmeyen, doğrusal olmayan fonksiyonların üstesinden gelebilir ve işleyen algoritmadan önce tanımlanan parametrelerin başlangıç değerlerine zayıf bir şekilde bağlıdır. EA'nın diğer hesaplama yöntemlerinden daha fazla umut verici olduğu düşünülmektedir.

Yukarıda değinilen Schottky diyot parametrelerinin çıkarımında yaygın olarak kullanılan yöntemlere literatürden birkaç örnek aşağıda verilmiştir.

Analitik Yöntemler: Norde, Werner, Cibils, Kaminski I, Kaminski II, Bohlin, Lee, Gromov, Cheung ve Mikhelashvili.

Sayısal Yöntemler: Ordinary LS ve Lambert LS

Evrimsel Algoritmalar: DE Metot, PSO Metot, MABC Metot ve TLBO Metot

Bu tez çalışmasında diyotların seri direnç ve diğer parametrelerinin hesaplanmasında Cheung ve Norde metotları kullanılmıştır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Giriş

Bu bölümde ağırlıkça farklı oranlarda ikili ve üçlü alaşımların hazırlanması, elde edilen alaşımların oranlarının EDAX ölçümü ile belirlenmesi, metallerin ve n-Si yarıiletkeninin temizlenmesi, omik kontakların ve Schottky kontakların hazırlanması hakkında bilgiler verilecektir. Ayrıca elde edilen alaşım/yarıiletken Schottky diyotlara ait parametrelerin ölçülmesinde kullanılan teknikler ve cihazlar ile ilgili bilgilere de bu bölümde değinilmektedir.

3.2 Alaşımların Hazırlanması

Schottky kontaklarda kullanılacak metal ve alaşımlara, yapılan birçok denemden sonra Au, Ag ve Cu metalleri ile bu metallerden üretilecek farklı oranlardaki ikili ve üçlü alaşımların üretilmesine karar verilmiştir.

Bu çalışmada kullanılacak ikili alaşımlar;

Au-Ag (1:1)

Au-Cu (1:1)

Ag-Cu (1:1)

olarak ve üçlü alaşımlarda;

Au-Ag-Cu (1:1:1)

Au-Ag-Cu (1:1:2)

Au-Ag-Cu (1:2:1)

Au-Ag-Cu (2:1:1)

olarak belirlenmiştir. Önce alaşımları elde etmede kullanılacak Au, Ag ve Cu metalleri farklı oranlarda laboratuvarımızdaki hassas terazide tartılmıştır. Ağırlıkça oranları belirlenen metallerin her biri sırasıyla aseton, metanol ve trikloretilen içerisinde ultrasonik banyoda 30'ar saniye yıkandıktan sonra azot gazı ile kurutulmuştur. Daha sonra metaller seyreltilmiş HCl çözeltisinde ($H_2O:HCl$; 10:1) 30 saniye ultrasonik banyo içerisinde yıkandıktan sonra deiyonize su ile iyice yıkanıp azot gazı ile kurutulmuşlardır. Böylece metallerin yüzeyinde bulunan çeşitli organik ve inorganik kirler ile oksit tabakaları yüzeylerden uzaklaştırılmıştır. Aynı şekilde vakum pompasında kullanılan molibden ısıtıcılarda çeşitli kirliliklerden arındırılmak için ultrasonik banyo içerisinde sırasıyla aseton, metanol, trikloretilen ve seyreltilmiş HCl ile 10'ar saniye süreyle yıkanmış ve ardından deiyonize su ile iyice yıkandıktan sonra azot gazı ile kurutulmuşlardır. Kirliliklerden ve oksitlerden arındırılan molibden ısıtıcılar vakum pompasının elektrotları arasına yerleştirilmişlerdir. Alaşım yapılacak metallerin içine konulacağı kuvars potalarda benzer olarak kimyasal işlemlerden geçirildikten sonra termal buharlaştırma cihazına bağlanan molibden ısıtıcıların üzerine konulmuştur. Bu aşamalardan sonra önceden oranları belirlenen alaşımların her birinin hazırlanması işlemlerine geçilmiştir. İlk olarak termal buharlaştırma içerisine molibden ısıtıcının üzerine yerleştirilen kuvars potanın içine Au-Ag (1:1) metalleri yerleştirilmiştir ve vakum 10^{-7} torr basınca düştüğünde, molibden ısıtıcılardan akım geçirilerek elde edilen ısı yardımıyla kuvars potanın içinde bulunan metaller eritilerek birbirlerinin içine geçmesi sağlanmıştır ve ilk alaşım elde edilmiştir. Diğer oranlardaki ikili ve üçlü alaşımlarda sırasıyla benzer şekilde hazırlanmışlardır.

3.3 EDAX Ölçümlerinin Alınması

Hazırlanan alaşımların her biri 1x1cm boyutlarında camlar üzerine buharlaştırılarak Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) da Zeiss marka Sigma 300 modeli sistemle EDAX ölçümleri alınmıştır ve alaşım oranları kontrol edilmiştir.

3.4 n-Si Yarıiletkenin Temizlenmesi

Bu çalışmada yarıiletken olarak <111> yönelimine sahip, 1-10 Ω .cm öz dirençli ve 400 μ m kalınlığında, fabrikasyon olarak parlatılmış n-tipi Si kullanılmıştır. n-Si yarıiletken yüzeyinin parlak olması ve çeşitli mekanik kirlilikler ihtiva etmemesinden dolayı direk olarak kimyasal temizleme işlemine maruz tutulmuştur. Kimyasal temizleme için sırasıyla aşağıdaki işlemler takip edilmiştir (Çözelti oranları hacimseldir).

1. Aseton'da ultrasonik olarak 10 dakika yıkandı.
2. Metanol'de ultrasonik olarak 10 dakika yıkandı.
3. Deiyonize su ile iyice yıkandı.
4. RCA1 ($H_2O:H_2O_2:NH_3$; 6:1:1) çözeltisi içerisinde 60°C'de 10 dakika kaynatıldı.
5. Seyreltik HF ($H_2O:HF$; 10:1) ile 30 saniye yıkandı.
6. RCA2 ($H_2O:H_2O_2:HCl$; 6:1:1) çözeltisi içerisinde 60°C'de 10 dakika kaynatıldı.
7. Deiyonize su ile iyice yıkandı.
8. Seyreltik HF ($H_2O:HF$; 10:1) ile 30 saniye yıkandı.
9. 15-20 dakika akan deiyonize su içerisine konuldu ve sonra azot gazı ile iyice kurutuldu.

3.5. n-Si Yarıiletkenine Omik Kontak Yapılması

n-Si yarıiletkeni kimyasal olarak temizlendikten sonra Titanyum (Ti) metali ile omik kontak yapılması için öncelikle Ti metali aşağıdaki temizleme aşamalarından geçirilmiştir.

1. Aseton'da ultrasonik olarak 30 saniye yıkandı.
2. Metanol'de ultrasonik olarak 30 saniye yıkandı.
3. Trikloretlen'de ultrasonik olarak 30 saniye yıkandı.
4. Deiyonize su ile iyice yıkandı ve Azot gazı ile kurutuldu.
5. Seyreltik HCl çözeltisinde ($H_2O:HCl$; 10:1) 30 saniye ultrasonik banyo içerisinde yıkandı.

6. Deiyonize su ile iyice yıkandı ve azot gazı ile kurutuldu.

Bu işlemlerin ardından n-Si yarıiletkeni temizlenen Ti metalinin yerleştirildiği termal buharlaştırma sistemi içerisine yerleştirilerek 10^{-7} torr basınç altında Ti metali n-Si yarıiletken yüzeyine buharlaştırıldı. Buharlaştırma işleminden sonra sistemden çıkartılan n-Si yarıiletkeni kuartz pota içine yerleştirildi ve önceden ısıtılmış (n-Si için 420°C 'ye ayarlanmış) tavlama fırını içerisine koyulup 3 dakika boyunca tavlandı. Bu işlem süresince fırına kontrollü olarak azot gazı verildi. Böylece omik kontak işlemi tamamlanmış oldu.

3.6 Alaşım/Yarıiletken Doğrultucu Kontakların Elde Edilmesi

Bir tarafına Ti metali ile omik kontak yapılan n-Si yarıiletkenin diğer yüzeyine önceden hazırlanmış metal ve farklı oranlardaki ikili ve üçlü alaşımlar, merkezleri arası 3 mm olan 1 mm çapındaki dairesel deliklere sahip 7x7 matris şeklinde delinen ince molibden gölge maske yardımı ile, termal buharlaştırma sisteminde buharlaştırılarak alaşım/yarıiletken kontakları elde edildi. Ayrıca alaşımlar için kullanılan metaller ile de metal yarıiletken kontaklar elde edildi.



Şekil 3.1 Omik ve Schottky kontak yapımında kullanılan termal buharlaştırma sistemi

3.7 Akım-Voltaj ve Kapasite-Voltaj Ölçüm Sistemleri

Elde edilen metal/yarıiletken ve alaşım/yarıiletken kontaklar önceden hazırlanan numune tutucularına ayrı ayrı yerleştirildi. Hazırlanan diyotların 365 gün süreyle (hemen, 1., 7., 15., 30., 90., 180 ve 365. günlerde) oda sıcaklığında ve karanlıkta I-V ölçümleri “KEiTLEY 2400 Picoammeter/ Voltage Source” cihazı ile, C-V ölçümleri ise “HEWLET PACKART 4192 A, (50 Hz-13 MHz) LF IMPEDENCE ANALYZER” cihazı ile alındı ve temel diyot parametreleri (idealite faktörü, engel yüksekliği gibi) hesaplandı. Ölçümler için kullanılan deney sistemleri Şekil 3.2 ve 3.3’de görülmektedir.



Şekil 3.2 Akım-voltaj ölçümlerinde kullanılan KEiTLEY 2400 cihazı



Şekil 3.3 Kapasite-voltaj ölçümlerinde kullanılan HEWLET PACKART 4192 A cihazı.

4.ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1 Giriş

Bu bölümde Au, Ag ve Cu metalleri ve ağırlıkça eşit oranlarda hazırlanmış AuAg(1:1), AuCu(1:1) ve AgCu(1:1) ikili ve ağırlıkça farklı oranlarda hazırlanmış AuAgCu(2:1:1), AuAgCu(1:2:1), AuAgCu(1:1:2) ve AuAgCu(1:1:1) üçlü alaşımları ile oluşturulan metal/yarıiletken ve alaşım/yarıiletken doğrultucu kontakların oda sıcaklığında ve zamana bağlı olarak alınan I-V ve C-V ölçümlerinden elde edilen diyot parametreleri hesaplanmış ve bunlara ait grafikler incelenmiştir.

4.2 Alaşımların EDAX Ölçümleri

Alaşımların EDAX ölçümlerinin alınmasının amacı hazırlanmış olduğumuz alaşımların ağırlıkça oranlarının doğruluğunu belirleyebilmektir. Ağırlıkça eşit oranda hazırlanan ikili ve ağırlıkça farklı oranlarda hazırlanan üçlü alaşımların EDAX ölçüm sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çizelge 4.1’deki değerler incelendiğinde istenilen oranlardaki alaşımların başarılı bir şekilde elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 4.1 Alaşımların EDAX yöntemi ile tayin edilen ağırlıkça yüzde oranları

Alaşımlar	Ağırlık Yüzdeleri (%)		
	Au M	Ag L	Cu K
AuAg(1:1)	42,5	57,5	-
AuCu(1:1)	47,5	-	52,5
AgCu(1:1)	-	42,4	57,6
AuAgCu(2:1:1)	47,8	27,8	24,5
AuAgCu(1:2:1)	26,5	42,6	30,9
AuAgCu(1:1:2)	27,2	28,3	44,5
AuAgCu(1:1:1)	35,4	33,8	30,8

4.3 Alaşım/Yarıiletken Schottky Diyotların Oda Sıcaklığında ve Zamana Bağlı Olarak Alınan Akım Voltaj Karakteristiklerinin İncelenmesi

Alaşım-yarıiletken (AuAg/n-Si/Ti, AuCu/n-Si/Ti, AgCu/n-Si/Ti ve AuAgCu/n-Si/Ti) ve alaşımda kullanılan her bir metal için hazırlanmış metal-yarıiletken (Au/n-Si/Ti, Ag/n-Si/Ti ve Cu/n-Si/Ti) Schottky diyotların I-V karakteristikleri oda sıcaklığında ve karanlıkta incelenmiştir. Elde edilen parametreler aşağıda verilen kesimlerde detaylı olarak tartışılmıştır.

4.3.1 Au/n-Si/Ti, Ag/n-Si/Ti ve Cu/n-Si/Ti Schottky diyotların zamana bağlı I-V ölçümlerinden diyot parametrelerinin hesaplanması

Schottky diyotların elektriksel parametrelerini karakterize etmek için en kullanışlı yöntem I-V ölçümüne dayanır. Schottky diyotların termiyonik I-V özellikleri (seri ve şönt direnci ihmal edilirse) aşağıdaki denklem tarafından ifade edilir (Rhoderick and Williams 1988).

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

burada I_0 sızıntı akımıdır ve

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

denklemini ile verilir. Burada A diyot alanı, Φ_B engel yüksekliği, q elektronun yükü, k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık, $A^* = 4\pi qm^*k^2/h^3$ Richardson sabiti ve değeri 112 A/K²cm² (n-Si için) dir.

n idealite faktörü Schottky diyotlarda deneysel I-V verilerinin sapması olarak tanımlanır ve boyutsuz bir sabiti temsil eder. Schottky diyotlarda düz beslem altında $qV \gg 3kT$ olduğundan, denklem 4.1 deki 1 terimi ihmal edilebilir. Bu durumda (4.1) denklemi

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

şeklinde yeniden yazılabilir. (4.3) denkleminin her iki tarafının tabii logaritması alındıktan sonra V'ye göre türevi alınırsa idealite faktörü

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

olarak elde edilir. Denklem 4.2'nin her iki tarafının tabii logaritması alınarak, Φ_B 'ye göre çözülürse;

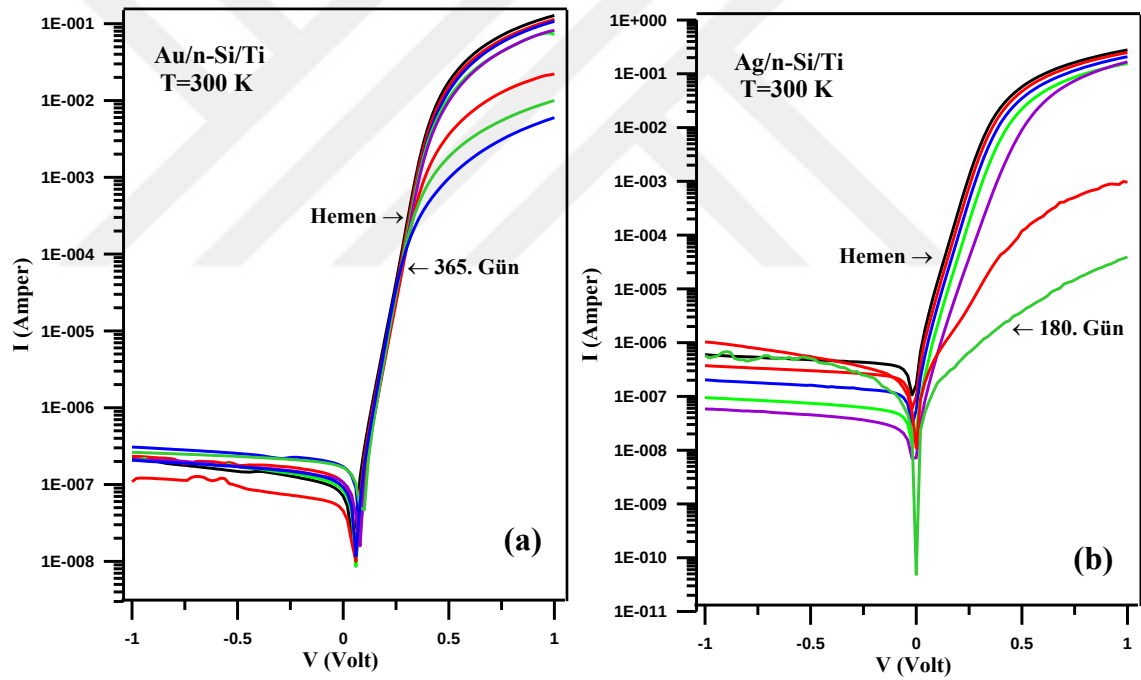
$$\Phi_B = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{A A^* T^2}{I_0} \right) \quad (4.5)$$

denklemi elde edilir ve bu ifadeden engel yüksekliği değeri elde edilebilir.

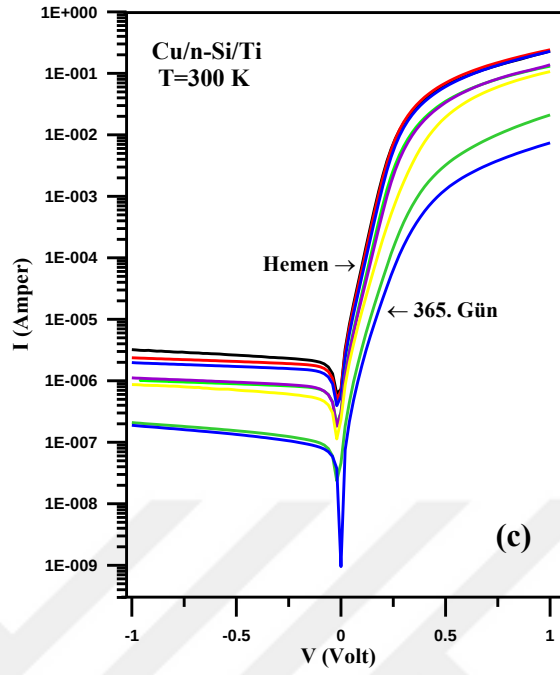
Sırasıyla elde edilen Au/n-Si/Ti, Ag/n-Si/Ti ve Cu/n-Si/Ti Schottky diyotların farklı zamanlardaki (hemen, 1., 7., 15., 30., 90., 180. ve 365. gün) yarı logaritmik düz ve ters beslem I-V karakteristikleri Şekil 4.1.'de verilmiştir. Doğru beslem $\ln I$ -V eğrileri geniş bir bölgede lineer olmasına rağmen artan voltaj değeriyle seri direnç ve diğer etkilerden dolayı lineerlikten sapmaktadır. $\ln I$ -V eğrilerinin lineer bölgesinin eğiminden idealite faktörleri her bir diyot için hesaplanmıştır. Ayrıca grafiklerden belirlenen I_0 değerleri elde edilmiştir ve bu I_0 değerleri denklem 4.5'te yerine konularak Φ_B değerleri hesaplanmıştır.

Şekil 4.1'den de görüldüğü gibi, 365 gün boyunca Au/n-Si/Ti ve Cu/n-Si/Ti Schottky diyotlarında hemen hemen kararlı bir karakteristik gözlenirken, Ag/n-Si/Ti Schottky

diyodu 30 gün ölçümlerinden sonra bozulmaya başlamıştır. Diyotların hesaplanan I_0 , n ve Φ_B değerleri Çizelge 4.2, 4.3 ve 4.4'te verilmiştir. Au/n-Si/Ti diyodunun idealite faktörü 1,018-1,063 aralığında, Ag/n-Si/Ti diyodunun idealite faktörü 1,050-4,504 aralığında, Cu/n-Si/Ti diyodunun idealite faktörü de 1,021-1,163 aralığında zamana bağlı olarak değişmiştir. Aynı şekilde engel yüksekliği Au/n-Si/Ti için 0,713-0,729 eV, Ag/n-Si/Ti için 0,608-0,683 eV ve Cu/n-Si/Ti için de 0,568-0,653 eV aralığında değişmiştir. Yani artan yaşlanma zamanıyla Au ve Cu metalleriyle yapılan diyotlarda idealite faktörü hafifçe artarken, Ag metaliyle yapılan diyotta idealite faktörü önemli ölçüde artmıştır. Bu durum Ag/n-Si arayüzeyinin kararsızlığına atfedilebilir.



Şekil 4.1. (devam)



Şekil 4.1. (a)Au/n-Si/Ti, (b)Ag/n-Si/Ti ve (c)Cu/n-Si/Ti Schottky diyotların farklı günlerdeki akım-voltaj karakteristikleri

Çizelge 4.2. Au/n-Si/Ti diyodunun $\ln(I)$ -V grafiklerinden zamana bağlı olarak hesaplanan bazı parametreleri

Au/n-Si/Ti			
	Termiyonik Emisyon Metodu		
Zaman (Gün)	I_0 (A)	n	Φ_B (eV)
Hemen	6,21E-09	1,018	0,713
1	5,00E-09	1,021	0,719
7	3,57E-09	1,039	0,727
15	3,83E-09	1,022	0,726
30	3,68E-09	1,056	0,727
90	3,54E-09	1,042	0,728
180	3,37E-09	1,055	0,729
365	4,97E-09	1,063	0,719

Çizelge 4.3. Ag/n-Si/Ti diyodunun $\ln(I)$ -V grafiklerinden zamana bağlı olarak hesaplanan bazı parametreleri

Ag/n-Si/Ti			
	Termiyonik Emisyon Metodu		
Zaman (Gün)	I_0 (A)	n	Φ_B (eV)
Hemen	3,58E-07	1,050	0,608
1	2,19E-07	1,050	0,621
7	1,23E-07	1,064	0,636
15	5,44E-08	1,083	0,657
30	1,99E-08	1,100	0,683
90	1,15E-07	2,580	0,638
180	7,59E-08	4,504	0,648
365	-	-	-

Çizelge 4.4. Cu/n-Si/Ti diyodunun $\ln(I)$ -V grafiklerinden zamana bağlı olarak hesaplanan bazı parametreleri

Cu/n-Si/Ti			
	Termiyonik Emisyon Metodu		
Zaman (Gün)	I_0 (A)	n	Φ_B (eV)
Hemen	1,70E-06	1,021	0,568
1	1,52E-06	1,029	0,571
7	1,25E-06	1,048	0,576
15	6,81E-07	1,059	0,591
30	6,30E-07	1,065	0,594
90	4,95E-07	1,115	0,600
180	1,19E-07	1,141	0,637
365	6,23E-08	1,163	0,653

Schottky diyotların karakteristikleri üzerinde önemli bir etkisi olan parametrelerden biri de arayüzey halleridir. Card ve Rhoderick metal-yarıiletken arayüzeyindeki arayüz hal yoğunluğunu,

$$N_{SS}(V) = \frac{1}{q} \left[\frac{\epsilon_i}{\delta} (n(V) - 1) - \frac{\epsilon_s}{d} \right] \quad (4.6)$$

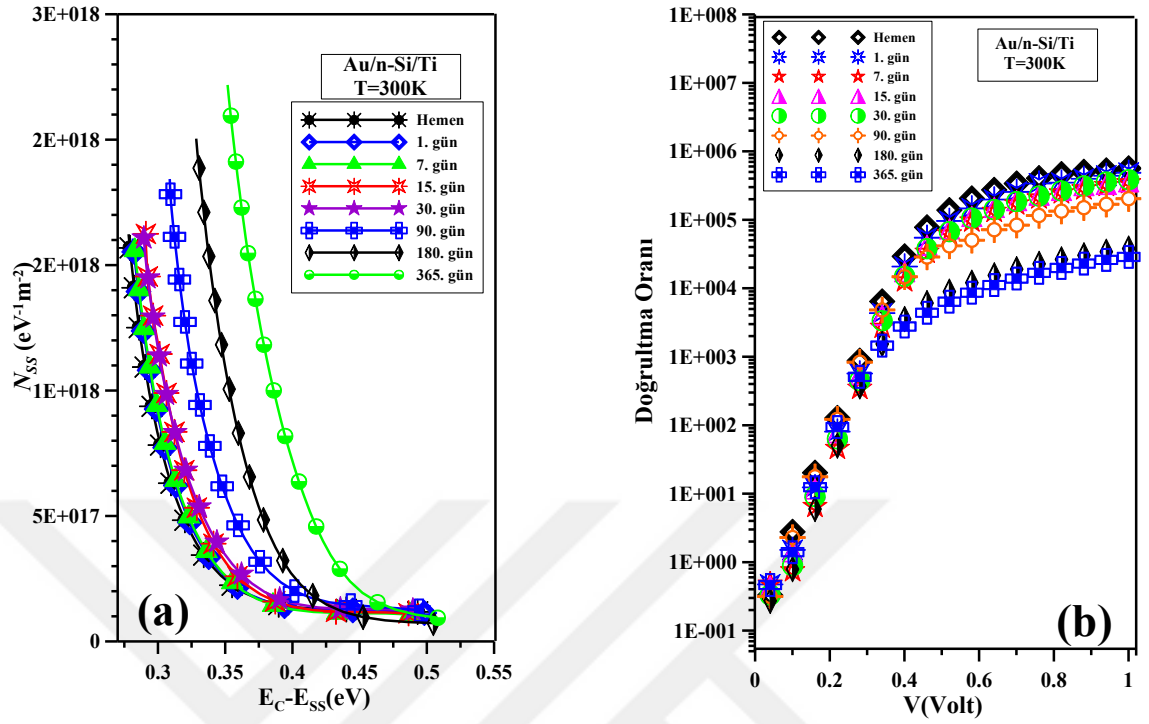
şeklinde ifade etmişlerdir (Card and Rhoderick 1973). Burada ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti (Si için $\epsilon_s = 11,8\epsilon_0$), $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-14}$ F/m olup boşluğun dielektrik sabiti, ϵ_i , arayüzey tabakasının dielektrik sabiti, δ arayüzey tabakasının kalınlığı, d uzay yükü bölgesinin genişliği ve N_{ss} yarıiletken ile denge halindeki arayüz durumlarının yoğunluğudur. Bir n-tipi yarıiletkende, arayüzey hallerinin enerjisi E_{ss} yarıiletkenin yüzeyindeki iletkenlik bandının tabanına göre

$$E_C - E_{ss} = q(\Phi_B - V) \quad (4.7)$$

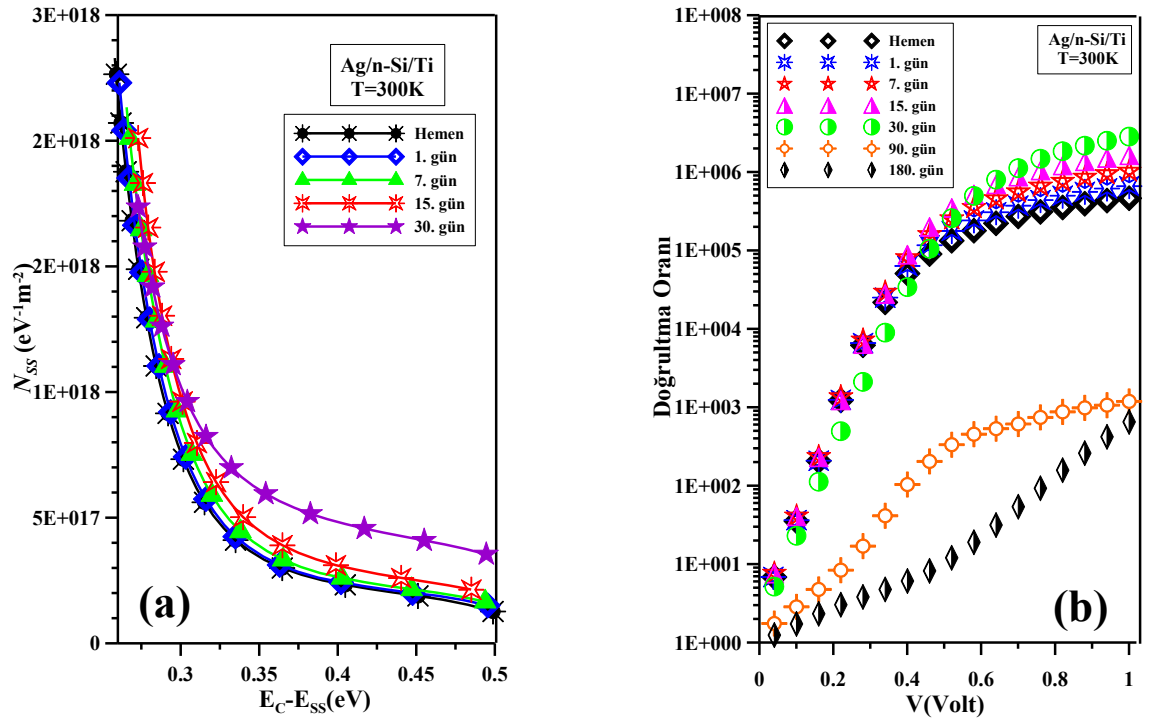
ile verilmektedir (Türüt *et al.* 1992).

Schottky diyotların arayüz durumlarının zamanla enerji dağılım profili, etkin engel yüksekliğinin ve idealite faktörünün besleme bağıllığı dikkate alınarak, düz beslem I-V karakteristiklerinin deneysel verilerinden elde edilmiştir. Au/n-Si/Ti, Ag/n-Si/Ti ve Cu/n-Si/Ti Schottky diyotların arayüzey hal yoğunluklarını ve ayrıca zamana bağlı doğrultma oranlarını veren grafikler Şekil 4.2, 4.3 ve 4.4'te verilmiştir. Bu şekillerden de görüldüğü gibi her üç diyotta da arayüzey hal yoğunluğu bant ortasından iletkenlik bandının tabanına doğru eksponansiyel olarak artmaktadır. Aynı zamanda artan yaşlanma zamanıyla arayüzey hal yoğunluğu eğrileri bant ortasına doğru hafifçe kaymaktadır. Fakat büyüklük olarak arayüzey hal yoğunlukları hemen hemen aynı kalmaktadır. Diyotlarda bir başka önemli parametre doğrultma oranıdır. Doğrultma oranları belirli voltaj değerlerinde doğru beslem akımının ters beslem akımına oranı alınarak hesaplanmıştır. Ag/n-Si/Ti diyodunda doğrultma oranları zamanla azalırken diğer iki diyotta önemli ölçüde değişmemiştir.

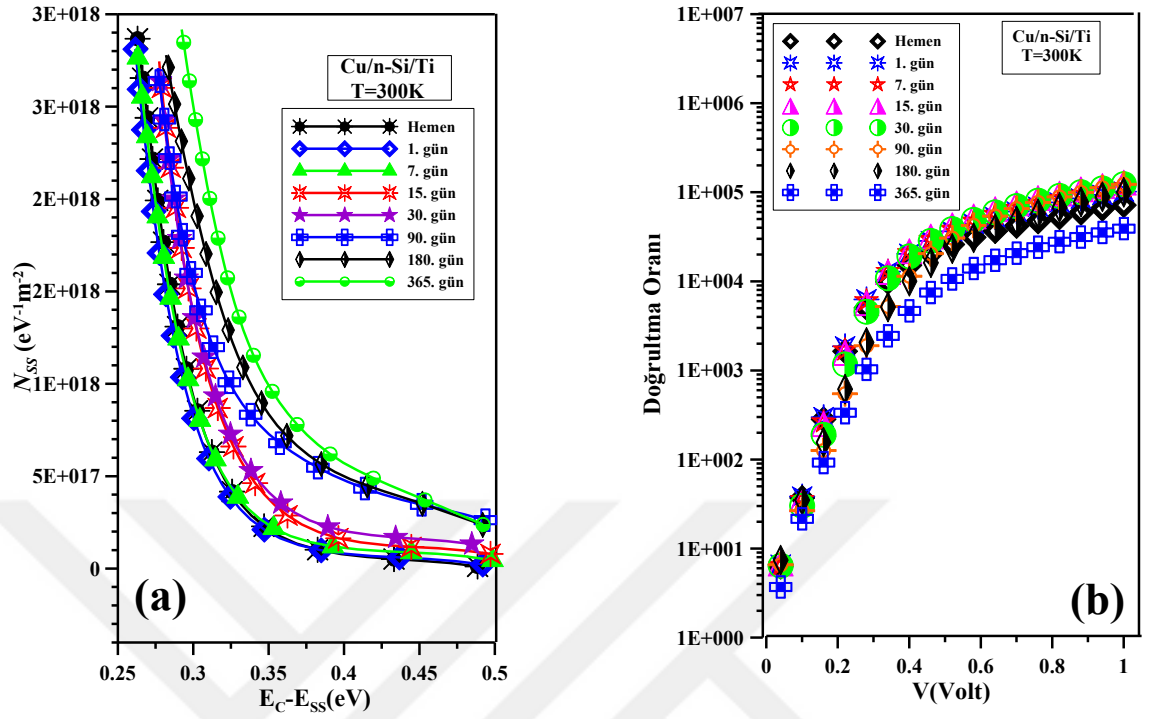
Aynı zamanda bazı düz beslem voltajlarının fonksiyonu olarak düz beslem diyot akımının zaman ile değişimi incelenmiştir. Bu değişimler Şekil 4.5'te verilmiştir. Üç farklı düz beslem voltajında diyottan geçen akım değerleri 90 gün ölçümlerine kadar zamanla azalmış ve daha sonra hemen hemen kararlı hale gelmiştir.



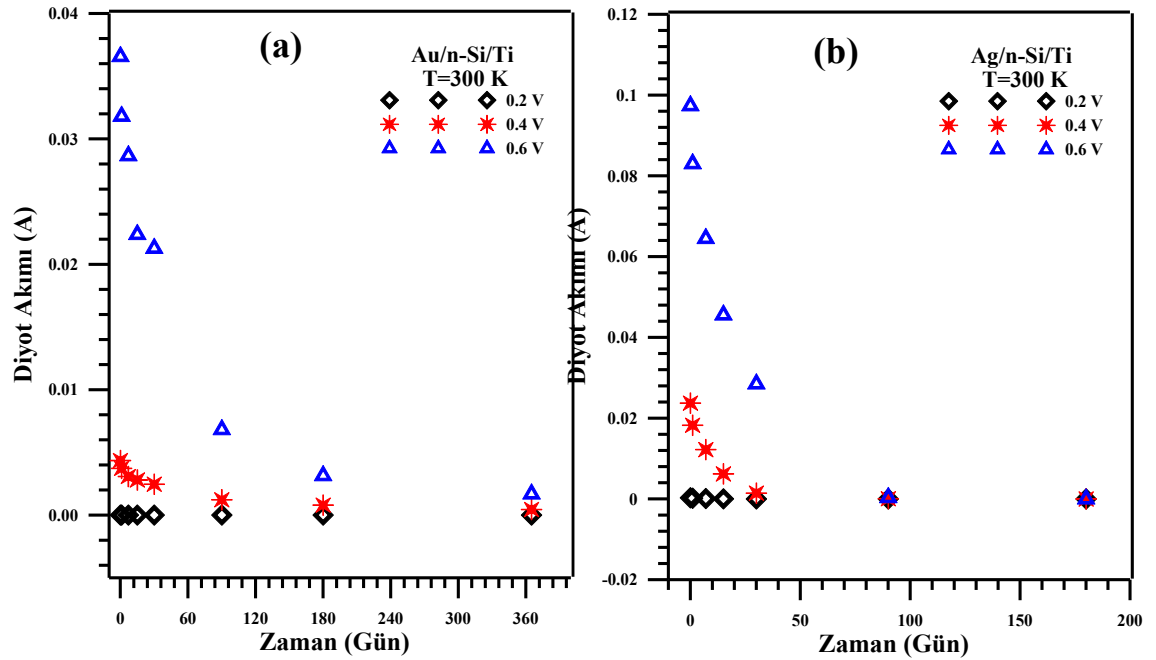
Şekil 4.2. Au/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) N_{ss} ve (b) doğrultma oranı değişimleri



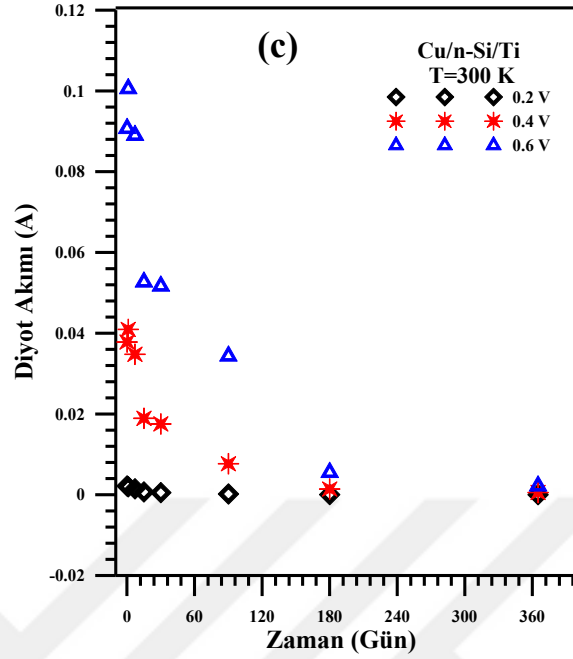
Şekil 4.3. Ag/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) N_{ss} ve (b) doğrultma oranı değişimleri



Şekil 4.4. Cu/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) N_{ss} ve (b) doğrultma oranı değişimleri



Şekil 4.5. (devam)



Şekil 4.5. (a) Au/n-Si/Ti, (b) Ag/n-Si/Ti ve (c) Cu/n-Si/Ti diyotlarının üç farklı düz beslem voltajlarında zamana bağlı diyot akımı değişimleri

Schottky diyotlarda önemli bir parametre olan seri direnç (R_s), düz beslem I-V karakteristiklerinin yarı logaritmik grafiğinde ideallikten sapmaların başlıca sebebidir ve Schottky diydunun elektriksel performansını etkileyebilir. I-V karakteristiğinin doğrusallıktan saptığı yüksek akım bölgesinde Cheung yöntemini kullanarak R_s değeri hesaplanabilir. Bu yöntemle seri derence sahip bir aygıtın düz beslem I-V karakteristiğinden n ve Φ_B değerlerini de belirleyebiliriz (Çağlar *et al.* 2018).

Cheung yöntemine göre diydottan geçen toplam akım, termoiyonik emisiyondan bulunan akım yoğunluğu (J), diydodun etkin alanı A ile çarpılırsa;

$$I = AJ = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (4.6)$$

olarak elde edilir (Rhoderick and Williams 1988). Bu ifade de $qV \gg kT$ ise, 1 ihmal edilebilir. Pratikte uygulanan gerilimin tamamının deplasyon bölgesine düşmediği dikkate alındığında, ideal durumdan sapmalar olacaktır. İdeal durumdan sapmaları ifade

edebilmek için birimsiz sabit olan (n) idealite faktörünü dikkate aldığımızda denklem aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$I = AJ = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \right] \quad (4.7)$$

Burada uygulanan gerilim V 'nin IR_s kadarlık miktarı seri direnç üzerine düşeceği için V yerine $V - IR_s$ yazarsak yukardaki ifade

$$I = AJ = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) \right] \quad (4.8)$$

şeklinde yazılır. (4.8) ifadesinin tabii logaritması alınıp, V'ye göre çözümü yapılırsa

$$V = \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^* T^2}\right) + n\Phi_B + IR_s \quad (4.9)$$

ifadesi elde edilir. (4.9) eşitliğinin $\ln I$ 'ya göre türevi alınırsa;

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (4.10)$$

ifadesi elde edilir. (4.10) eşitliğinde, $dV/d(\ln I)$ 'nın I ya göre grafiği bir doğru olacaktır. Bu grafikten elde edilecek olan doğrunun eğimi nötral bölge direncini ya da R_s seri direncini verecektir. Bu doğrunun düşey eksenini kestiği noktadan (n) idealite faktörü bulunabilir (Temirci 2000). Potansiyel engeli Φ_B 'yi bulmak için;

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^* T^2}\right) \quad (4.11)$$

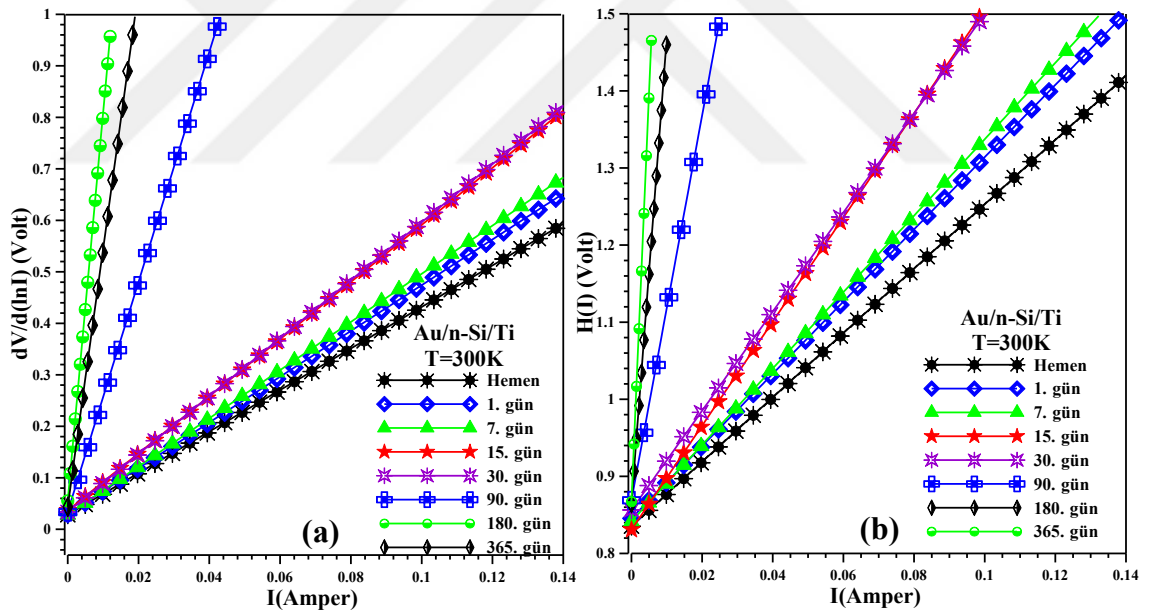
şeklinde bir $H(I)$ fonksiyonu tanımlanabilir. (4.9) ve (4.10) eşitliklerinden;

$$H(I) = n\Phi_B + IR_s \quad (4.12)$$

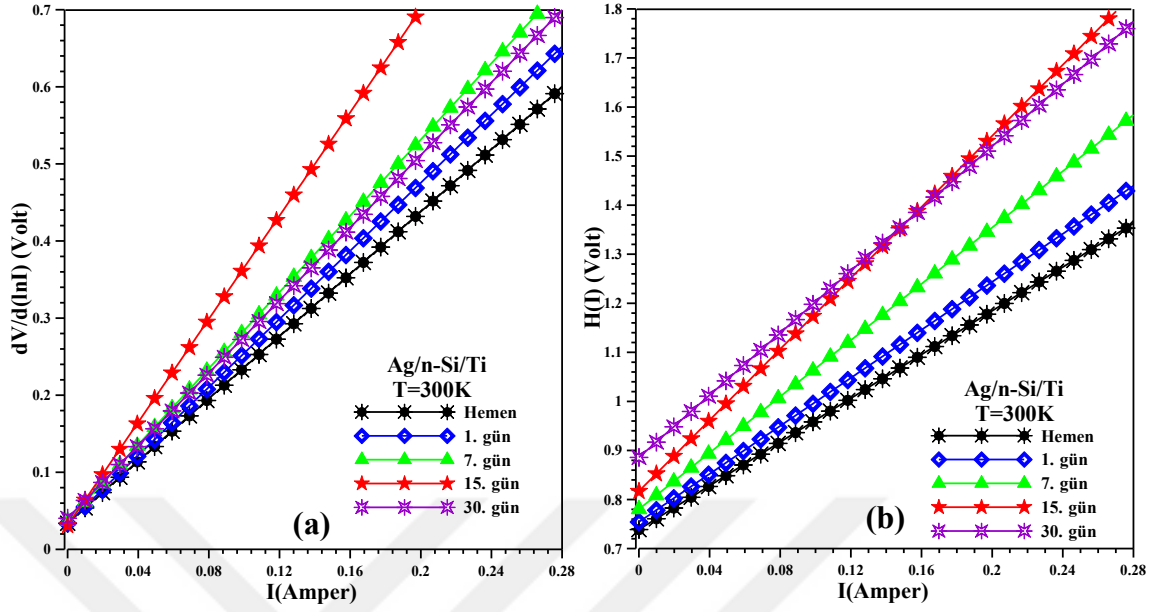
bağıntısı elde edilebilir.

(4.12) eşitliğinde $H(I)$ - I grafiği çizildiğinde bu grafik de bir doğru şeklinde olacaktır ve bu doğrunun eğimi de R_s seri direncini verecektir. Bu doğrunun $H(I)$ eksenini kestiği noktadan da engel yüksekliği Φ_B bulunacaktır (Cheung and Cheung 1986).

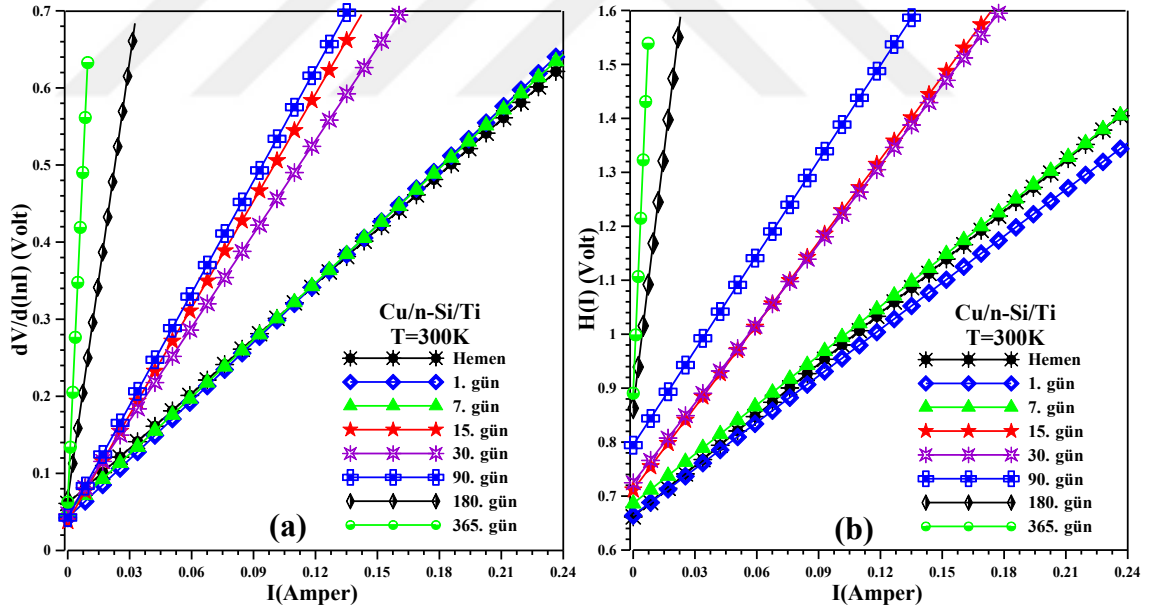
Au/n-Si/Ti, Ag/n-Si/Ti ve Cu/n-Si/Ti Schottky diyotlarının zamana bağlı olarak çizilen $dV/d(\ln I)$ - I ve $H(I)$ - I grafikleri Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8’de verilmiştir. Bu grafiklerden hesaplanan n , Φ_B ve R_s değerleri de Çizelge 4.5, 4.6 ve 4.7’de sunulmuştur.



Şekil 4.6. Au/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) $dV/d(\ln I)$ - I ve (b) $H(I)$ - I grafikleri



Şekil 4.7. Ag/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) $dV/d(\ln I)$ -I ve (b) $H(I)$ -I grafikleri



Şekil 4.8. Cu/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) $dV/d(\ln I)$ -I ve (b) $H(I)$ -I grafikleri

Üretilen Schottky diyotların Φ_B ve R_s değerleri ayrıca modifiye edilmiş Norde metodundan da elde edilmiştir. Modifiye edilmiş Norde Fonksiyonu

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (4.13)$$

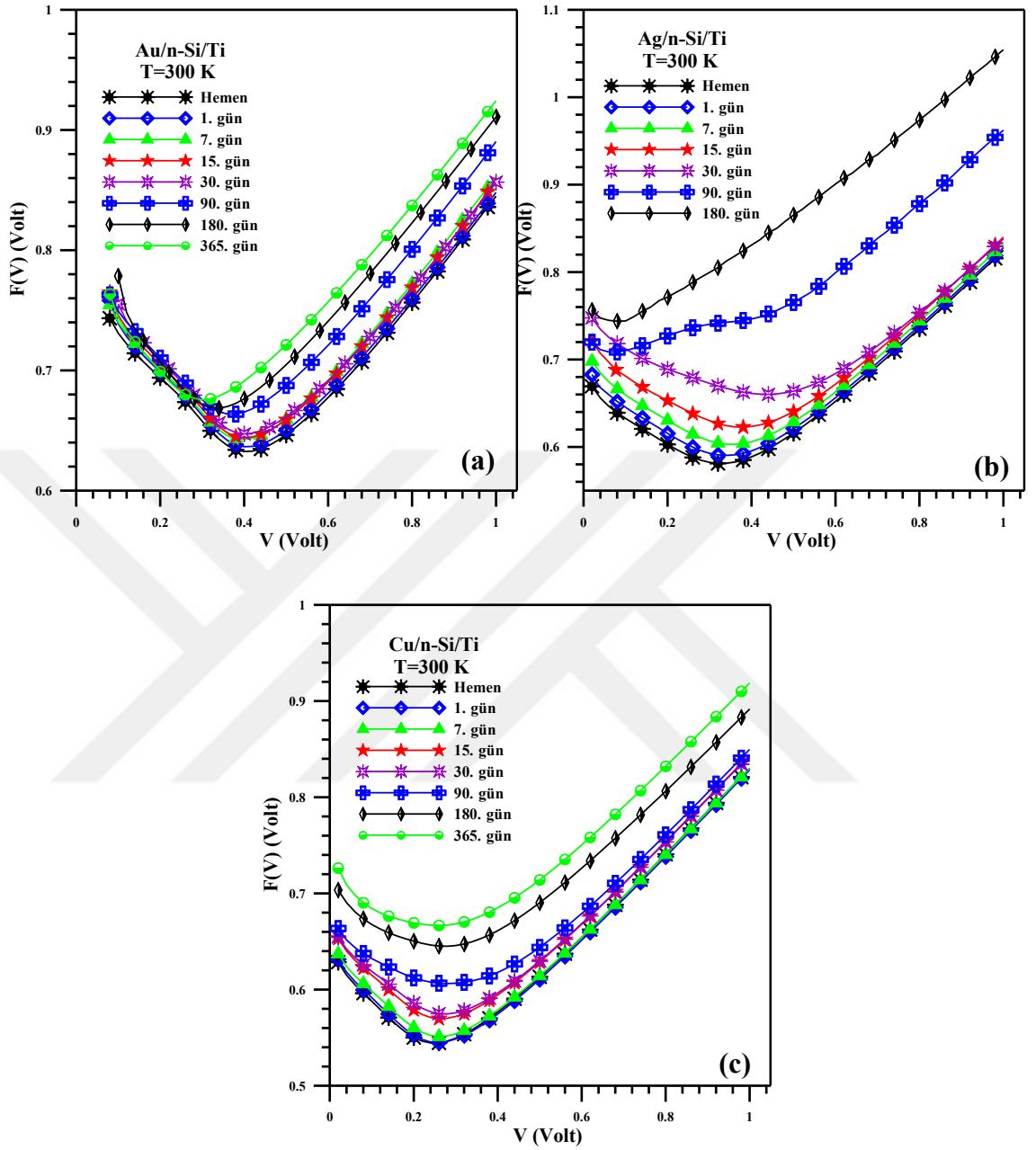
şeklindedir (Norde 1979). Burada $I(V)$, Schottky diyotların I-V karakteristiklerinin deneysel verilerden belirlenen akımdır ve γ keyfi bir boyutsuz tam sayıdır (I-V karakteristiğinden hesaplanan idealite faktöründen daha büyük olmalıdır). Denklem 4.13 dikkate alınarak Au/n-Si/Ti, Ag/n-Si/Ti ve Cu/n-Si/Ti Schottky diyotlarının uygulama gerilimine karşı Norde fonksiyonun grafikleri Şekil 4.9’da verilmiştir. Bu metotta Φ_B değeri aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir;

$$\Phi_B = F_m + \left[\frac{(\gamma-n)}{n} \right] \left[\frac{V_m}{\gamma} - \frac{kT}{q} \right] \quad (4.14)$$

Burada V_m minimum noktadaki gerilim ve F_m ’de minimum akım ve gerilim değerlerine karşılık gelen Norde fonksiyonunun minimum değeridir. Ayrıca, R_s değeri aşağıdaki ilişki kullanılarak hesaplanabilir (Young *et al.* 2011; Zhang *et al.* 2013);

$$R_s = (\gamma - n) \frac{kT}{qI_m} \quad (4.15)$$

(4.14) ve (4.15) denklemleri kullanılarak diyotların Φ_B ve R_s değerleri hesaplanmış ve hesaplanan değerler Çizelge 4.5, 4.6 ve 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.9. (a) Au/n-Si/Ti, (b) Ag/n-Si/Ti ve (c) Cu/n-Si/Ti Schottky diyotlarının farklı günlerdeki $F(V)$ - V değişimleri

Çizelge 4.5. Zamana bağlı olarak Au/n-Si/Ti Schottky diyodunun Norde ve Cheung metodlarına göre hesaplanan diyet parametreleri

Au/n-Si/Ti						
	Norde Metodu		Cheung Metodu			
Zaman (Gün)	Φ_B (eV)	R_s (Ω)	R_s (Ω)	n	Φ_B (eV)	R_s (Ω)
Hemen	0,801	5,834	4,034	1,099	0,821	4,175
1	0,804	6,790	4,444	1,148	0,828	4,685
7	0,804	8,411	4,677	1,103	0,810	4,956
15	0,811	9,011	5,547	1,412	0,813	6,751
30	0,803	9,879	5,628	1,298	0,811	6,431
90	0,815	27,980	22,336	1,301	0,834	24,955
180	0,799	72,159	50,101	1,692	0,819	60,489
365	0,785	203,790	75,410	2,144	0,816	106,314

Çizelge 4.6. Zamana bağlı olarak Ag/n-Si/Ti Schottky diyodunun Norde ve Cheung metodlarına göre hesaplanan diyet parametreleri

Ag/n-Si/Ti						
	Norde Metodu		Cheung Metodu			
Zaman (Gün)	Φ_B (eV)	R_s (Ω)	R_s (Ω)	n	Φ_B (eV)	R_s (Ω)
Hemen	0,703	3,650	2,021	1,313	0,704	2,229
1	0,712	5,287	2,209	1,304	0,718	2,447
7	0,730	5,679	2,474	1,426	0,734	2,870
15	0,753	8,146	3,349	1,197	0,754	3,622
30	0,811	10,638	2,355	1,566	0,805	3,170
90	0,709	22943,720	-	-	-	-
180	0,743	105512,100	-	-	-	-
365	-	-	-	-	-	-

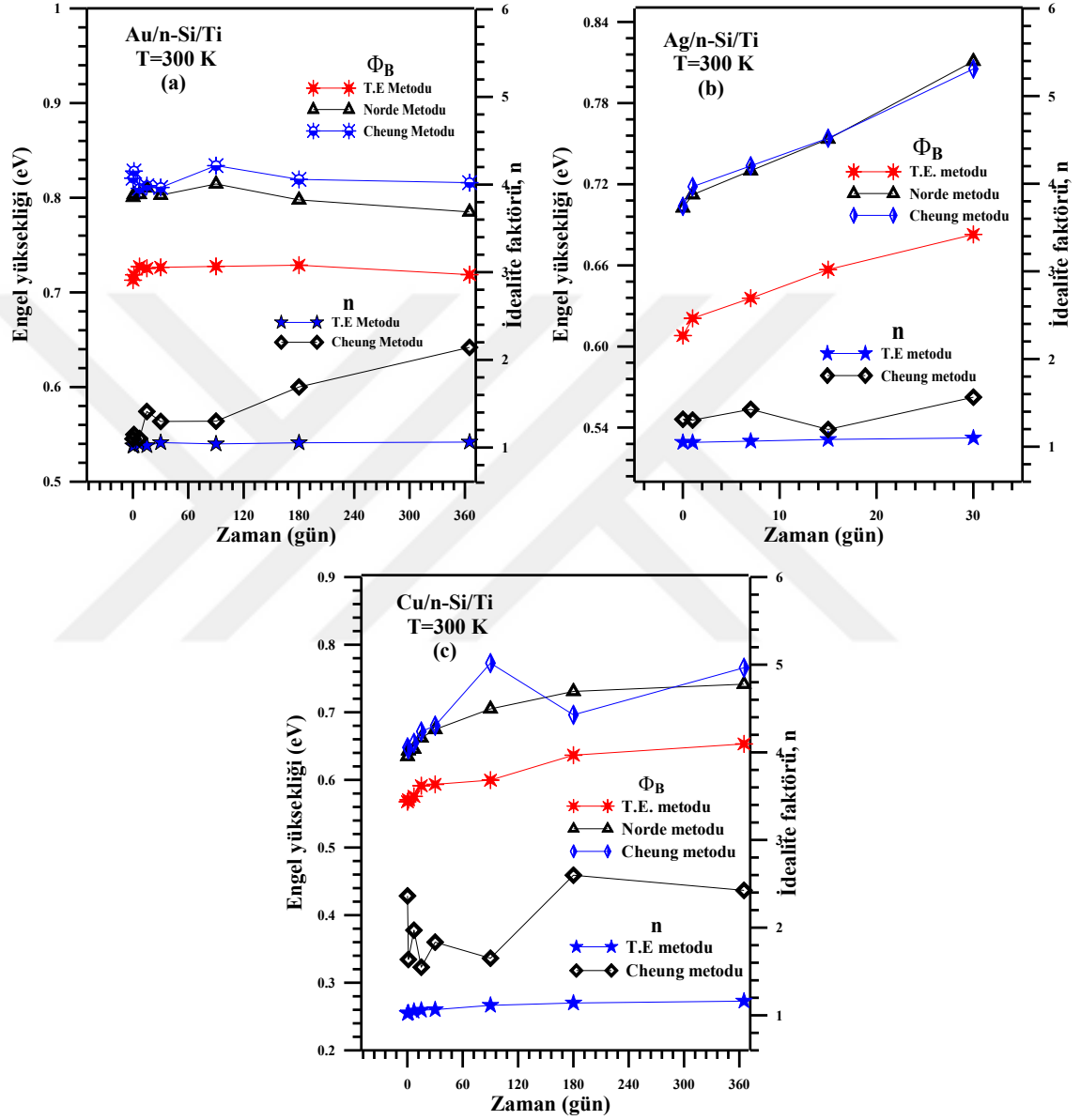
Çizelge 4.7. Zamana bağlı olarak Cu/n-Si/Ti Schottky diyodunun Norde ve Cheung metodlarına göre hesaplanan diyot parametreleri

Cu/n-Si/Ti						
	Norde Metodu		Cheung Metodu			
Zaman (Gün)	Φ_B (eV)	R_s (Ω)	R_s (Ω)	n	Φ_B (eV)	R_s (Ω)
Hemen	0,635	4,286	2,370	2,363	0,648	3,145
1	0,643	2,924	2,530	1,638	0,646	2,876
7	0,646	3,652	2,469	1,972	0,655	3,043
15	0,662	7,408	4,621	1,550	0,672	5,106
30	0,675	6,035	4,035	1,836	0,680	4,908
90	0,705	13,354	4,850	1,652	0,773	5,865
180	0,731	84,190	18,932	2,599	0,696	31,656
365	0,742	279,115	59,100	2,426	0,766	89,630

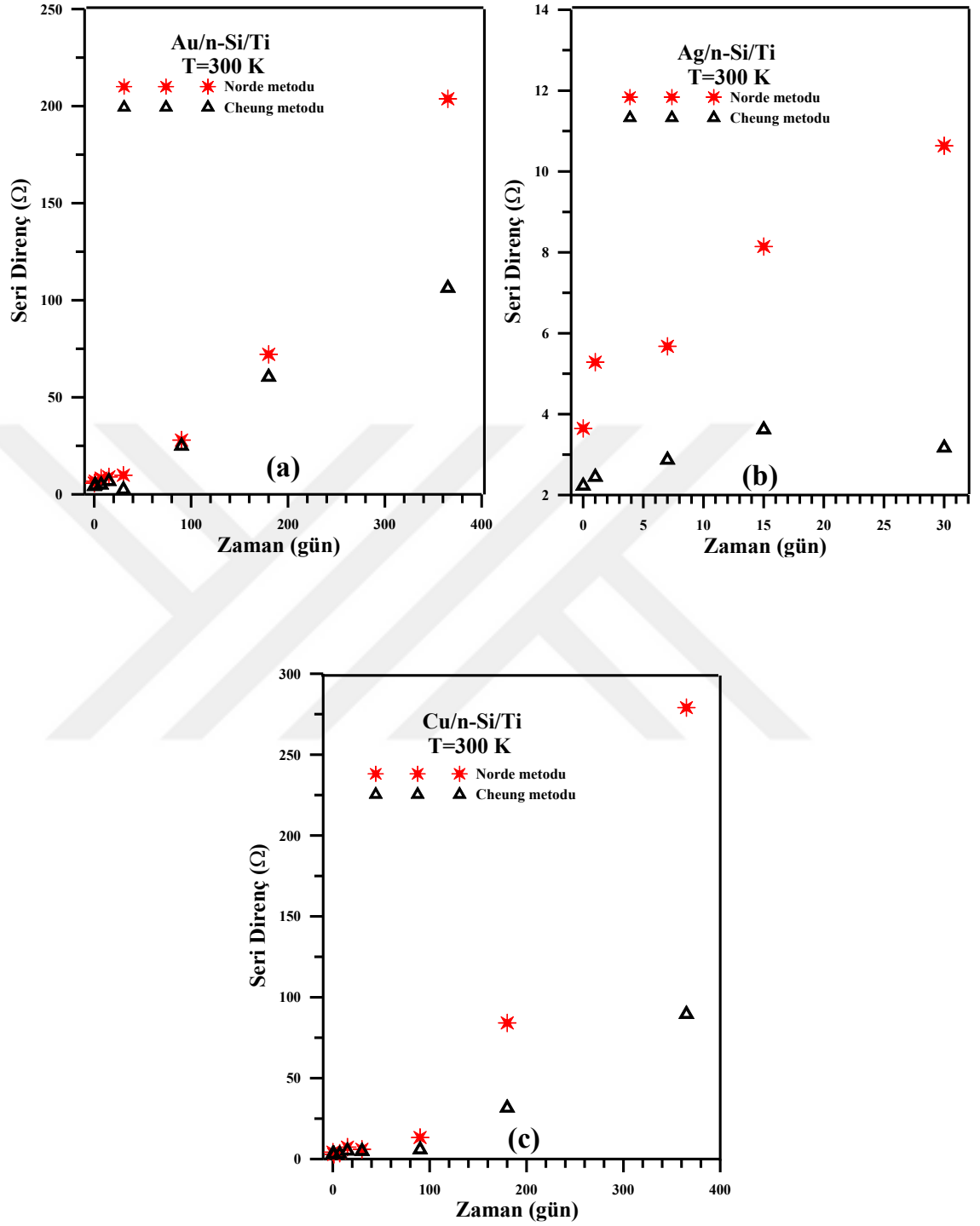
Cheung ve Norde metotlarıyla hesaplanan diyot parametrelerinin termiyonik emisyon metodu ile hesaplanan diyot parametrelerinden daha büyük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Bu artışın sebebi, termiyonik emisyon metodunda $\ln(I)$ -V grafiklerinin düz beslem lineer bölgesi kullanılırken Norde metodunda bütün düz beslem $\ln(I)$ -V karakteristiklerinin ve Cheung metodunda da yüksek akım bölgesinin kullanılması ve bu sebeple seri direnç ve arayüzey durumlarının etkili olması gösterilebilir.

Şekil 4.10 ve 4.11’de Au/n-Si/Ti, Ag/n-Si/Ti ve Cu/n-Si/Ti Schottky diyotların termiyonik emisyon, Cheung ve Norde metotları ile hesaplanan diyot parametrelerinin zamana göre değişimlerini gösteren grafikler verilmiştir. Termiyonik emisyon metoduyla hesaplanan Au/n-Si/Ti Schottky diyot idealite faktörü zamanla hemen hemen değişmeyen bir değere sahip iken Norde metodunda zamanla artma gözlenmiştir. Engel yüksekliğinin zamana bağlı değişiminde her üç metotla elde edilen değerler uyumludur ve aynı tarzda değişmektedir. Her iki metotla hesaplanan seri direnç değerleri zamanla artış göstermiştir. Ag/n-Si/Ti Schottky diyodunda idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri zamanla net bir artış göstermiştir. Cu/n-Si/Ti Schottky diyodunda ise termiyonik emisyon metodu ile hesaplanan idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri zamanla hemen hemen değişmezken, diğer iki metotla hesaplanan değerler zamanla hafif artış göstermiştir. Bu numunede seri direnç değerleri ise zamanla belirli bir artış

göstermiştir. Artan yaşlanma zamanı ile seri direncin artması, arayüzeyde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşan ince yeni arayüzey tabakalarına atfedilebilir.



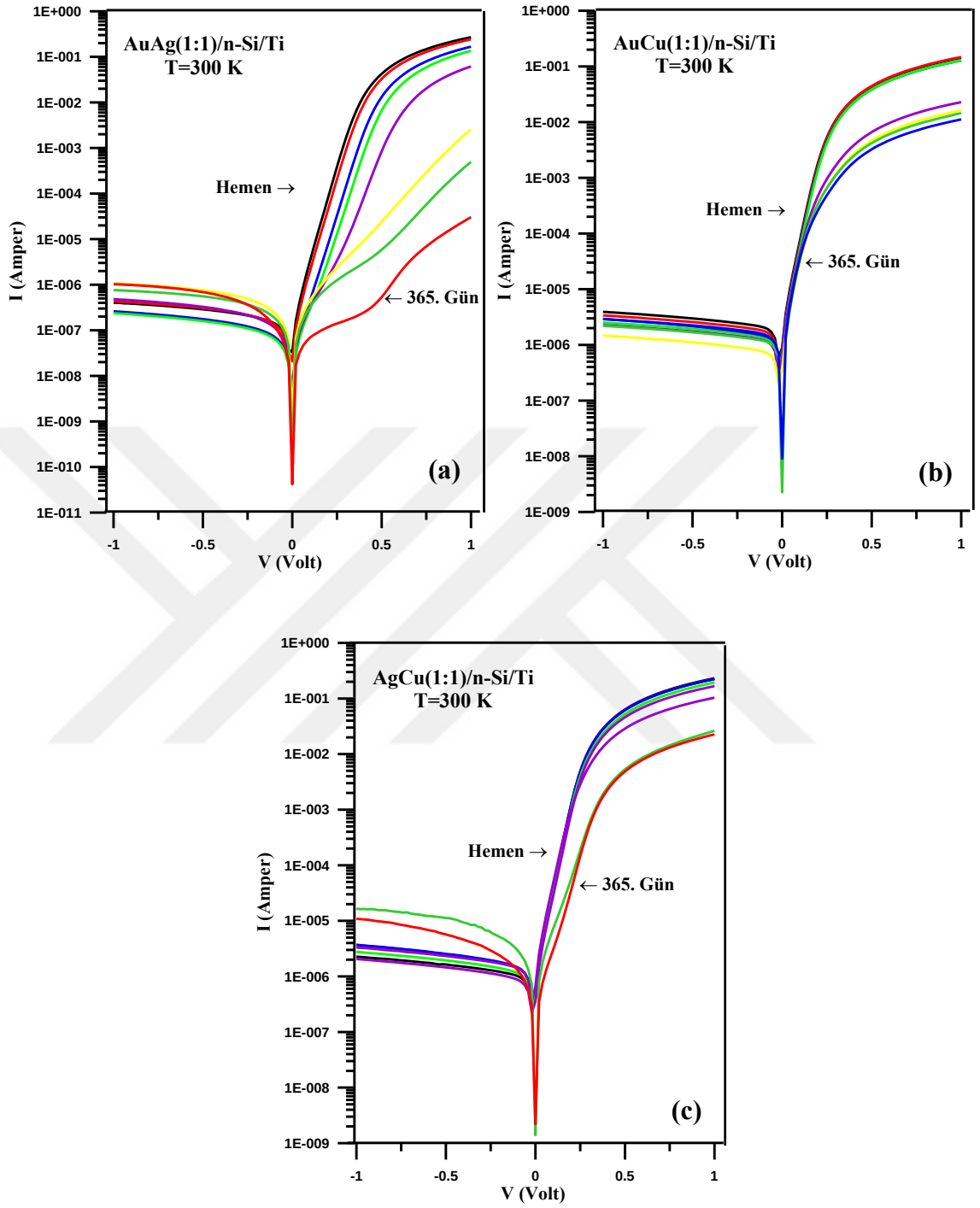
Şekil 4.10. (a) Au/n-Si/Ti, (b) Ag/n-Si/Ti ve (c) Cu/n-Si/Ti Schottky diyotlarının zamana bağlı idealite faktörü ve engel yüksekliği değişimleri



Şekil 4.11. (a) Au/n-Si/Ti, (b) Ag/n-Si/Ti ve (c) Cu/n-Si/Ti Schottky diyotlarının zamana bağlı seri direnç değişimleri

4.3.2 AuAg(1:1)/n-Si/Ti, AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotların zamana bağılı I-V ölçümlerinden diyot parametrelerinin hesaplanması

Ağırlıkça eşit oranlarda Au, Ag ve Cu metalleri ile oluşturulan AuAg, AuCu ve AgCu alaşımları kullanılarak elde edilen AuAg(1:1)/n-Si/Ti, AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve AgCu(1:1)/n-Si/Ti alaşım-yarıiletken Schottky diyotlarının farklı günlerdeki (hemen, 1., 7., 15., 30., 90., 180. ve 365. gün) yarı logaritmik düz ve ters beslem akım-voltaj karakteristikleri Şekil 4.12’de verilmiştir. AuAg(1:1)/n-Si/Ti Schottky diodunun karakteristikleri 30. güne kadar oldukça kararlıdır. Ancak daha sonraki ölçümlerde karakteristikler bozulmaya başlamıştır. AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarında ise I-V karakteristikleri daha karalıdır. Ayrıntıları önceki kesimde anlatılan termiyonik emisyon metodundan hesaplanan zamana bağılı diyot parametreleri herbir diyot için sırasıyla Çizelge 4.8, 4.9 ve 4.10’da verilmiştir. AuAg(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyonu için idealite faktörü değerinin zamanla arttığı ve engel yüksekliği değerinin ise zamanla belirli bir değer aralığında değişim gösterdiği, AuCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyonu için idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerinin sırasıyla 1,021-1,088, 0,566-0,581 eV aralığında hafifçe değiştiiği ve AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyonu için idealite faktörü değerlerinin 1,020-1,673 aralığında zamanla arttığı, engel yüksekliği değerlerinin ise 0,585-0,612 eV aralığında olduğu gözlemlenmiştir. Yani hesaplanan bu parametrelere göre AuCu(1:1) ve AgCu(1:1) alaşımları ile üretilen diyotların arayüzeyleri AuAg(1:1) diyoduna göre daha kararlıdır.



Şekil 4.12. (a) AuAg(1:1)/n-Si/Ti, (b) AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve (c) AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının farklı günlerdeki akım-voltaj karakteristikleri

Çizelge 4.8. Zamana bağlı olarak AuAg(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun termiyonik emisyon metoduna göre hesaplanan diyot parametreleri

AuAg(1:1)/n-Si/Ti			
	Termiyonik Emisyon Metodu		
Zaman (Gün)	I₀ (A)	n	Φ_B (eV)
Hemen	8,81E-08	1,054	0,644
1	5,83E-08	1,059	0,655
7	2,34E-08	1,259	0,679
15	1,74E-08	1,437	0,686
30	8,09E-09	1,674	0,706
90	2,16E-07	4,098	0,621
180	4,93E-08	4,111	0,659
365	-	-	-

Çizelge 4.9. Zamana bağlı olarak AuCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun termiyonik emisyon metoduna göre hesaplanan diyot parametreleri

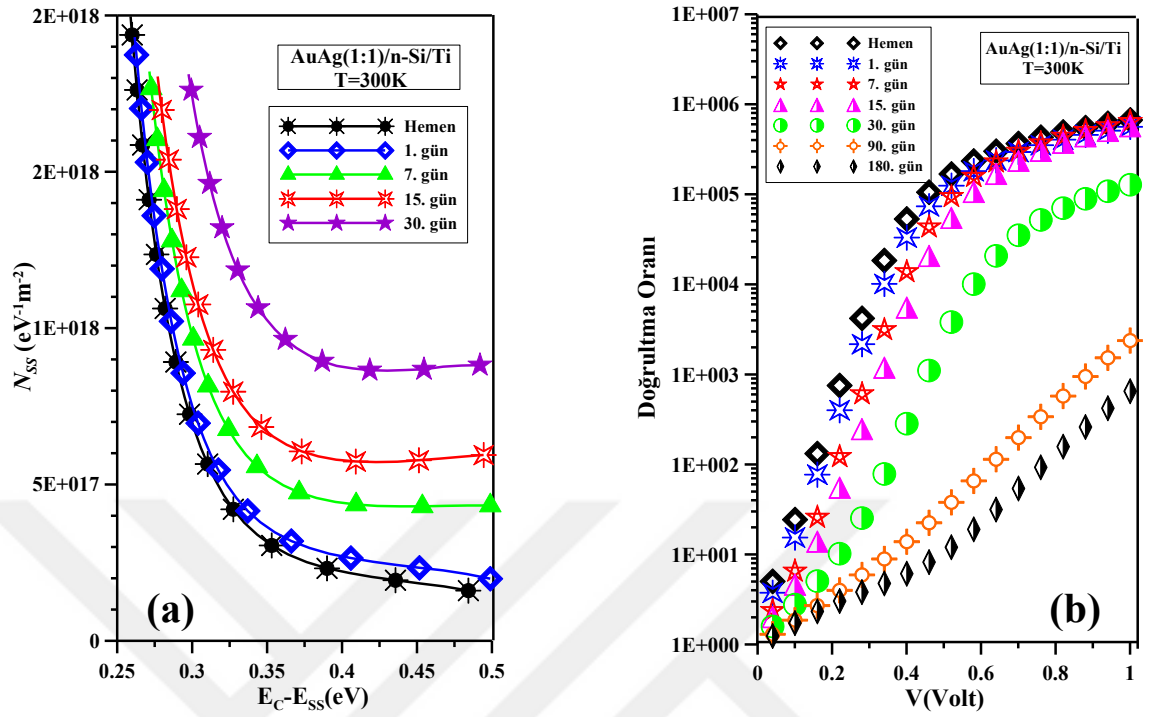
AuCu(1:1)/n-Si/Ti			
	Termiyonik Emisyon Metodu		
Zaman (Gün)	I₀ (A)	n	Φ_B (eV)
Hemen	1,83E-06	1,021	0,566
1	1,62E-06	1,020	0,569
7	1,49E-06	1,028	0,571
15	1,29E-06	1,019	0,575
30	1,38E-06	1,058	0,573
90	1,22E-06	1,075	0,576
180	1,03E-06	1,080	0,581
365	1,09E-06	1,085	0,579

Çizelge 4.10. Zamana bağlı olarak AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun termiyonik emisyon metoduna göre hesaplanan diyot parametreleri

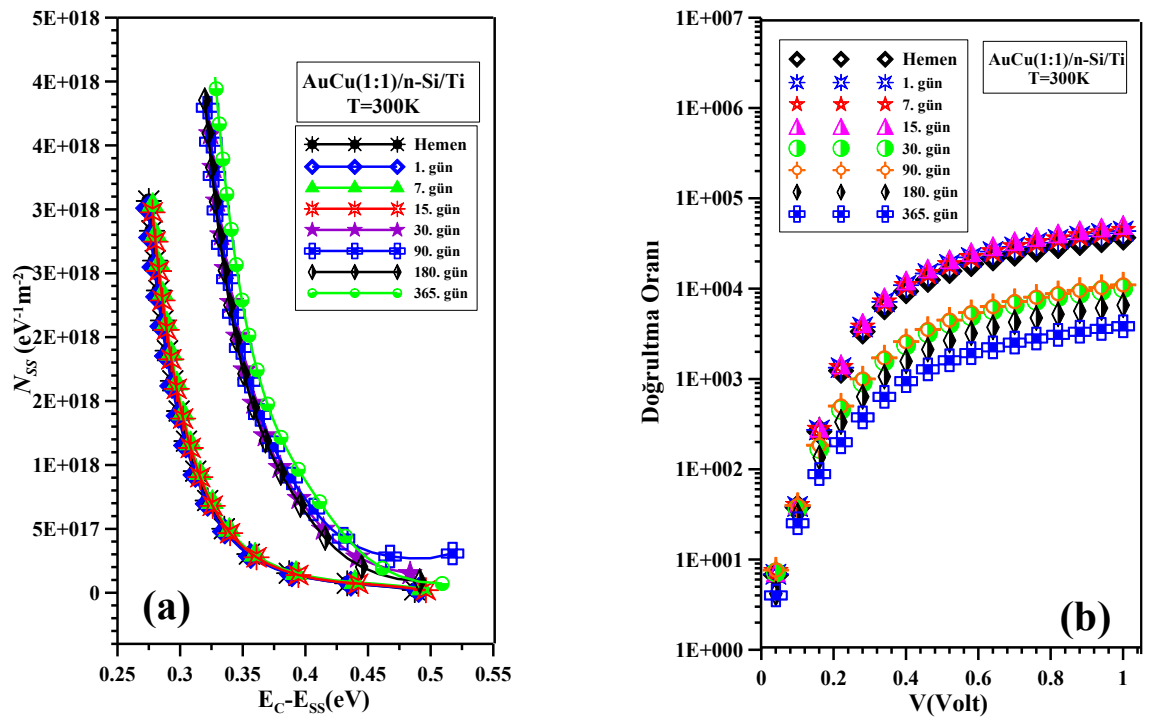
AgCu(1:1)/n-Si/Ti			
	Termiyonik Emisyon Metodu		
Zaman (Gün)	I_0 (A)	n	Φ_B (eV)
Hemen	8,81E-07	1,020	0,585
1	1,05E-06	1,035	0,580
7	1,05E-06	1,035	0,580
15	9,70E-07	1,050	0,582
30	7,53E-07	1,042	0,589
90	1,31E-06	1,048	0,575
180	5,27E-07	1,647	0,598
365	3,03E-07	1,673	0,612

AuAg(1:1)/n-Si/Ti, AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotların zamana bağlı arayüzey hal yoğunluğunu ve doğrultma oranlarını veren grafikler Şekil 4.13, 4.14 ve 4.15’de verilmiştir. Her üç diyot için de arayüzey hal yoğunlukları bant ortasından iletkenlik bant kenarına doğru eksponansiyel artış göstermektedir ve artan yaşlanma zamanıyla bant ortasına doğru kaymaktadır. Arayüzey hallerinin maksimum yoğunluğu 2×10^{18} - 4×10^{18} $\text{eV}^{-1}\text{m}^{-2}$ mertebesinde ve bu değerler farklı enerjilere karşılık gelmektedir. Yine diyotların hemen ölçülen I-V karakteristiklerinden hesaplanan doğrultma oranları 10^5 mertebesinde iken bu değer 365. günde 10^3 mertebesine azalmıştır. AuAg(1:1) alaşımından üretilen diyodun karakteristikleri 30. günden sonra önemli ölçüde bozulmaya doğru gittiğinden dolayı doğrultma oranı da önemli ölçüde azalmıştır.

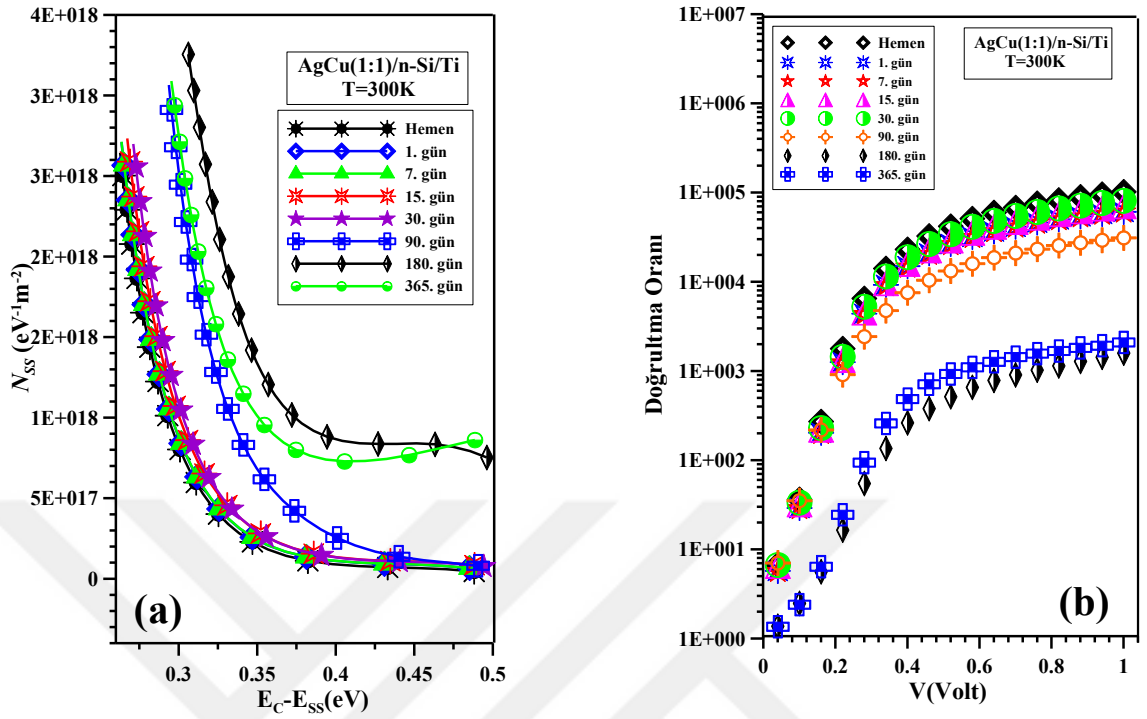
Ayrıca üç farklı düz beslem voltajında diyot akımının zaman ile değişimleri Şekil 4.16’da verilmiştir. Şekil 4.16’daki grafiklere bakıldığında diyotların 90. gün ölçümlerinden sonra doğru beslem akımlarının kararlı hale geldiği söylenebilir.



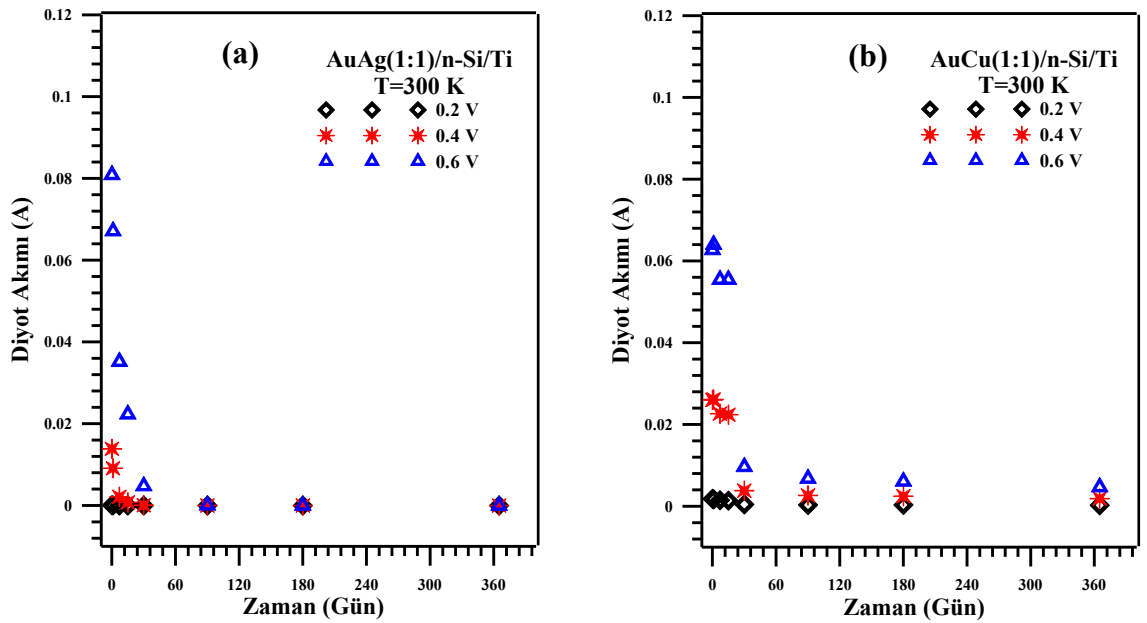
Şekil 4.13. AuAg(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) N_{ss} ve (b) doğrultma oranı değişimleri



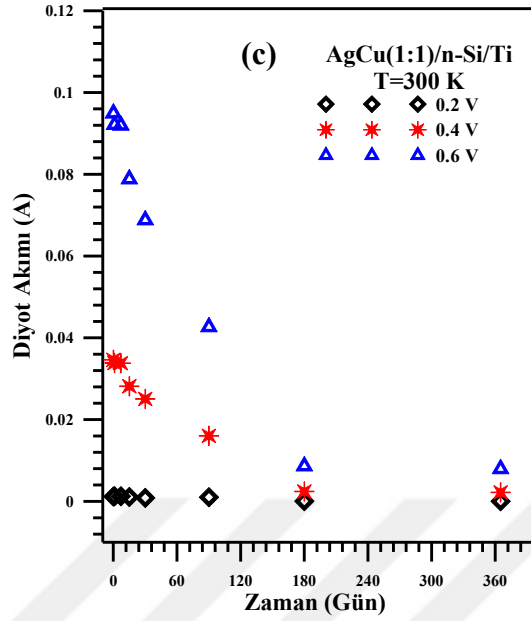
Şekil 4.14. AuCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) N_{ss} ve (b) doğrultma oranı değişimleri



Şekil 4.15. AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) N_{ss} ve (b) doğrultma oranı değişimleri

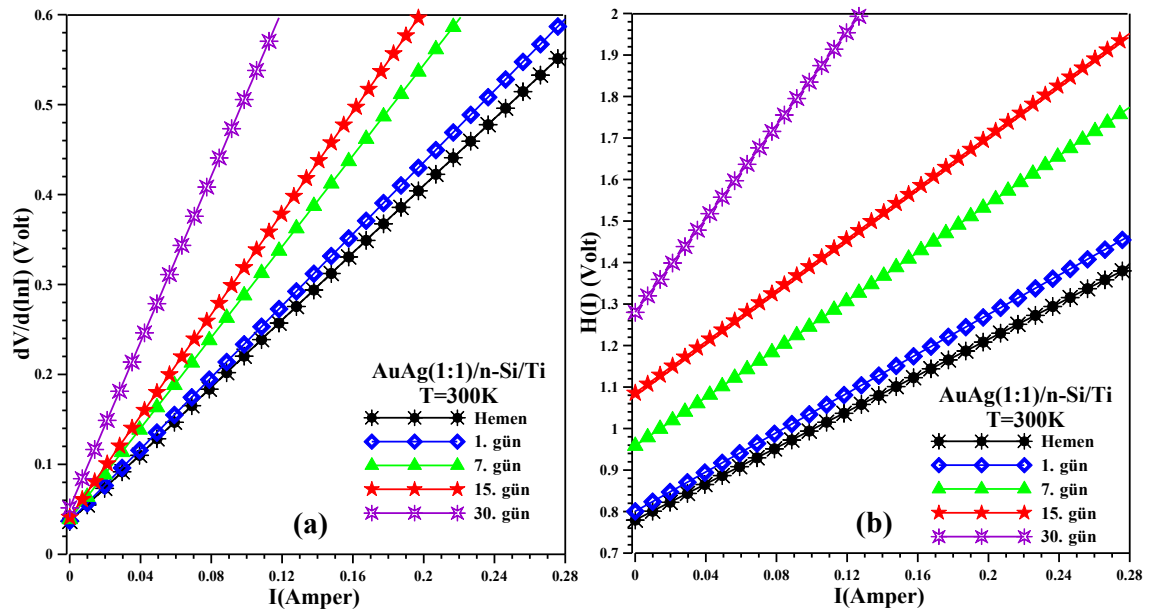


Şekil 4.16. (devam)

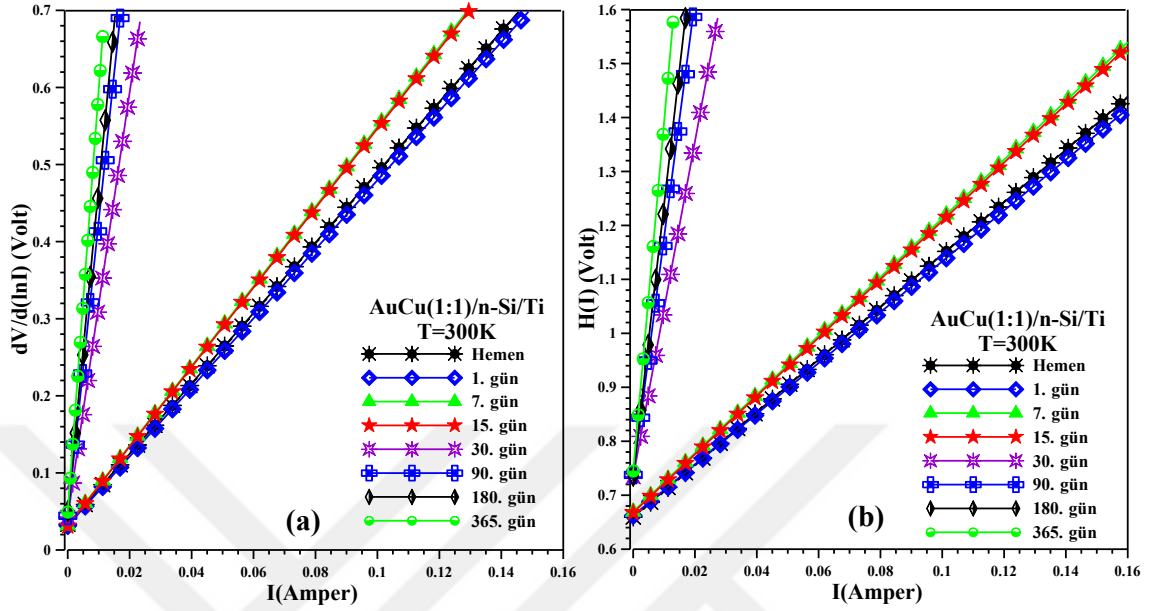


Şekil 4.16. (a) AuAg(1:1)/n-Si/Ti, (b) AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve (c) AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının üç farklı düz beslem voltajlarındaki zamana bağlı diyot akımı değişimleri

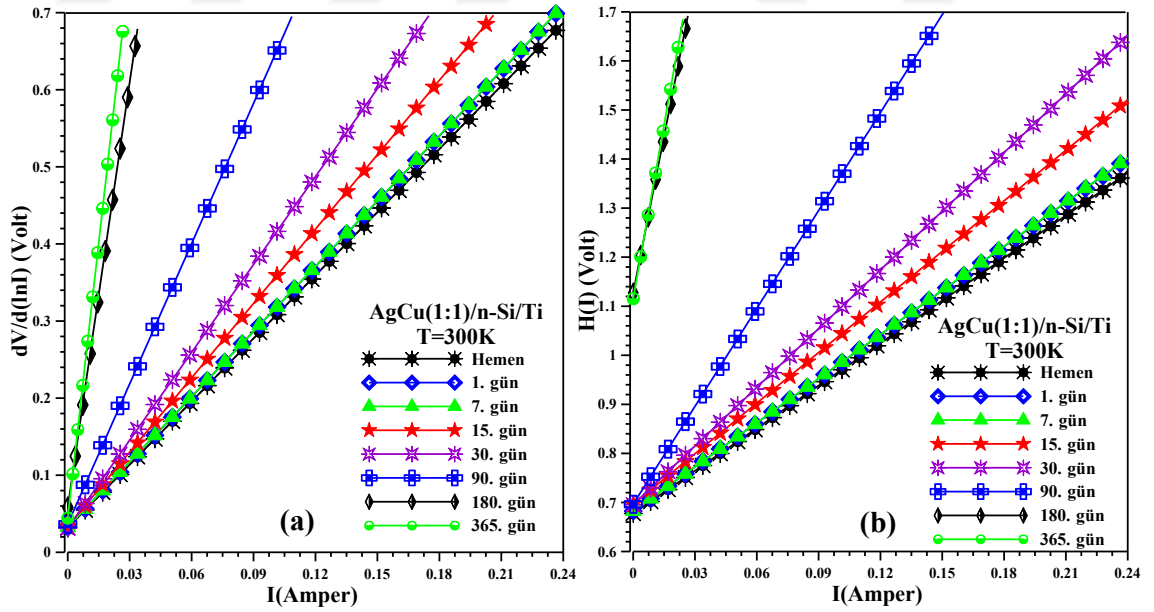
AuAg(1:1)/n-Si/Ti, AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının Cheung metodundan zamana bağlı olarak çizilen $dV/d(\ln I)$ -I ve $H(I)$ -I grafikleri Şekil 4.17, 4.18 ve 4.19’da verilmiştir.



Şekil 4.17. AuAg(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) $dV/d(\ln I)$ -I ve (b) $H(I)$ -I grafikleri



Şekil 4.18. AuCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) $dV/d(\ln I)$ -I ve (b) $H(I)$ -I grafikleri

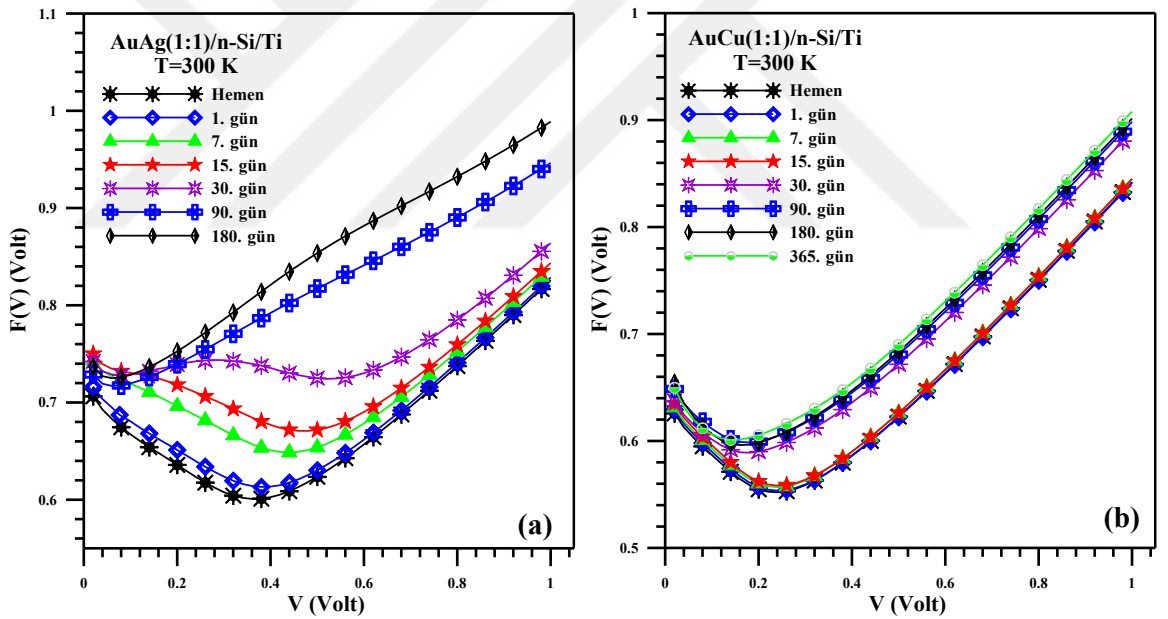


Şekil 4.19. AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) $dV/d(\ln I)$ -I ve (b) $H(I)$ -I grafikleri

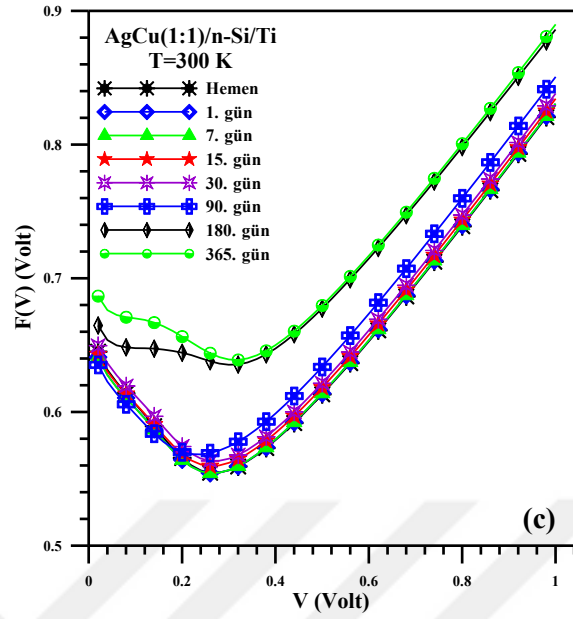
AuAg(1:1)/n-Si/Ti, AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotların $dV/d(\ln I)$ -I grafiklerinin doğru kısmının eğimlerinden R_s seri direnç değerleri ve

doğruların düşey eksenini kestiği noktalardan da idealite faktörü değerleri ve $H(I)$ - I grafiklerinin doğru kısımlarının eğimlerinden R_s seri direnç değerleri ve doğruların düşey eksenini kestiği noktalardan da engel yüksekliği değerleri bulunmuştur ve bu değerler sırasıyla Çizelge 4.11, 4.12 ve 4.13’de verilmiştir.

Ayrıca 4.13 denkleminde yararlanarak $AuAg(1:1)/n-Si/Ti$, $AuCu(1:1)/n-Si/Ti$ ve $AgCu(1:1)/n-Si/Ti$ Schottky diyotlarının uygulama voltajına karşı Norde fonksiyonlarının değişim grafikleri Şekil 4.20’de verilmiştir. Bu grafiklerden ve 4.14 ve 4.15 denklemlerinden faydalanarak Φ_B ve R_s değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler de sırasıyla Çizelge 4.11, 4.12 ve 4.13’de verilmiştir.



Şekil 4.20. (devam)



Şekil 4.20. (a) AuAg(1:1)/n-Si/Ti, (b) AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve (c) AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının farklı günlerdeki F(V)- V değişimleri

Çizelge 4.11. Zamana bağlı olarak AuAg(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun Norde ve Cheung metodlarına göre hesaplanan diyot parametreleri

AuAg(1:1)/n-Si/Ti						
	Norde Metodu		Cheung Metodu			
Zaman (Gün)	Φ_B (eV)	R_s (Ω)	R_s (Ω)	n	Φ_B (eV)	R_s (Ω)
Hemen	0,739	3,573	1,866	1,416	0,740	2,177
1	0,759	3,882	1,993	1,438	0,756	2,371
7	0,763	3,781	2,526	1,509	0,761	2,912
15	0,755	3,126	2,819	1,592	0,762	3,093
30	0,769	10,069	4,609	1,998	0,765	5,632
90	0,714	100048,914	-	-	-	-
180	0,722	134376,592	-	-	-	-
365	-	-	-	-	-	-

Çizelge 4.12. Zamana bağlı olarak AuCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun Norde ve Cheung metodlarına göre hesaplanan diyot parametreleri

AuCu(1:1)/n-Si/Ti						
	Norde Metodu		Cheung Metodu			
Zaman (Gün)	Φ_B (eV)	R_s (Ω)	R_s (Ω)	n	Φ_B (eV)	R_s (Ω)
Hemen	0,642	5,705	4,567	1,292	0,646	4,860
1	0,644	6,041	4,481	1,219	0,650	4,710
7	0,646	6,825	5,173	1,231	0,651	5,436
15	0,649	7,273	5,155	1,204	0,655	5,405
30	0,646	73,012	27,564	1,648	0,694	31,106
90	0,654	104,057	38,232	1,723	0,686	43,980
180	0,642	138,359	42,062	1,944	0,682	50,226
365	0,638	244,751	54,797	1,903	0,687	64,675

Çizelge 4.13. Zamana bağlı olarak AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun Norde ve Cheung metodlarına göre hesaplanan diyot parametreleri

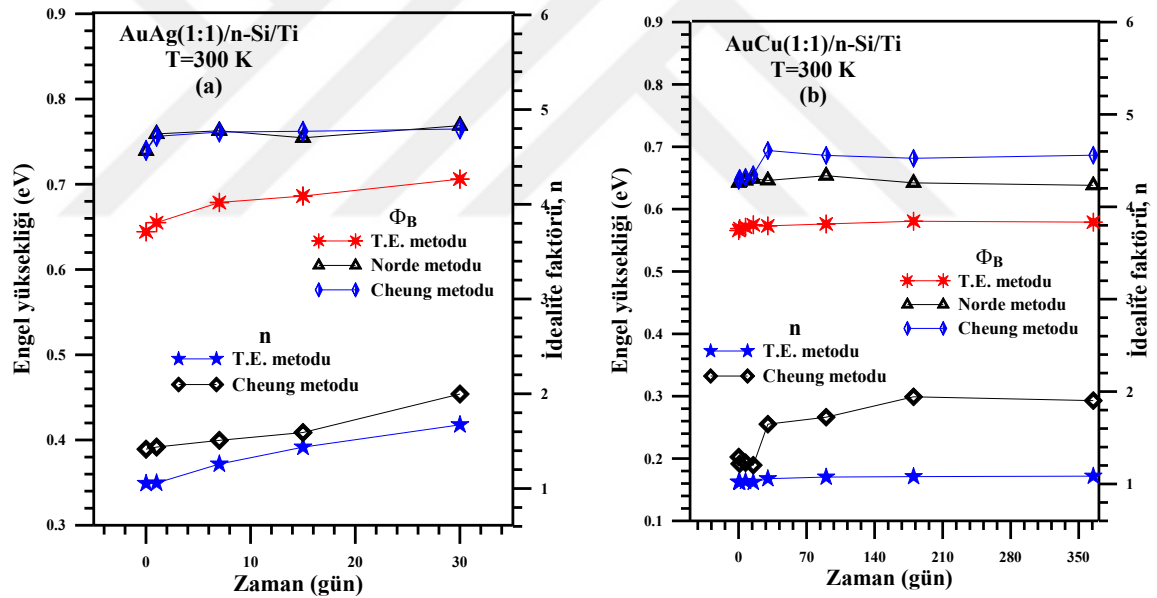
AgCu(1:1)/nSi/Ti						
	Norde Metodu		Cheung Metodu			
Zaman (Gün)	Φ_B (eV)	R_s (Ω)	R_s (Ω)	n	Φ_B (eV)	R_s (Ω)
Hemen	0,655	4,289	2,730	1,231	0,664	2,892
1	0,651	4,173	2,819	1,265	0,660	2,996
7	0,651	4,168	2,820	1,266	0,660	2,999
15	0,654	5,034	3,216	1,290	0,663	3,436
30	0,659	5,904	3,801	1,211	0,668	3,987
90	0,654	10,388	6,067	1,409	0,664	6,653
180	0,662	16,147	18,384	2,250	0,685	21,271
365	0,664	17,388	23,798	1,715	0,667	23,608

Çizelge 4.11, 4.12 ve 4.13'den de görüldüğü gibi yöntemlerin farkından dolayı, hesaplanan parametrelerin değerlerinde de farklılıklar söz konusudur. Cheung ve Norde metodundan hesaplanan değerler termiyonik emisyon metodundan hesaplanan değerlerden daha büyüktür.

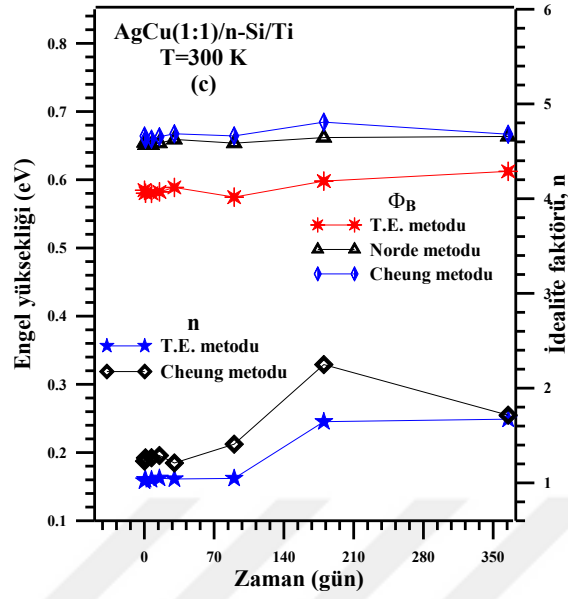
AuAg(1:1)/n-Si/Ti, AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotların farklı metotlarla (Termiyonik Emisyon, Cheung ve Norde) hesaplanan diyot parametrelerinin

(idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç) zamanla değişim grafikleri Şekil 4.21 ve 4.22’de verilmiştir.

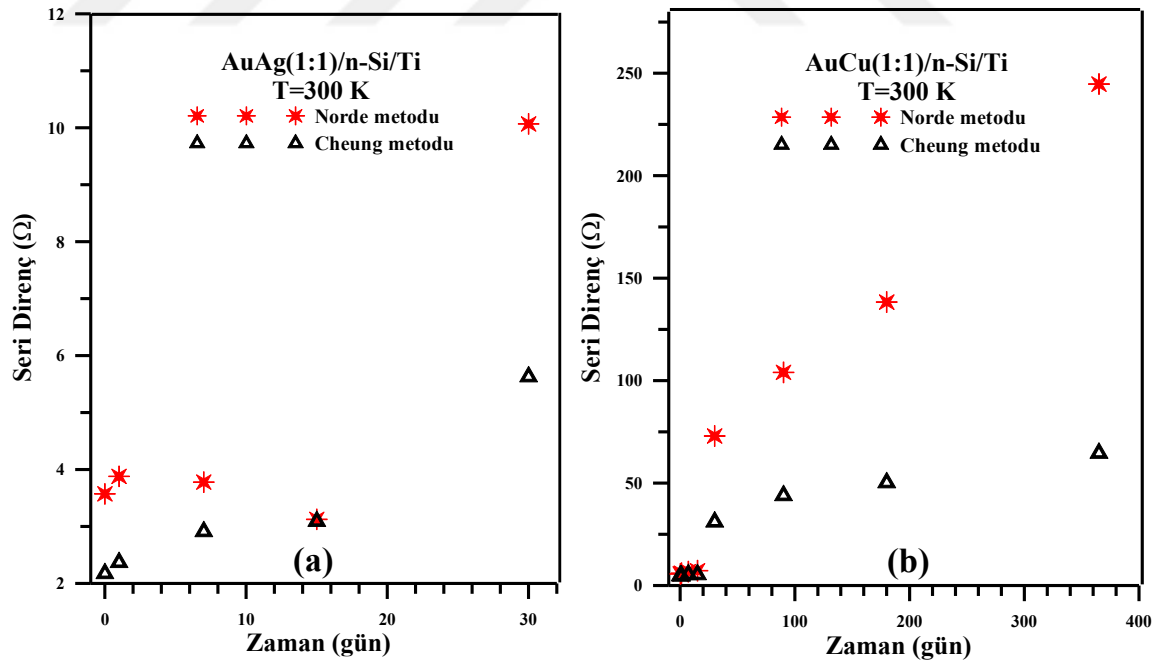
AuAg(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyot parametrelerinin farklı metotlarla kıyaslanabilmesi için çizilen şekil 4.21’deki grafik 30 gün ile sınırlandırılmıştır. AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının parametreleri 365 gün boyunca sağlıklı ölçümler verdiğinden bu diyotlar için bir sınırlama yapılmamıştır. Şekil 4.21 dikkate alındığında, AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının, AuAg(1:1)/n-Si/Ti diyodununa göre daha kararlı bir yapıda oldukları söylenebilir. Şekil.4.22’deki seri direnç değişimleri her üç diyot içinde zaman bağı olarak artış göstermektedir.



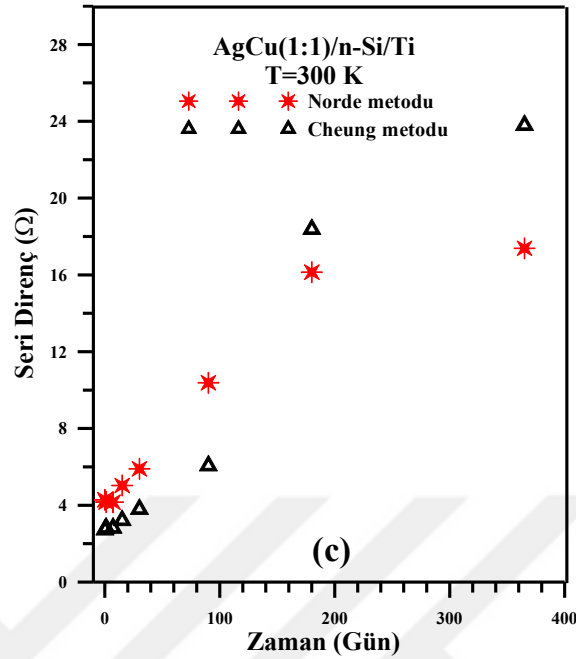
Şekil 4.21. (devam)



Şekil 4.21 (a) AuAg(1:1)/n-Si/Ti, (b) AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve (c) AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının zamana bağlı idealite faktörü ve engel yükseklığı değişimleri



Şekil 4.22. (devam)



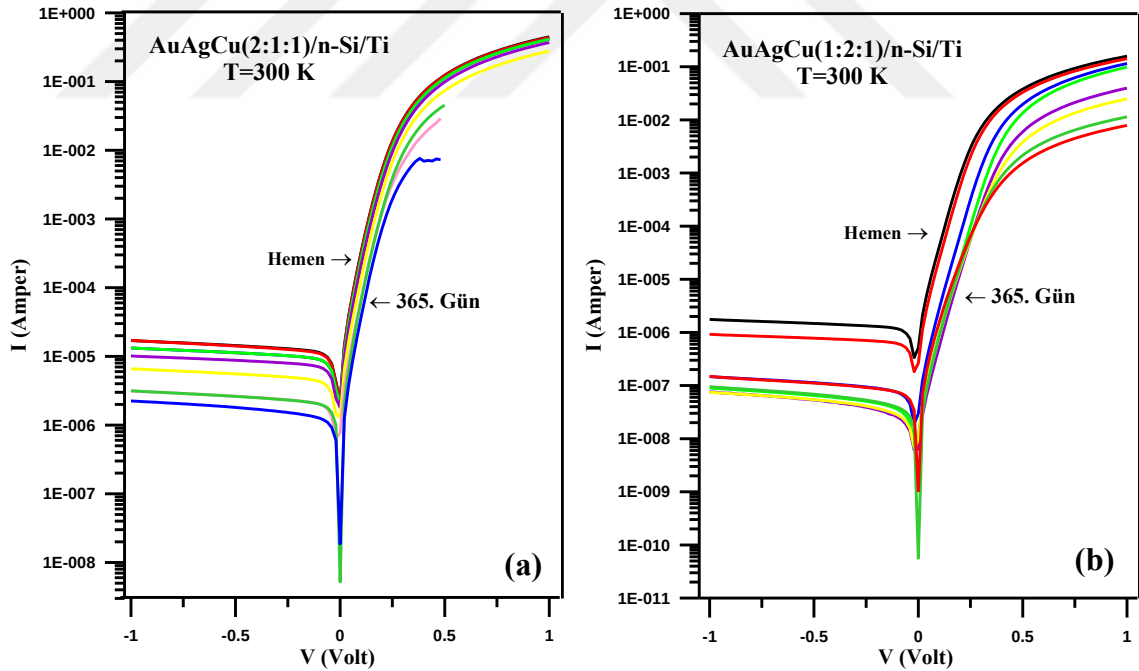
Şekil 4.22. (a) AuAg(1:1)/n-Si/Ti, (b) AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve (c) AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının zamana bağlı seri direnç değişimleri

İdealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç parametreleri AuAg(1:1)/n-Si/Ti diyodundan 30. güne kadar, AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve AgCu(1:1)/n-Si/Ti diyotlarında ise 365. güne kadar zamana bağlı olarak değerlendirildi. Şekil 4.21'den de görüldüğü gibi, her üç diyodun da hem idealite faktörleri hem de engel yükseklikleri zamanla oldukça kararlıdır. Aynı zamanda her üç diyot için Cheung ve Norde metodlarından hesaplanan seri direnç değerlerinin artan yaşlanma zamanıyla arttığı tespit edilmiştir. Diyotların seri dirençlerinin zamanla artması, arayüzeyde meydana gelen değişimlere atfedilebilir.

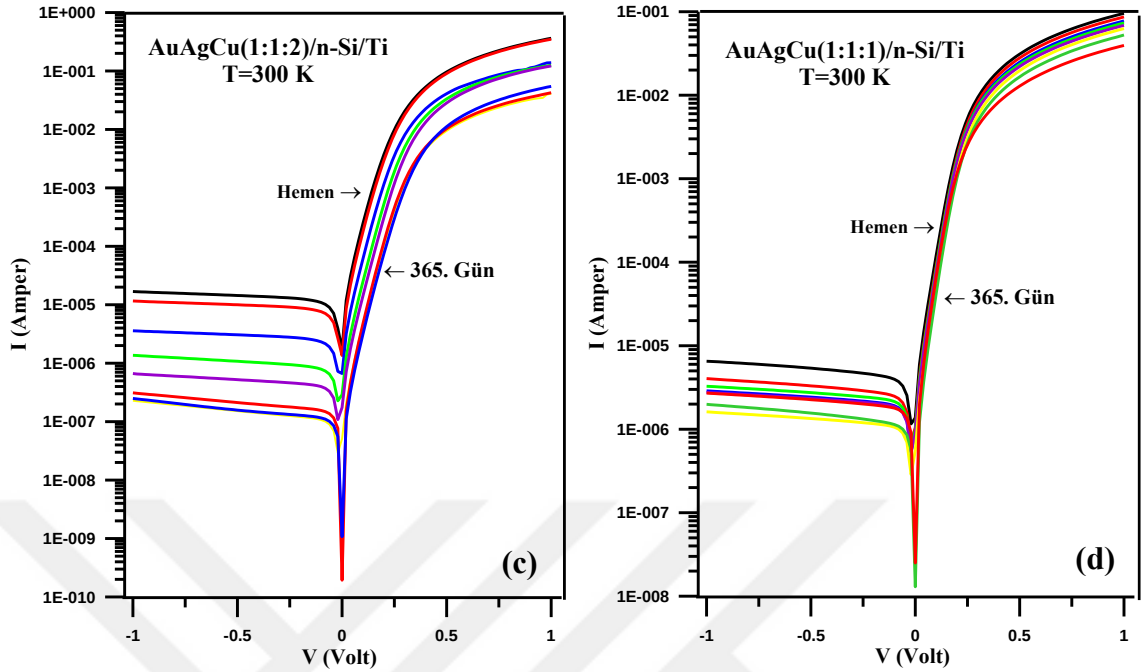
4.3.3 AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti ve AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının zamana bağlı I-V ölçümlerinden diyot parametrelerinin hesaplanması

Ağırlıkça farklı oranlarda Au, Ag ve Cu metalleri ile oluşturulan AuAgCu alaşımları kullanılarak elde edilen AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti ve AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti alaşım-yarıiletken Schottky diyotlarının farklı günlerdeki (hemen, 1., 7., 15., 30., 90., 180. ve 365. gün) yarı

logaritmik düz ve ters beslem akım-voltaj karakteristikleri Şekil 4.23’de verilmiştir. Bu karakteristikler kullanılarak termiyonik emisyon metodundan zamana bağlı olarak hesaplanan diyot parametreleri tablo halinde Çizelge 4.14, 4.15, 4.16 ve 4.17’de verilmiştir. Bu çizelgelerden de görülebileceği gibi, AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti diyodunda idealite faktörü 1,033-1,082, engel yüksekliği 0,526-0,569 eV aralıklarında, AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti diyodunda idealite faktörü 1,053-1,115, engel yüksekliği 0,578-0,690 eV aralıklarında, AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti diyodunda idealite faktörü 1,029-1,107, engel yüksekliği 0,534-0,644 eV aralıklarında ve AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti diyodunda idealite faktörü 1,011-1,072, engel yüksekliği 0,553-0,627 eV aralıklarında zamanla değişim göstermiştir. Tüm diyotlarda idealite faktörünün, ideal değer olan 1’e son derece yakın olduğu görülmüştür. Aynı zamanda diyotların ters beslem durumlarında saturasyon akımlarının artan ters beslem gerilimiyle değişmediği yani hemen hemen sabit oldukları tespit edilmiştir.



Şekil 4.23. (devam)



Şekil 4.23 (a) AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, (b) AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti, (c) AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti ve (d) AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının farklı günlerdeki akım-voltaj karakteristikleri

Çizelge 4.14 Zamana bağlı olarak AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti Schottky diodunun termiyonik emisyon metoduna göre hesaplanan diyot parametreleri

AuAgCu (2:1:1)/n-Si/Ti			
	Termiyonik Emisyon Metodu		
Zaman (Gün)	I_0 (A)	n	Φ_B (eV)
Hemen	8,47E-06	1,033	0,526
1	8,20E-06	1,034	0,527
7	6,89E-06	1,041	0,532
15	5,66E-06	1,052	0,537
30	3,49E-06	1,061	0,549
90	1,86E-06	1,068	0,565
180	1,61E-06	1,068	0,569
365	1,74E-06	1,082	0,567

Çizelge 4.15 Zamana bağlı olarak AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun termiyonik emisyon metoduna göre hesaplanan diyot parametreleri

AuAgCu (1:2:1)/n-Si/Ti			
	Termiyonik Emisyon Metodu		
Zaman (Gün)	I₀ (A)	n	Φ_B (eV)
Hemen	1,15E-06	1,053	0,578
1	6,08E-07	1,060	0,594
7	6,97E-08	1,062	0,650
15	2,59E-08	1,071	0,676
30	1,48E-08	1,074	0,690
90	2,40E-08	1,082	0,678
180	2,39E-08	1,088	0,678
365	4,46E-08	1,115	0,662

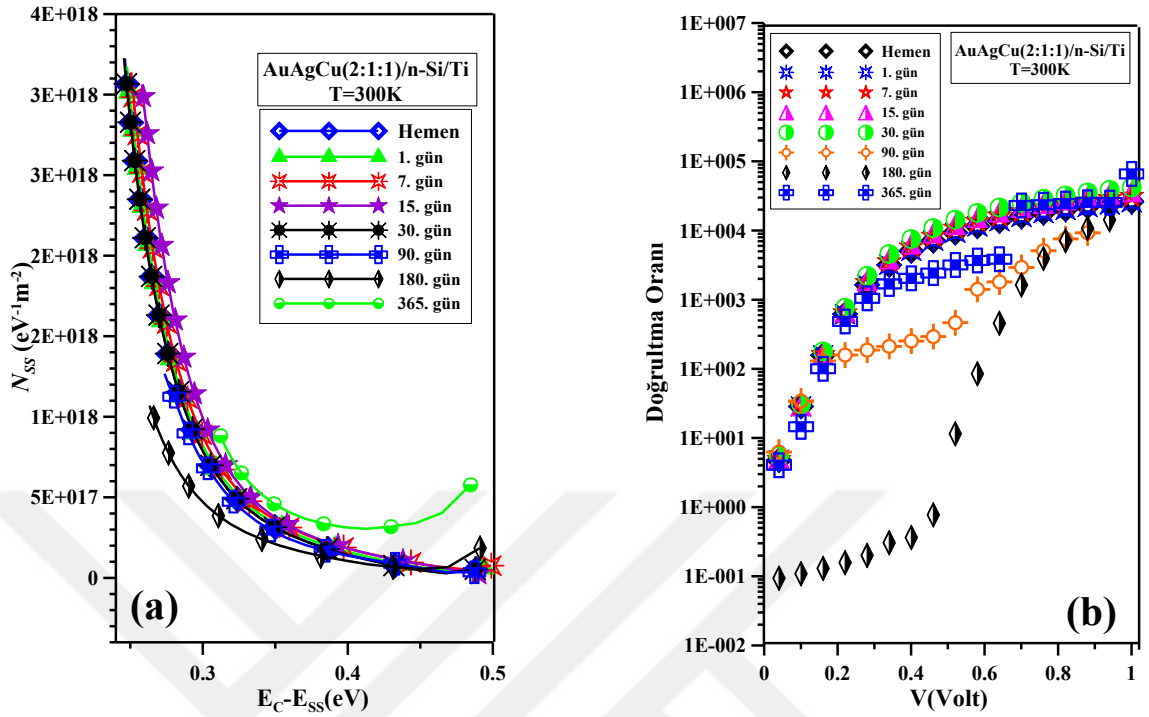
Çizelge 4.16 Zamana bağlı olarak AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti Schottky diyodunun termiyonik emisyon metoduna göre hesaplanan diyot parametreleri

AuAgCu (1:1:2)/n-Si/Ti			
	Termiyonik Emisyon Metodu		
Zaman (Gün)	I₀ (A)	n	Φ_B (eV)
Hemen	6,27E-06	1,030	0,534
1	4,51E-06	1,029	0,543
7	1,67E-06	1,053	0,568
15	7,52E-07	1,082	0,589
30	3,98E-07	1,080	0,605
90	1,36E-07	1,101	0,633
180	1,33E-07	1,094	0,634
365	9,01E-08	1,107	0,644

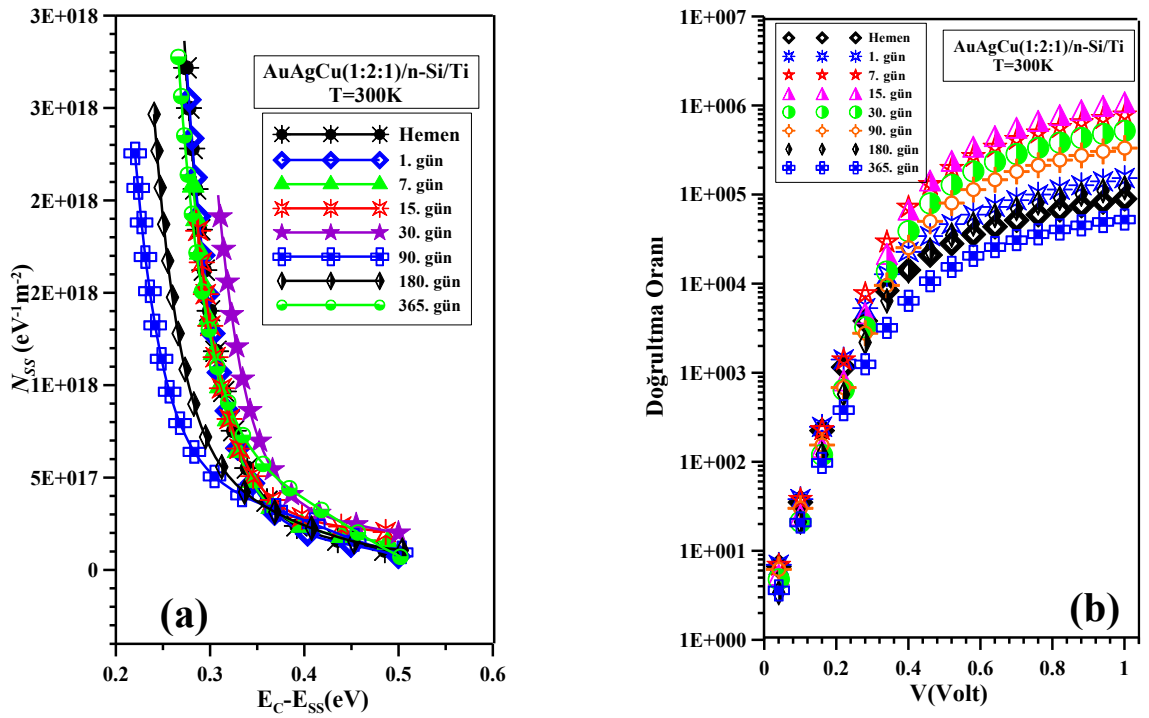
Çizelge 4.17 Zamana bağlı olarak AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun termiyonik emisyon metoduna göre hesaplanan diyot parametreleri

AuAgCu (1:1:1) /n-Si/Ti			
	Termiyonik Emisyon Metodu		
Zaman (Gün)	I₀ (A)	n	Φ_B (eV)
Hemen	3,04E-06	1,036	0,553
1	2,18E-06	1,032	0,561
7	1,87E-06	1,039	0,565
15	1,99E-06	1,021	0,564
30	1,78E-06	1,017	0,567
90	1,11E-06	1,011	0,579
180	9,13E-07	1,028	0,584
365	1,73E-07	1,072	0,627

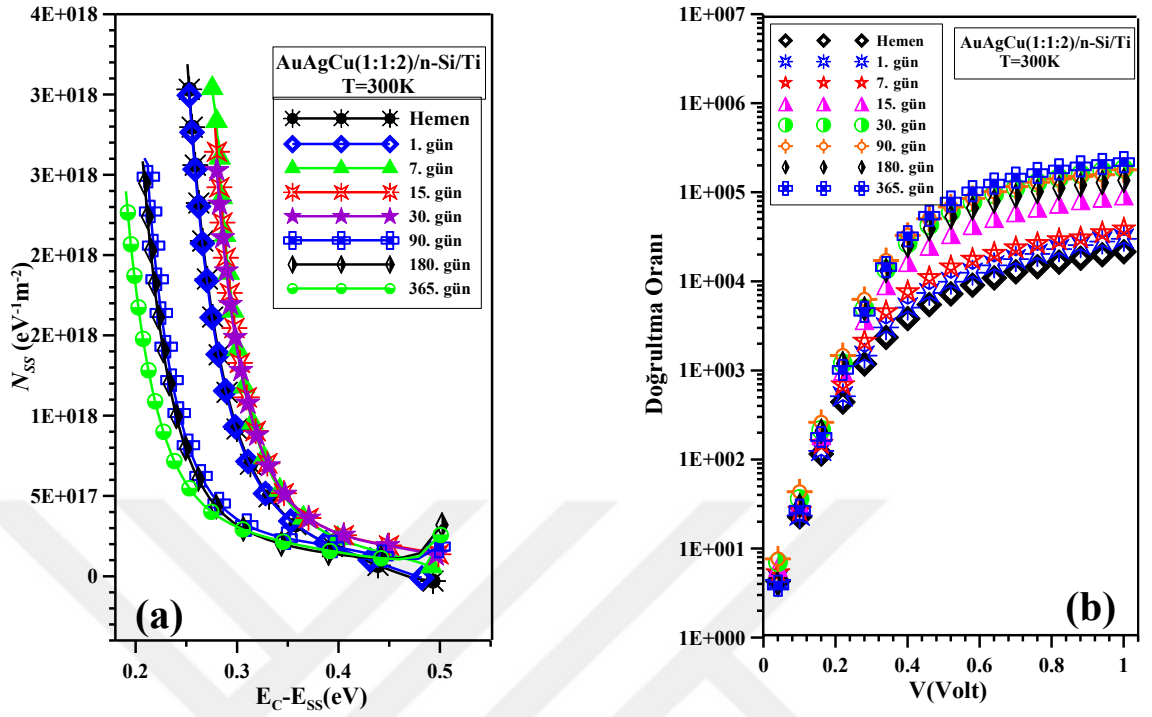
Metaller-yarıiletken kontakların arayüzeyleri aygıt fiziğinde oldukça önemlidir. Çünkü arayüzeyler aygıtların performansını ve kararlılığını değiştirebilirler. AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti ve AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotların arayüzey hal yoğunlukları ve doğrultma oranları zamana bağlı olarak hesaplanmıştır ve sonuçlar Şekil 4.24, 4.25, 4.26 ve 4.27’de grafiksel olarak sunulmuştur. Ayrıca diyotların 0,2 V, 0,4 V ve 0,6 V’luk doğru beslem voltajlarındaki akımlarının zamanla değişimleri de Şekil 4.28’de verilmiştir. Tüm diyotlarda arayüzey hal yoğunlukları bant ortasından iletkenlik bandının tabanına doğru eksponansiyel olarak artmaktadır. Yaşlanma zamanıyla diyotların arayüzey hal yoğunluklarının büyüklüğünde ve şeklinde önemli değişimler olmamıştır. Yine tüm diyotlar iyi bir doğrultma göstermiştir. Artan yaşlanma zamanıyla diyotların doğrultma oranları çok az değişime uğramıştır. Şekil 4.28’den de görüldüğü gibi, doğru beslem akımı 30. güne kadar azalma gösterirken, 30. günden sonra tam bir kararlı davranış sergilemiştir. Bu grup diyotlar içerisinde AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti diyodunun diğerlerine göre daha kararlı olduğu tespit edilmiştir.



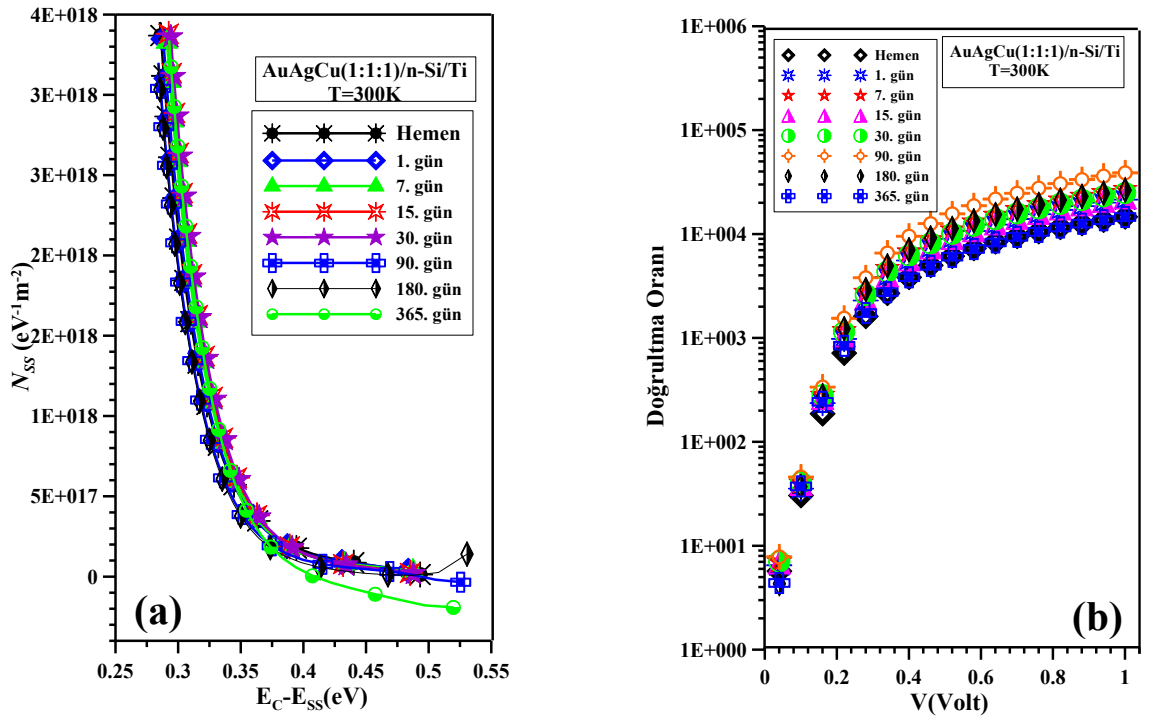
Şekil 4.24 AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) N_{ss} ve (b) doğrultma oranı değişimleri



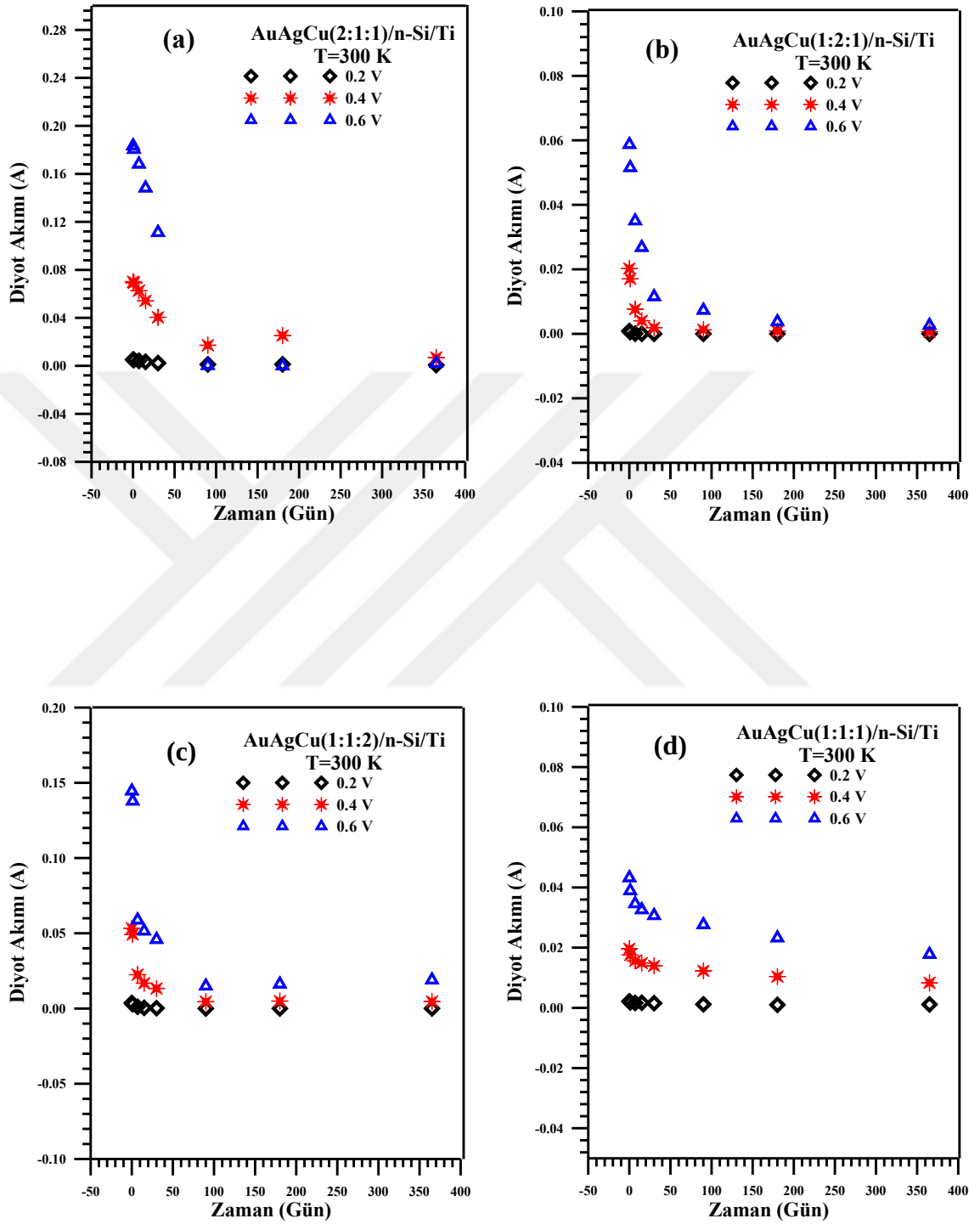
Şekil 4.25 AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) N_{ss} ve (b) doğrultma oranı değişimleri



Şekil 4.26 AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) N_{ss} ve (b) doğrultma oranı değişimleri

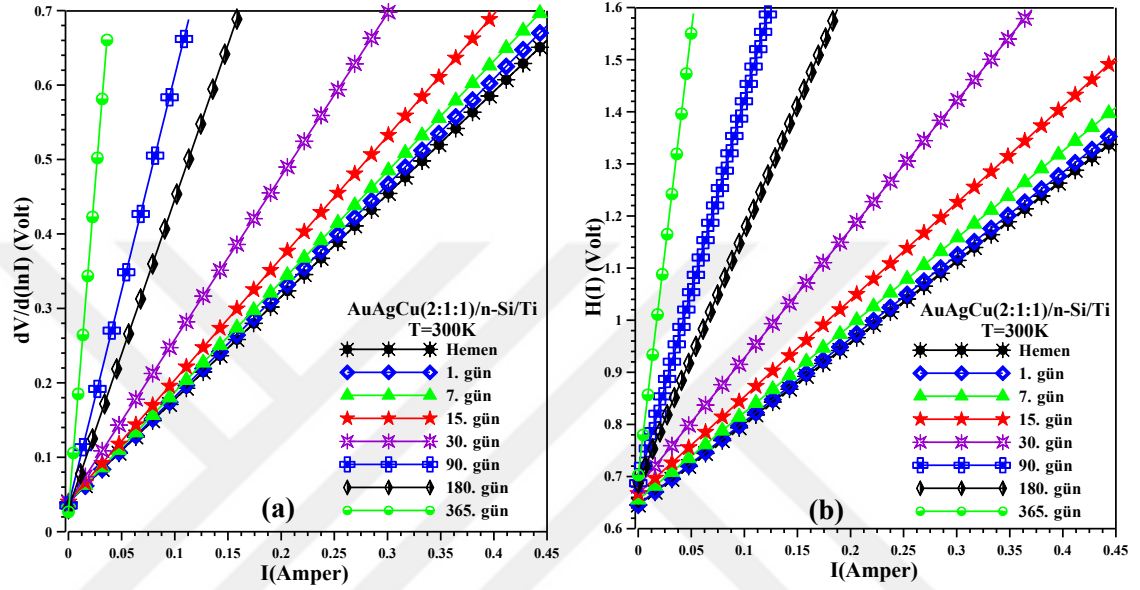


Şekil 4.27 AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) N_{ss} ve (b) doğrultma oranı değişimleri

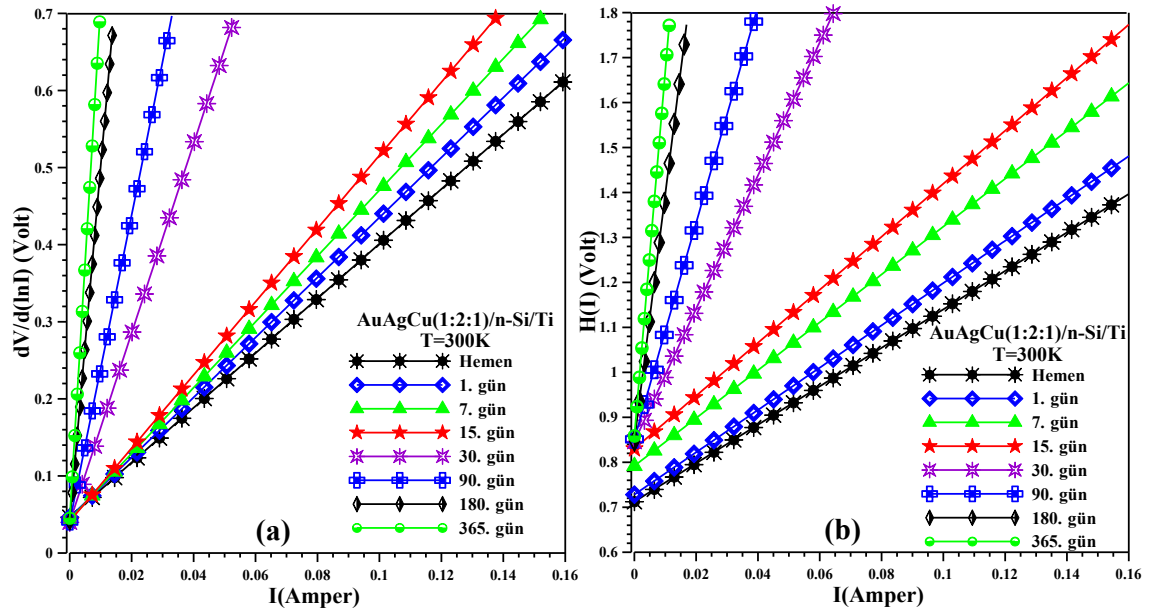


Şekil 4.28 (a) AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, (b) AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti, (c) AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti ve (d) AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti diyotlarının üç farklı doğru beslem voltajlarında diyot akımlarının zamana bağlı değişimleri

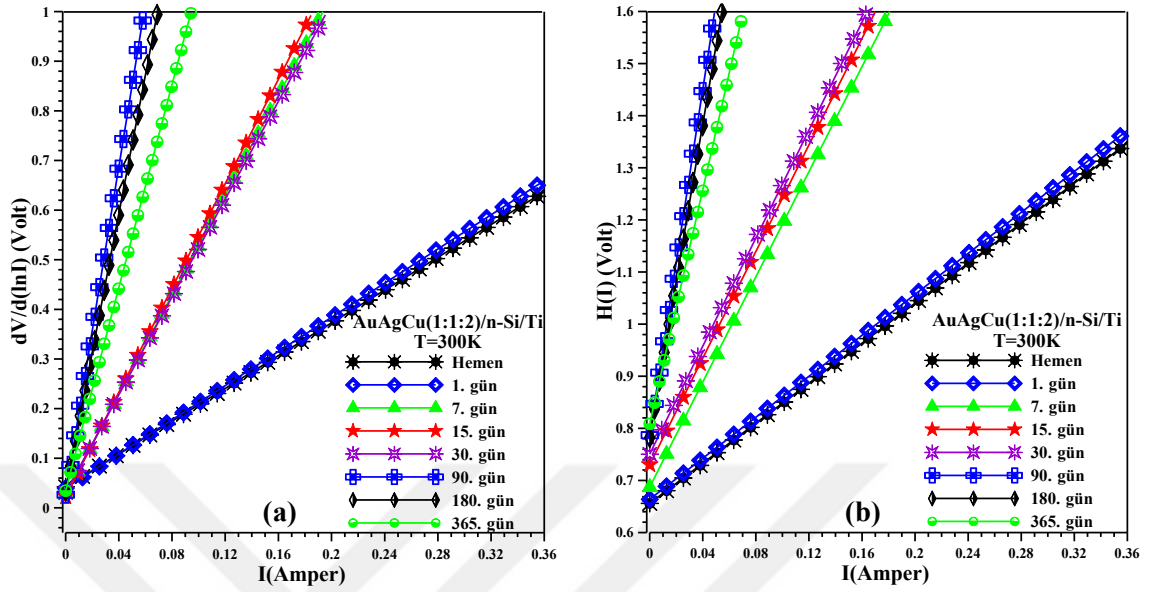
AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti ve AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının Cheung metodundan hesaplanan ve zamana bağlı olarak çizilen $dV/d(\ln I)$ -I ve $H(I)$ -I grafikleri Şekil 4.29, 4.30, 4.31 ve 4.32’te verilmiştir.



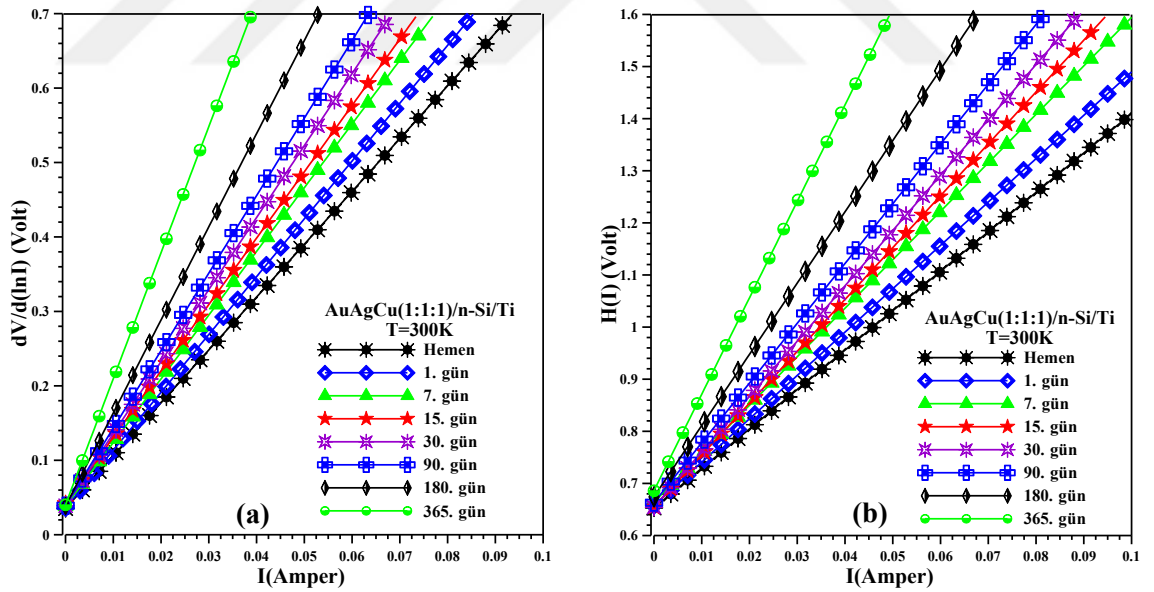
Şekil 4.29 AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) $dV/d(\ln I)$ -I ve (b) $H(I)$ -I grafikleri



Şekil 4.30 AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) $dV/d(\ln I)$ -I ve (b) $H(I)$ -I grafikleri



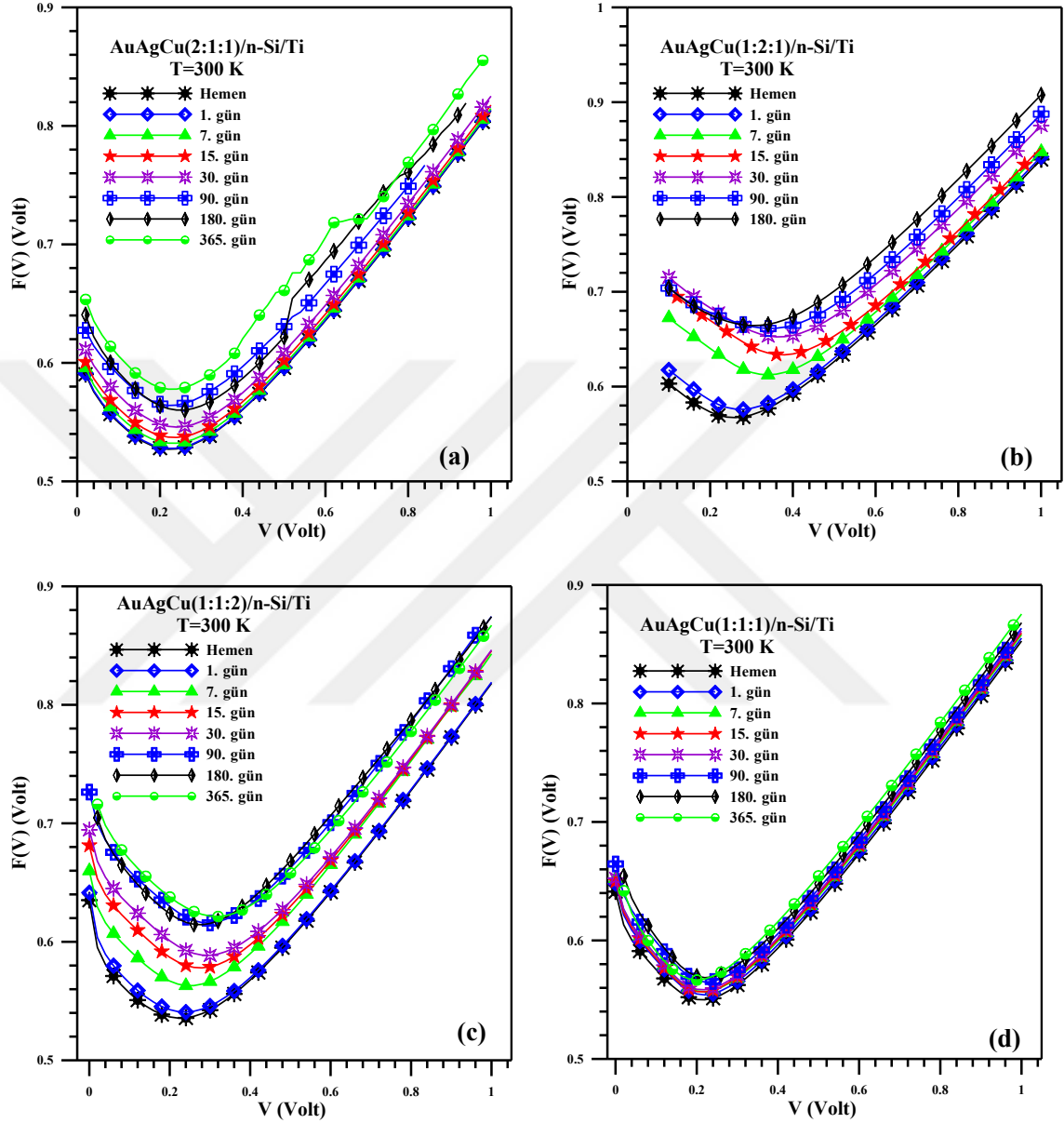
Şekil 4.31 AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) $dV/d(\ln I)$ -I ve (b) $H(I)$ -I grafikleri



Şekil 4.32 AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun farklı günlerdeki (a) $dV/d(\ln I)$ -I ve (b) $H(I)$ -I grafikleri

Aynı zamanda AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti ve AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının Norde metodundan diyot

parametrelerinin hesaplanabilmesi için zamanın bir fonksiyonu olarak çizilen $F(V)$ - V grafikleri de Şekil 4.33’de verilmiştir.



Şekil 4.33 (a) AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, (b) AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti, (c) AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti ve (d) AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının farklı günlerde ölçülen $F(V)$ - V değişimleri

Cheung ve Norde metotlarından diyot parametrelerinin hesaplanmasının detayları daha önceki kesimlerde verilmişti. Cheung ve Norde grafiklerinden de yararlanarak AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti ve AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının hesaplanan Schottky diyot parametreleri

Çizelge 4.18, 4.19, 4.20 ve 4.21’de verilmiştir. Ayrıca bu Schottky diyotların farklı metotlar kullanılarak hesaplanmış idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerlerinin zamana bağlı değişimleri de Şekil 4.34 ve 4.35’de verilmiştir.

Cheung ve Norde metotlarından hesaplanan diyot parametrelerinin termiyonik emisyon metodundan hesaplanan diyot parametrelerinden daha büyük olduğu bu Schottky diyotlarda da gözlenmiştir. Bunun sebebi arayüzel hallerinin ve seri direncin etkili olduğu bölgede Norde ve Cheung metotlarının kullanılmasıdır.

AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti ve AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti alaşımlarından üretilen diyotların üç farklı metotla hesaplanan idealite faktörlerinin ve engel yüksekliklerinin zamanla son derece kararlı oldukları Şekil 4.34 (a) ve (d)’de görülmektedir. AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti ve AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti alaşımlarından üretilen diyotlarda da bu parametreler 30. gün ölçümlerine kadar hafifçe değişmiş ve daha sonra kararlı hale gelmiştir. Aynı zamanda bu grupta değerlendirilen dört diyodun da seri dirençleri artan yaşlanma zamanıyla artmaktadır. Bu değişimler de arayüzeylerdeki yeni oluşumlara atfedilebilir.

Çizelge 4.18 Zamana bağlı olarak AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun Norde ve Cheung metodlarına göre hesaplanan diyot parametreleri

AuAgCu(2:1:1)/nSi/Ti						
	Norde Metodu		Cheung Metodu			
Zaman (Gün)	Φ_B (eV)	R_s (Ω)	R_s (Ω)	n	Φ_B (eV)	R_s (Ω)
Hemen	0,606	3,174	1,378	1,552	0,625	1,561
1	0,606	3,247	1,424	1,502	0,625	1,595
7	0,610	3,837	1,483	1,523	0,630	1,673
15	0,613	4,614	1,638	1,550	0,635	1,858
30	0,621	6,468	2,189	1,524	0,642	2,466
90	0,647	8,737	5,774	1,362	0,644	7,366
180	0,635	11,499	4,155	1,197	0,643	4,844
365	0,649	21,296	17,524	1,032	0,649	17,035

Çizelge 4.19 Zamana bağlı olarak AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun Norde ve Cheung metodlarına göre hesaplanan diyot parametreleri

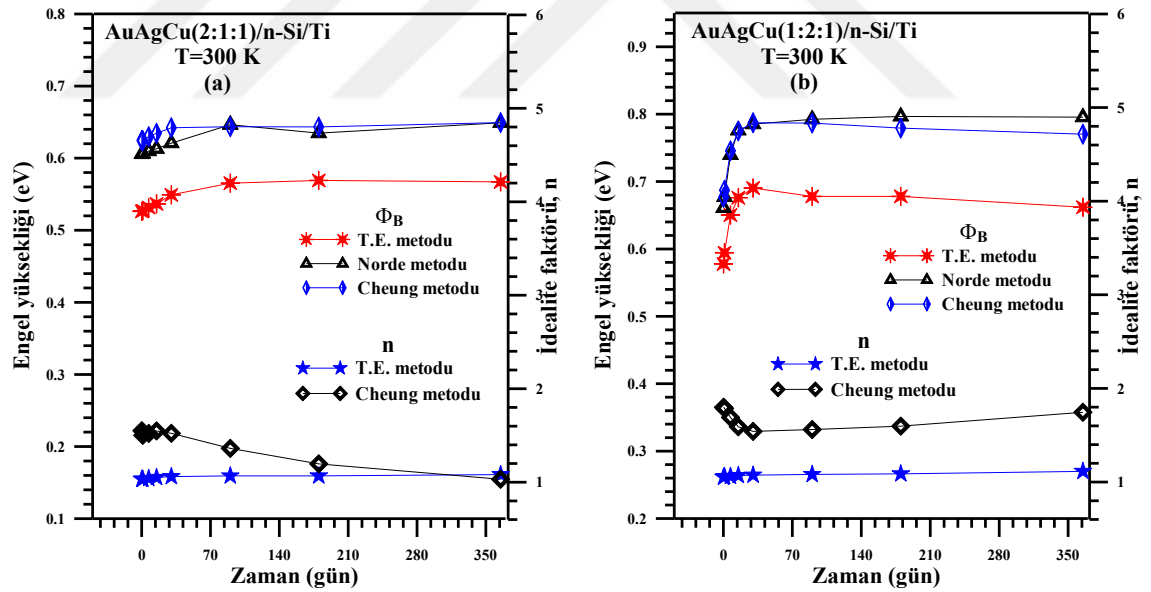
AuAgCu(1:2:1)/nSi/Ti						
	Norde Metodu		Cheung Metodu			
Zaman (Gün)	Φ_B (eV)	R_s (Ω)	R_s (Ω)	n	Φ_B (eV)	R_s (Ω)
Hemen	0,661	6,767	3,546	1,799	0,677	4,277
1	0,677	6,406	3,890	1,787	0,687	4,704
7	0,740	8,135	4,269	1,691	0,746	5,323
15	0,776	8,431	4,747	1,590	0,775	5,896
30	0,785	25,614	12,282	1,542	0,787	14,799
90	0,792	36,221	19,911	1,561	0,787	24,073
180	0,797	45,452	46,104	1,597	0,779	54,780
365	0,796	54,675	66,741	1,746	0,770	81,129

Çizelge 4.20 Zamana bağlı olarak AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti Schottky diyodunun Norde ve Cheung metodlarına göre hesaplanan diyot parametreleri

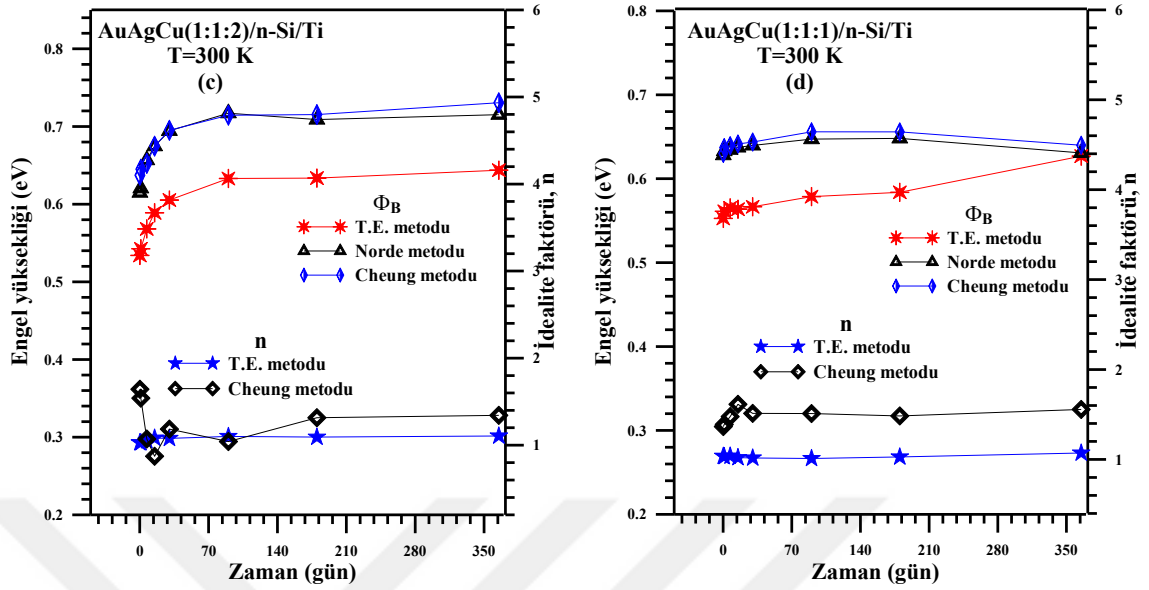
AuAgCu (1:1:2)/nSi/Ti						
	Norde Metodu		Cheung Metodu			
Zaman (Gün)	Φ_B (eV)	R_s (Ω)	R_s (Ω)	n	Φ_B (eV)	R_s (Ω)
Hemen	0,615	4,414	1,651	1,644	0,637	1,920
1	0,621	5,470	1,721	1,541	0,645	1,966
7	0,657	5,749	5,021	1,072	0,653	5,043
15	0,675	6,751	4,907	1,168	0,675	5,112
30	0,695	6,913	4,927	1,186	0,695	5,181
90	0,717	19,456	16,500	1,042	0,715	16,590
180	0,709	27,298	13,968	1,317	0,715	15,035
365	0,715	37,513	10,225	1,344	0,731	11,236

Çizelge 4.21 Zamana bağlı olarak AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun Norde ve Cheung metodlarına göre hesaplanan diyot parametreleri

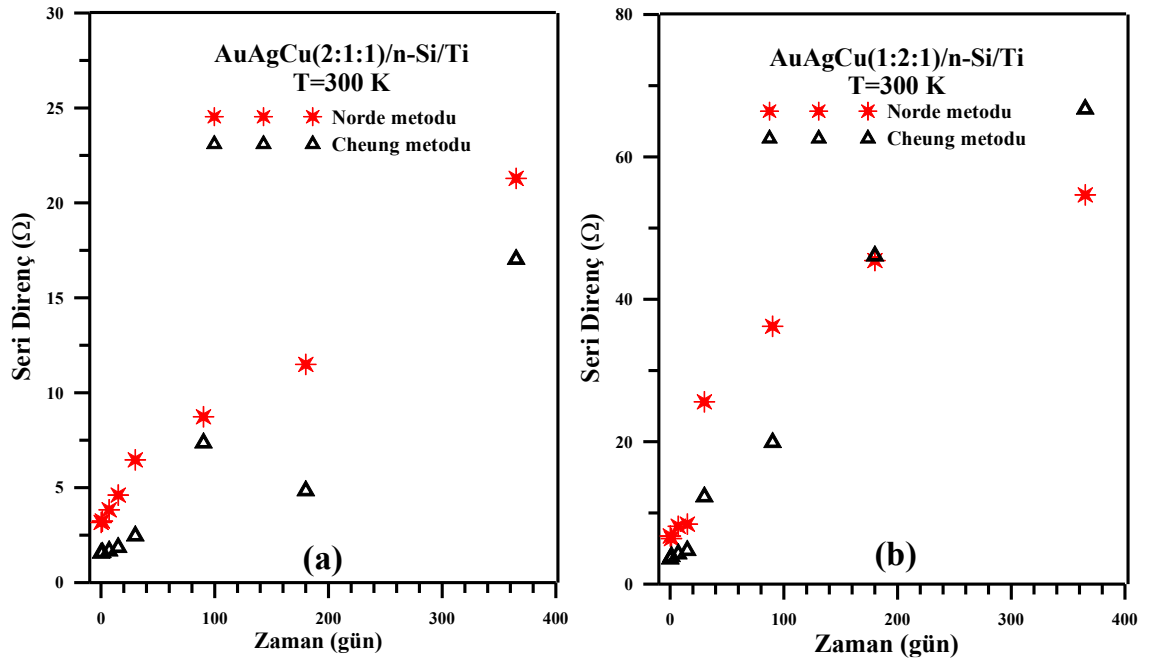
AuAgCu (1:1:1)/nSi/Ti						
	Norde Metodu		Cheung Metodu			
Zaman (Gün)	Φ_B (eV)	R_s (Ω)	R_s (Ω)	n	Φ_B (eV)	R_s (Ω)
Hemen	0,628	7,599	7,096	1,366	0,630	7,565
1	0,633	9,002	7,768	1,389	0,637	8,321
7	0,635	9,892	8,559	1,477	0,639	9,302
15	0,637	10,009	8,916	1,614	0,641	9,954
30	0,640	10,793	9,673	1,513	0,644	10,616
90	0,647	13,982	10,410	1,511	0,656	11,468
180	0,648	15,795	12,509	1,484	0,656	13,668
365	0,631	20,558	16,932	1,556	0,640	18,506



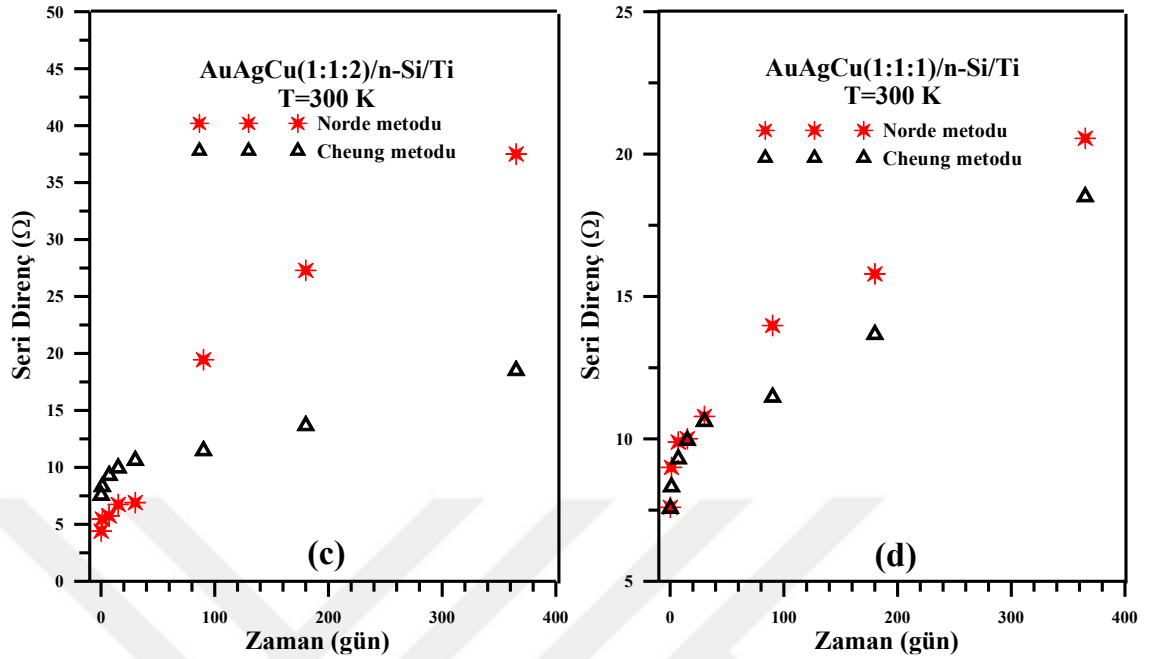
Şekil 4.34. (devam)



Şekil 4.34 (a) AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, (b) AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti, (c) AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti ve (d) AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının farklı metotlarla hesaplanan idealite faktörleri ve engel yüksekliklerinin zamana bağlı değişimleri



Şekil 4.35 (devam)



Şekil 4.35 (a) $\text{AuAgCu}(2:1:1)/\text{n-Si/Ti}$, (b) $\text{AuAgCu}(1:2:1)/\text{n-Si/Ti}$, (c) $\text{AuAgCu}(1:1:2)/\text{n-Si/Ti}$ ve (d) $\text{AuAgCu}(1:1:1)/\text{n-Si/Ti}$ Schottky diyotlarının Cheung ve Norde metotlarından hesaplanan seri direnç değerlerinin zamana bağlı değişimleri

Sonuç olarak, Ti metali ile omik kontak yapılan n-Si yarıiletkeni üzerine Au, Ag ve Cu metalleri buharlaştırılarak birinci grup diyotlar, $\text{AuAg}(1:1)$, $\text{AuCu}(1:1)$ ve $\text{AgCu}(1:1)$ alaşımları buharlaştırılarak ikinci grup diyotlar ve $\text{AuAgCu}(2:1:1)$, $\text{AuAgCu}(1:2:1)$, $\text{AuAgCu}(1:1:2)$ ve $\text{AuAgCu}(1:1:1)$ alaşımları buharlaştırılarak da üçüncü grup diyotlar üretilmiştir. Toplam on diyottan oluşan bu üç grup numunenin I-V karakteristikleri oda sıcaklığında, karanlıkta ve zamana bağlı olarak alınmış, termiyonik emisyon, Cheung ve Norde metodlarıyla karakteristik parametreleri hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Üçüncü gruptaki diyotların diğer diyotlara göre daha kararlı arayüzeylere sahip olduğu tespit edilmiştir. Özellikle $\text{AuAgCu}(1:1:1)$ alaşımı ile üretilen diyot en kararlı karakteristiklere sahiptir.

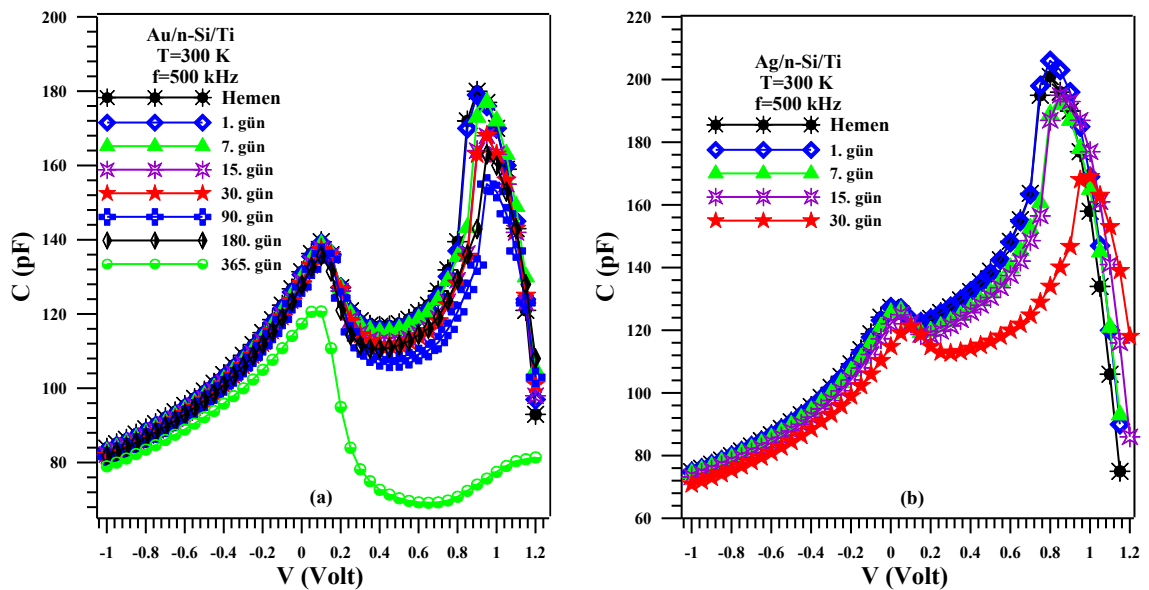
4.4 Alaşım/Yarıiletken Schottky Diyotların Oda Sıcaklığında ve Zamana Bağlı Olarak Alınan C-V Karakteristiklerinin İncelenmesi

Diyotların I-V karakteristiklerinden elde edilen bazı temel diyot parametreleri, diyotların elektriksel özelliklerini incelemeye tek başına yeterli olmayabilir. Bu nedenle elde ettiğimiz Au/n-Si/Ti, Ag/n-Si/Ti, Cu/n-Si/Ti, AuAg/n-Si/Ti, AuCu/n-Si/Ti, AgCu/n-Si/Ti, AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti ve AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotların zamana bağlı olarak oda sıcaklığında C-V ölçümleri 50, 100, 200, 300, 500 ve 1000 kHz frekans değerlerinde ve -2 V ile +2 V aralığında HP 4192A LF Impedance Analyzer cihazı ile belirlenen günlerde aynı şartlar altında alınmıştır.

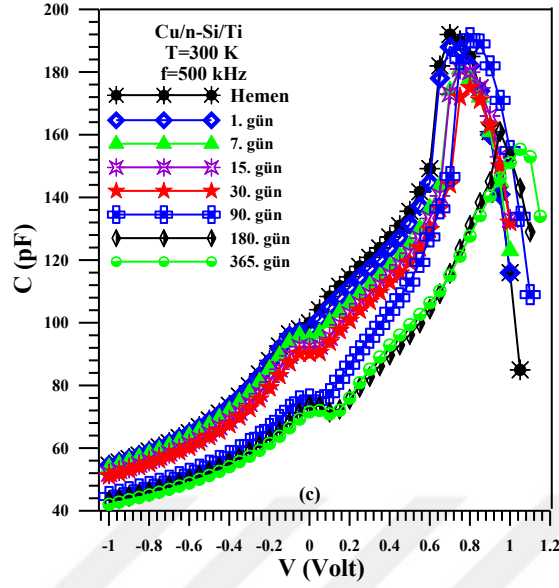
4.4.1 Au/n-Si/Ti, Ag/n-Si/Ti ve Cu/n-Si/Ti Schottky diyotların oda sıcaklığında ve zamana bağlı olarak alınan C-V karakteristiklerinin incelenmesi

Au/n-Si/Ti, Ag/n-Si/Ti ve Cu/n-Si/Ti Schottky diyotlarının oda sıcaklığında 500 kHz frekansta farklı günlerdeki kapasite-voltaj karakteristikleri Şekil 4.36’da verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi, artan ters beslem voltajıyla kapasite değerleri azalmaktadır ve doğru beslem durumunda kapasite pik değerlerine ulaşmaktadır. Artan yaşlanma zamanı ile kapasite aynı tarzda değişim göstermektedir. C-V karakteristiklerinin doğru beslem bölgesindeki piklerin sebebi arayüzey tuzakları ve seri dirençtir. Aynı zamanda doğru beslemlerde artık kapasite (excess capacitance) söz konusudur. Schottky diyotlarında artık kapasite, arayüzey tuzaklarından ziyade azınlık taşıyıcı enjeksiyonuna atfedilebilir. Doğru beslem şartları altında azınlık taşıyıcı enjeksiyonu Schottky metalinden yarıiletken altlığın içerisine doğru gerçekleşir. Düşük doğru beslem voltaj değerlerinde akım öncelikle termiyonik emisyon ile sınırlıdır ve uygulanan voltajın çoğu deplasyon bölgesi üzerinde düşer. Bu durumda, elektron ve boşluk Fermi seviyesi yarılmaya ihmal edilir. Doğru beslem voltajının artmasıyla, Fermi seviyesinin yarılması (splitting) artar ve daha yüksek azınlık taşıyıcı enjeksiyonu ile sonuçlanır. Sonuç olarak, voltaj düşmesinin çoğu, elektron ve boşluk kuazi Fermi seviyeleri arasındaki fark olarak görülür ve gövde (bulk) gerilim düşmesine karşılık gelir.

Çoğunluk taşıyıcı akımının esas olarak diyot üzerindeki voltaj düşmesiyle (V) yönetildiği ve artan azınlık taşıyıcı enjeksiyonu ile V'de çok az değişiklik olduğu için, çoğunluk taşıyıcı akım katkısı artan doğru besleme artmaz. Artık azınlık taşıyıcılar enjekte edildiğinden, akım esas olarak yarıiletken gövde boyunca boşlukların enjeksiyonu ve taşınması ile sınırlıdır. Werner *et al.* ideal şartlar altında, bir yüksek ve düşük katkı konsatrasyonuna sahip (hi-lo) eklemenin (n^+/n) omik kontaklarının azınlık taşıyıcılar için iyi bir yansıtma sınırı olarak davrandığını ve Schottky kontakta azınlık taşıyıcı enjeksiyonunu engellediğini öne sürmüşlerdir (Werner *et al.* 1988). Zayıf omik kontak durumunda, enjekte edilen azınlık taşıyıcılar, hi-lo eklemesinde etkili bir şekilde yansıtılmaz ve omik kontakta rekombine olabilirler. Ti (Titanyum) iyi bir homojen kontak oluşturmasına rağmen, Schottky diyotlarımızdaki kusurlu bir omik kontak, Schottky kontakta azınlık taşıyıcı enjeksiyonunu mümkün kılmış olabilir. Azınlık taşıyıcı enjeksiyonu, sadece uzay yüküne bağlı sınırlama açısından değil, aynı zamanda azınlık taşıyıcı depolaması daha yavaş ters geri kazanım nedeniyle de, devre elemanının çalışması için zararlı olacaktır. I-V karakteristikleri bozulmaya başladığı için Ag/n-Si/Ti Schottky diyodununun sadece 30 güne kadar kapasite-voltaj karakteristikleri incelenebilmiştir. Ayrıca grafik sayısı çok fazla olduğu için, sadece $f=500$ kHz'de ölçülen C-V karakteristikleri verilmiştir.



Şekil 4.36. (devam)



Şekil 4.36 (a) Au/n-Si/Ti, **(b)** Ag/n-Si/Ti ve **(c)** Cu/n-Si/Ti Schottky diyodlarının farklı günlerde oda sıcaklığında ve $f=500$ kHz frekansta alınan kapasite-voltaj karakteristikleri

Kapasite-voltaj (C-V) ölçümleri Schottky engel yüksekliğini ve doping konsantrasyonunu hesaplamak için kullanılabilir. Yarıiletken malzemeler durumunda, özellikle yarıiletken materyaller üzerine metallerin biriktirilmesiyle oluşturulan Schottky engel diyotlar durumunda, bir ters beslemin uygulanması yarıiletkendeki tükenme bölgesini artırır. Beslem elektronlar üzerine bir kuvvet uygular ve elektronlar eklemenden uzaklaşmaya başlarlar. Bu süreç bölgedeki elektrik alanı tarafından dengeleninceye kadar devam eder. Denge kurulur ve tükenme bölgesi sabit kalır. Paralel plakalı kondansatör ile doğrudan bir benzerlik elde edilir. Bu durumda tüketim bölgesinde hiçbir serbest taşıyıcı yoktur ve bu da metal plakalar arasındaki boşluğu oluşturur. Schottky kontak alanı metal plaka alanı haline gelir. Böylece $C=\epsilon A/W$ denklemi, W tükenme bölgesinin genişliği, A kontak alanı ve ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti olmak üzere uygulanabilir.

Kesim 2.12’de de anlatıldığı gibi kapasite aynı zamanda $C = \epsilon_s \frac{\partial E}{\partial V_r}$ denklemiyle hesaplanabilir. Yarıiletkene Gauss teoremi uygulanarak, elektrik alan belirlenebilir ve elektrik alandan yararlanarak da kapasite,

$$C = \sqrt{\frac{q\epsilon_s\epsilon_0 N_d A^2}{2(V_d+V)}} \quad (4.16)$$

şeklinde elde edilebilir (Neamen 1992). Bu denklemdeki parametreler daha önceki kesimlerde tanımlanmıştır. Denklem (4.16) düzenlendiğinde,

$$C^{-2} = \frac{2(V_d+V)}{\epsilon_s\epsilon_0 q A^2 N_d} \quad (4.17)$$

bağıntısı elde edilir. Denklem 4.17'nin V'ye göre türevinden,

$$\frac{d(C^{-2})}{dV} = \frac{2}{\epsilon_s\epsilon_0 q A^2 N_d} \quad (4.18)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntıdan da N_d çekilirse,

$$N_d = \frac{2}{\epsilon_s\epsilon_0 q A^2 \frac{d(C^{-2})}{dV}} \quad (4.19)$$

elde edilir. (4.17) denkleminde göre C^{-2} -V grafikleri lineer olmalıdır. Bu grafiklerin eğimlerinden N_d 'ler ve voltaj eksenini kestiği noktalardan da V_d 'ler hesaplanabilir. Schottky diyotların C^{-2} -V grafiklerine lineer fitler yapılarak difüzyon potansiyelleri ve taşıyıcı konsantrasyonları hesaplanmıştır. Au/n-Si/Ti, Ag/n-Si/Ti ve Cu/n-Si/Ti Schottky diyotların 500 kHz frekansta farklı günlerdeki C^{-2} -V değişimleri Şekil 4.37' de verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi uygulama gerilimi, ters beslem bölgesi için azaldıkça, C^{-2} azalmaktadır.

Termal dengede n-tipi bir yarıiletkenindeki elektron konsantrasyonu,

$$n_0 = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_C}{kT}\right) \quad (4.20)$$

ile verilmektedir (Sağlam *et al.* 2008). Burada, N_c , termal dengede iletkenlik bandındaki hal yoğunluğu olup, Si için $N_c = 2,8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ’tür. n-tipi bir yarıiletken için $N_d \gg n_i$ olacağı için $n_0 = N_d$ olur (Neamen 1992). Burada n_i , asal (intrinsic) elektron konsantrasyonudur. Bu durum dikkate alındığında, (4.20) ifadesi,

$$N_d = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_C}{kT}\right) \quad (4.21)$$

olarak elde edilir. Denklem 4.21’in tabii logaritması alınır ve iletkenlik bandı referans seviyesi olarak ($E_C = 0$) kabul edilirse,

$$E_F = kT \ln\left(\frac{N_c}{N_d}\right) \quad (4.22)$$

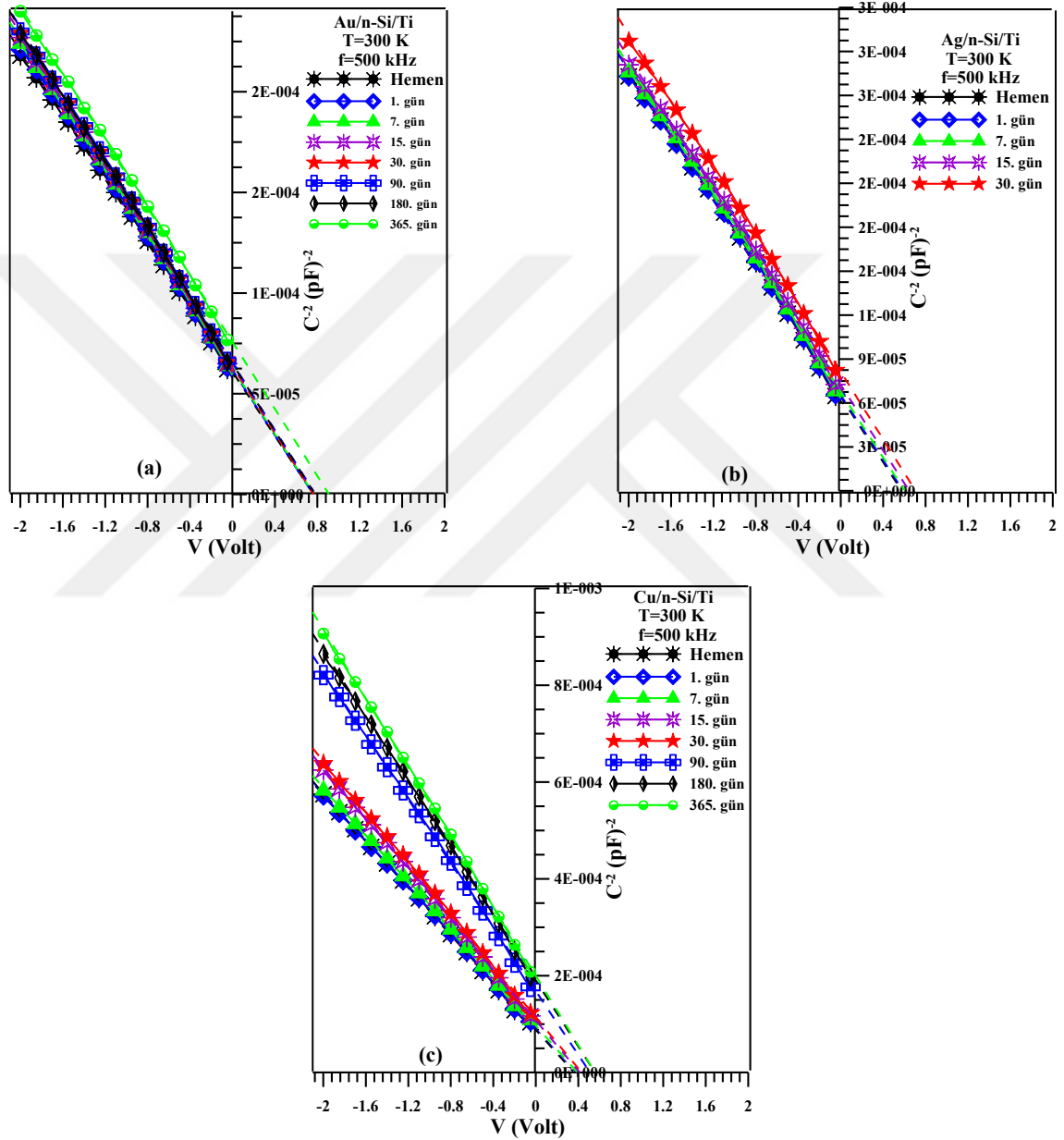
şeklinde Fermi enerji seviyesi elde edilmiş olur. Ayrıca Schottky diyodun engel yüksekliği,

$$\Phi_B = E_F + V_d \quad (4.23)$$

ile verilmektedir (Neamen, 1992). Şekil 4.37’deki grafiklerden ve (4.22), (4.23) denklemlerinden yararlanarak diyotların Fermi enerjisi ve engel yüksekliği değerleri hesaplanmıştır. Au/n-Si/Ti, Ag/n-Si/Ti ve Cu/n-Si/Ti Schottky diyotlarının frekansa ve yaşlanma zamanına bağlı olarak hesaplanan bu değerleri sırasıyla Çizelge 4.22, 4.23 ve 4.24’de verilmiştir.

Çizelge 4.22’den de görüldüğü gibi, Au/n-Si/Ti diyodunun C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplanan V_d , E_F ve Φ_B değerleri hem uygulama frekansı ile hem de yaşlanma zamanı ile hafifçe artmıştır. Ag/n-Si/Ti ve Cu/n-Si/Ti diyotlarının benzer değişimler gösterdiği

Çizelge 4.23 ve 4.24'den görülebilir. Her üç diyodunda ters beslem C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplanan doping profilleri hemen hemen frekansa ve yaşlanma zamanına bağlı değildir.



Şekil 4.37 (a) Au/n-Si/Ti, (b) Ag/n-Si/Ti ve (c) Cu/n-Si/Ti Schottky diyotlarının farklı günlerde oda sıcaklığında ve $f=500$ kHz frekanstaki C^{-2} -V değişimleri.

Çizelge 4.22 Zamana bağlı olarak farklı frekanslarda Au/n-Si/Ti Schottky diyodunun ters beslem C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplanan parametreleri

Au/n-Si/ Ti					
	f (kHz)	V_d (eV)	N_d (cm⁻³)	E_F (eV)	Φ_B (eV)
Hemen	50	0,545	3,708E+15	2,311E-01	0,776
	100	0,533	3,221E+15	2,347E-01	0,768
	200	0,687	2,716E+15	2,391E-01	0,927
	300	0,719	2,555E+15	2,407E-01	0,959
	500	0,764	2,437E+15	2,419E-01	1,006
	1000	0,894	2,392E+15	2,424E-01	1,137
1. Gün	50	0,557	3,091E+15	2,358E-01	0,793
	100	0,543	2,949E+15	2,370E-01	0,780
	200	0,678	2,613E+15	2,401E-01	0,918
	300	0,716	2,494E+15	2,413E-01	0,957
	500	0,762	2,396E+15	2,424E-01	1,005
	1000	0,890	2,360E+15	2,427E-01	1,133
7. Gün	50	0,555	3,022E+15	2,363E-01	0,792
	100	0,548	2,899E+15	2,374E-01	0,786
	200	0,678	2,575E+15	2,405E-01	0,919
	300	0,719	2,468E+15	2,416E-01	0,960
	500	0,766	2,374E+15	2,426E-01	1,009
	1000	0,898	2,355E+15	2,428E-01	1,141
15. Gün	50	0,554	3,306E+15	2,340E-01	0,788
	100	0,547	2,979E+15	2,367E-01	0,784
	200	0,686	2,581E+15	2,404E-01	0,926
	300	0,722	2,450E+15	2,418E-01	0,964
	500	0,769	2,348E+15	2,429E-01	1,012
	1000	0,904	2,326E+15	2,431E-01	1,147
30. Gün	50	0,567	2,912E+15	2,373E-01	0,804
	100	0,555	2,823E+15	2,381E-01	0,793
	200	0,682	2,520E+15	2,410E-01	0,923
	300	0,717	2,409E+15	2,422E-01	0,959
	500	0,766	2,320E+15	2,432E-01	1,009
	1000	0,904	2,301E+15	2,434E-01	1,147
90. Gün	50	0,569	2,908E+15	2,373E-01	0,807
	100	0,558	2,814E+15	2,382E-01	0,796
	200	0,690	2,528E+15	2,410E-01	0,931
	300	0,731	2,422E+15	2,421E-01	0,973
	500	0,783	2,329E+15	2,431E-01	1,026
	1000	0,938	2,327E+15	2,431E-01	1,181
180. Gün	50	0,554	2,962E+15	2,369E-01	0,791
	100	0,548	2,869E+15	2,377E-01	0,785
	200	0,689	2,536E+15	2,409E-01	0,930
	300	0,729	2,421E+15	2,421E-01	0,971
	500	0,778	2,331E+15	2,431E-01	1,021
	1000	0,934	2,320E+15	2,432E-01	1,177
365. Gün	50	0,559	2,940E+15	2,371E-01	0,796
	100	0,561	2,857E+15	2,378E-01	0,799
	200	0,731	2,524E+15	2,410E-01	0,972
	300	0,794	2,415E+15	2,421E-01	1,036
	500	0,910	2,336E+15	2,430E-01	1,153
	1000	1,500	1,640E+15	2,522E-01	1,752

Çizelge 4.23 Zamana bağlı olarak farklı frekanslarda Ag/n-Si/Ti Schottky diyodunun ters beslem C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplanan parametreleri

Ag/n-Si/Ti					
	f (kHz)	V_d (eV)	N_d (cm ⁻³)	E_F (eV)	Φ_B (eV)
Hemen	50	0,370	2,054E+15	2,463E-01	0,616
	100	0,397	2,074E+15	2,461E-01	0,643
	200	0,515	1,882E+15	2,486E-01	0,764
	300	0,554	1,835E+15	2,492E-01	0,804
	500	0,593	1,791E+15	2,499E-01	0,842
	1000	0,669	1,736E+15	2,507E-01	0,919
1. Gün	50	0,391	2,013E+15	2,469E-01	0,638
	100	0,396	2,018E+15	2,468E-01	0,642
	200	0,518	1,854E+15	2,490E-01	0,767
	300	0,549	1,794E+15	2,498E-01	0,799
	500	0,589	1,751E+15	2,505E-01	0,839
	1000	0,677	1,753E+15	2,504E-01	0,928
7. Gün	50	0,433	1,957E+15	2,476E-01	0,681
	100	0,431	1,991E+15	2,471E-01	0,678
	200	0,538	1,833E+15	2,493E-01	0,787
	300	0,569	1,781E+15	2,500E-01	0,819
	500	0,604	1,740E+15	2,506E-01	0,855
	1000	0,692	1,736E+15	2,507E-01	0,943
15. Gün	50	0,483	1,957E+15	2,476E-01	0,731
	100	0,474	1,980E+15	2,473E-01	0,722
	200	0,578	1,828E+15	2,494E-01	0,828
	300	0,610	1,778E+15	2,501E-01	0,860
	500	0,646	1,738E+15	2,507E-01	0,897
	1000	0,736	1,737E+15	2,507E-01	0,987
30. Gün	50	0,535	1,886E+15	2,485E-01	0,783
	100	0,525	1,898E+15	2,484E-01	0,774
	200	0,627	1,775E+15	2,501E-01	0,877
	300	0,664	1,728E+15	2,508E-01	0,915
	500	0,705	1,686E+15	2,514E-01	0,957
	1000	0,808	1,683E+15	2,515E-01	1,060
90. Gün	50				
	100				
	200				
	300				
	500				
	1000				
180. Gün	50				
	100				
	200				
	300				
	500				
	1000				
365. Gün	50				
	100				
	200				
	300				
	500				
	1000				

ÖLÇÜM ALINAMADI

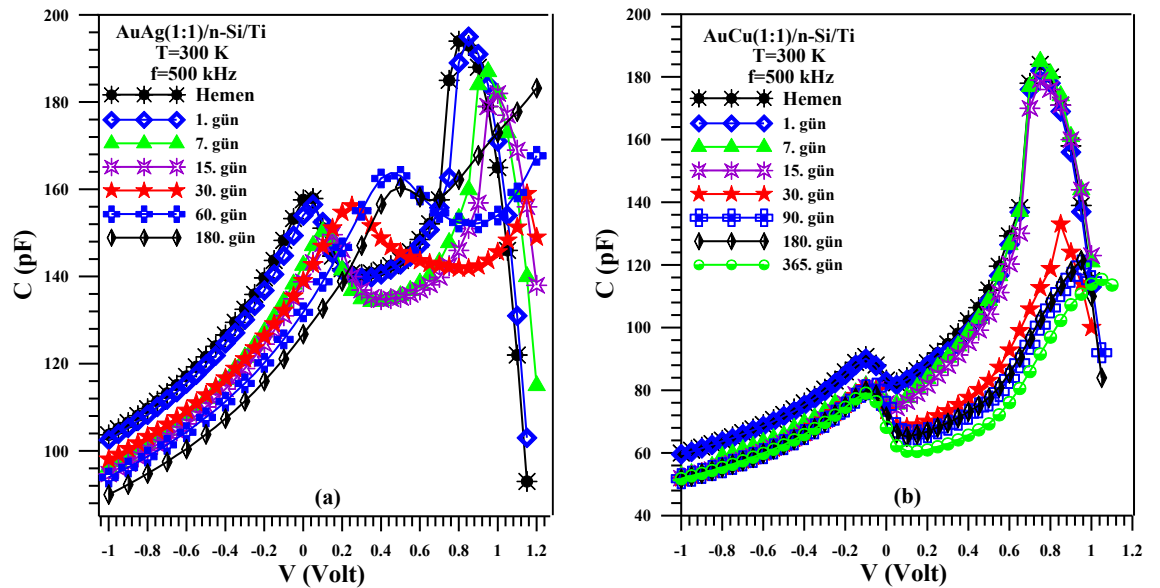
Çizelge 4.24 Zamana bağlı olarak farklı frekanslarda Cu/n-Si/Ti Schottky diyodunun ters beslem C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplanan parametreleri

Cu/n-Si/Ti					
	f (kHz)	V _d (eV)	N _a (cm ⁻³)	E _F (eV)	Φ _B (eV)
Hemen	50	0,239	8,383E+14	2,695E-01	0,509
	100	0,256	8,542E+14	2,690E-01	0,525
	200	0,327	8,247E+14	2,699E-01	0,597
	300	0,338	8,065E+14	2,705E-01	0,609
	500	0,361	7,950E+14	2,709E-01	0,632
	1000	0,395	7,946E+14	2,709E-01	0,666
1. Gün	50	0,248	8,400E+14	2,695E-01	0,518
	100	0,319	8,867E+14	2,681E-01	0,587
	200	0,345	8,337E+14	2,697E-01	0,615
	300	0,356	8,139E+14	2,703E-01	0,626
	500	0,378	8,030E+14	2,706E-01	0,649
	1000	0,428	8,113E+14	2,704E-01	0,698
7. Gün	50	0,259	8,275E+14	2,699E-01	0,529
	100	0,297	8,511E+14	2,691E-01	0,566
	200	0,358	8,200E+14	2,701E-01	0,628
	300	0,372	8,029E+14	2,706E-01	0,643
	500	0,394	7,902E+14	2,711E-01	0,665
	1000	0,438	7,973E+14	2,708E-01	0,708
15. Gün	50	0,277	7,812E+14	2,713E-01	0,549
	100	0,311	8,044E+14	2,706E-01	0,582
	200	0,376	7,747E+14	2,716E-01	0,647
	300	0,393	7,588E+14	2,721E-01	0,665
	500	0,414	7,456E+14	2,726E-01	0,686
	1000	0,454	7,454E+14	2,726E-01	0,727
30. Gün	50	0,299	7,863E+14	2,712E-01	0,570
	100	0,319	8,153E+14	2,702E-01	0,589
	200	0,392	7,639E+14	2,719E-01	0,664
	300	0,411	7,483E+14	2,725E-01	0,683
	500	0,432	7,343E+14	2,730E-01	0,705
	1000	0,472	7,414E+14	2,727E-01	0,744
90. Gün	50	0,419	6,605E+14	2,757E-01	0,695
	100	0,427	6,570E+14	2,758E-01	0,702
	200	0,483	6,226E+14	2,772E-01	0,760
	300	0,496	6,052E+14	2,780E-01	0,774
	500	0,511	5,891E+14	2,787E-01	0,790
	1000	0,542	5,856E+14	2,788E-01	0,821
180. Gün	50	0,455	6,324E+14	2,768E-01	0,732
	100	0,451	6,227E+14	2,772E-01	0,728
	200	0,512	5,954E+14	2,784E-01	0,791
	300	0,536	5,831E+14	2,789E-01	0,815
	500	0,558	5,699E+14	2,795E-01	0,838
	1000	0,595	5,666E+14	2,797E-01	0,875
365. Gün	50	0,459	6,061E+14	2,779E-01	0,737
	100	0,456	5,966E+14	2,783E-01	0,734
	200	0,516	5,681E+14	2,796E-01	0,796
	300	0,537	5,545E+14	2,802E-01	0,817
	500	0,558	5,429E+14	2,808E-01	0,839
	1000	0,594	5,380E+14	2,810E-01	0,875

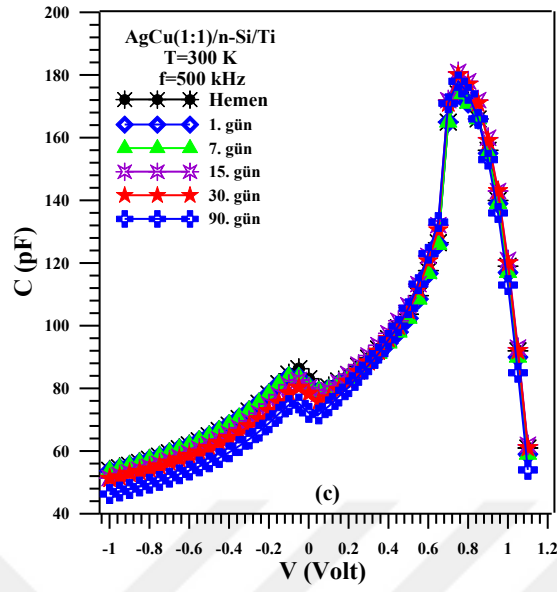
Çizelgelerde hesaplanan değerler incelendiğinde, genellikle C-V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği değerleri I-V ölçümlerinden elde edilenlerden daha büyüktür. Bu durumun birkaç sebebi olabilir. Bu sebeplerden biri imaj-kuvvet engel düşmesidir. I-V metodu kullanılarak düz bant engel yüksekliği elde edilirken, C-V metodu kullanılarak sıfır beslem engel yüksekliği elde edilir. Metalden yarıiletkenin yasak enerji aralığı içerisine elektronların tünellemesi bir başka sebep olabilir. Bu tünellemeden dolayı, metal pozitif ve yarıiletken negatif net yüke sahip olur ve bu yüzden engelin parabolik şekli bozulur. I-V ölçümleri bu bozulmuş şeklin maksimum engel yüksekliğini verirken C-V metodu engel şekli parabolik kalmış gibi bozulmamış engel yüksekliğini verir.

4.4.2 AuAg(1:1)/n-Si/Ti, AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının oda sıcaklığında ve zamana bağlı olarak alınan C-V karakteristiklerinin incelenmesi

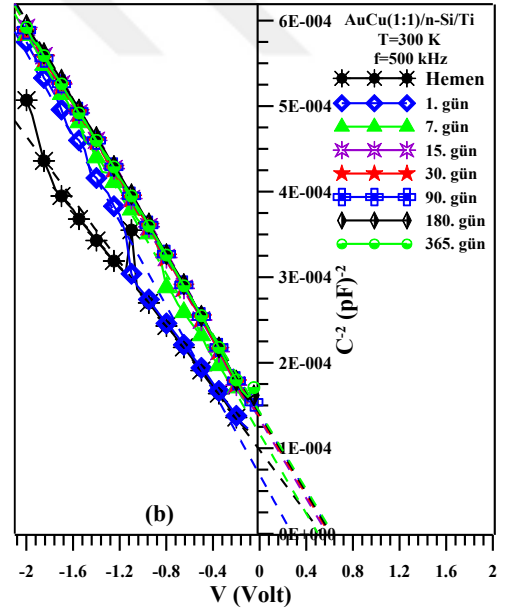
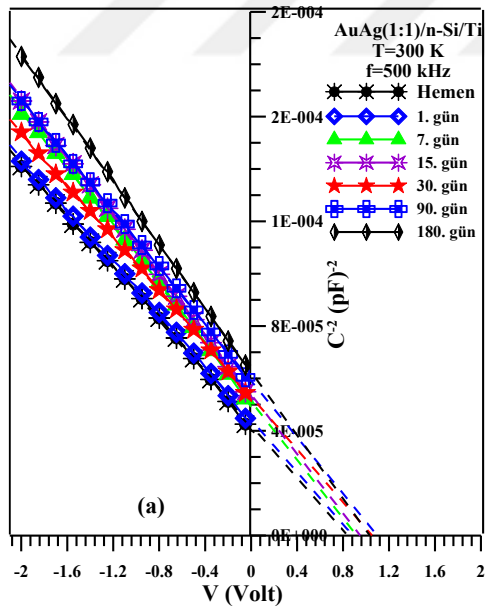
Ağırlıkça aynı oranlarda hazırlanmış ikili alaşımlardan elde edilen AuAg(1:1)/n-Si/Ti, AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının oda sıcaklığında 500 kHz frekansta farklı günlerdeki kapasite-voltaj karakteristikleri Şekil 4.38’de verilmiştir. C-V grafiklerinin yardımı ile elde edilen C^{-2} -V değişimleri de Şekil 4.39’da verilmiştir.



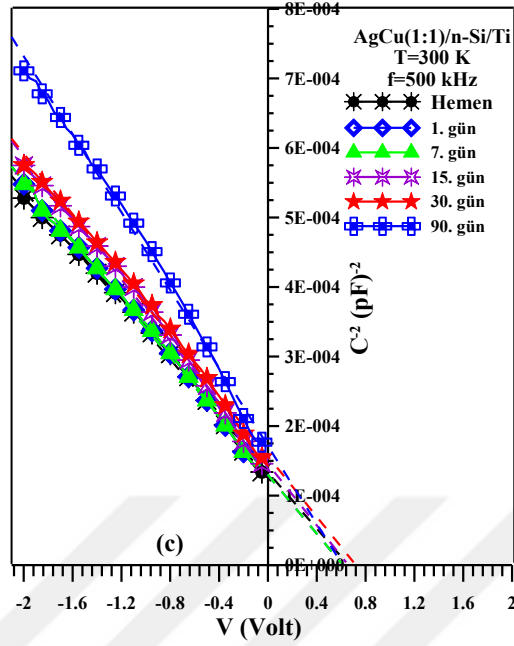
Şekil 4.36. (devam)



Şekil 4.38 (a) AuAg(1:1)/n-Si/Ti, (b) AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve (c) AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının farklı günlerde oda sıcaklığında ve $f=500$ kHz frekanstaki kapasite-voltaj karakteristikleri



Şekil 4.39. (devam)



Şekil 4.39 (a) AuAg(1:1)/n-Si/Ti, **(b)** AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve **(c)** AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının farklı günlerde oda sıcaklığında ve $f=500$ kHz frekanstaki C^2 -V değişimleri

Ağırlıkça aynı oranlarda hazırlanan ikili alaşımlardan üretilen diyotların C-V ve C^2 -V karakteristikleri de Au, Ag ve Cu metalleri ile üretilen diyotlarla benzer değişimlere sahiptir. Yani ters beslemlerde kapasite, artan ters beslem voltajıyla azalmaktadır. Doğru beslemlerde ise kapasite, artan doğru beslem voltajıyla artarak pik değerine ulaşmaktadır. Aynı zamanda kapasite üzerinde azınlık taşıyıcı etkileri söz konusudur. AuAg(1:1)/n-Si/Ti ve AuCu(1:1)/n-Si/Ti diyotlarından kapasite karakteristikleri yaşlanma zamanıyla azalma gösterirken, AgCu(1:1)/n-Si/Ti diyodunda hemen hemen değişim olmamıştır. Yine her üç diyotta da artan frekansla kapasite değerleri azalma göstermiştir. Şekil.4.39'da gösterilen C^2 -V grafiklerinde diyotların difüzyon potansiyelleri, donör konsantrasyonları ve Schottky engel yükseklikleri hesaplanmış ve sonuçlar her bir diyot için Çizelge 4.25, 4.26 ve 4.27'de sunulmuştur. Çizelgelerde de görüldüğü gibi, artan yaşlanma zamanıyla diyotların engel yükseklikleri bir miktar artmıştır. Bu durum diyotların arayüzey özelliklerinin zamana bağlı değişimlerine atfedilebilir. Bu grup içerisinde AgCu(1:1)/n-Si/Ti diyodunun kapasitif özelliklerinin zamanla daha kararlı olduğunu söyleyebiliriz.

Çizelge 4.25 Zamana bağlı olarak farklı frekanslarda AuAg(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun ters beslem C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplanan parametreleri

AuAg (1:1)/n-Si/Ti					
	f (kHz)	V_d (eV)	N_d (cm⁻³)	E_F (eV)	Φ_B (eV)
Hemen	50	0,472	6,787E+15	2,154E-01	0,687
	100	0,493	6,079E+15	2,183E-01	0,711
	200	0,737	4,763E+15	2,246E-01	0,962
	300	0,776	4,295E+15	2,272E-01	1,003
	500	0,840	3,879E+15	2,299E-01	1,070
	1000	1,050	3,528E+15	2,323E-01	1,282
1. Gün	50	0,477	6,977E+15	2,147E-01	0,691
	100	0,518	6,184E+15	2,178E-01	0,736
	200	0,774	4,765E+15	2,246E-01	0,999
	300	0,818	4,299E+15	2,272E-01	1,045
	500	0,885	3,887E+15	2,298E-01	1,115
	1000	1,086	3,575E+15	2,320E-01	1,318
7. Gün	50	0,539	5,137E+15	2,226E-01	0,762
	100	0,574	4,845E+15	2,241E-01	0,798
	200	0,803	4,043E+15	2,288E-01	1,031
	300	0,849	3,743E+15	2,308E-01	1,080
	500	0,919	3,483E+15	2,327E-01	1,151
	1000	1,113	3,299E+15	2,341E-01	1,347
15. Gün	50	0,577	4,991E+15	2,234E-01	0,800
	100	0,608	4,733E+15	2,247E-01	0,832
	200	0,827	3,956E+15	2,294E-01	1,056
	300	0,880	3,680E+15	2,312E-01	1,111
	500	0,950	3,424E+15	2,331E-01	1,183
	1000	1,153	3,242E+15	2,345E-01	1,388
30. Gün	50	0,583	6,471E+15	2,166E-01	0,800
	100	0,656	5,909E+15	2,190E-01	0,875
	200	0,940	4,745E+15	2,247E-01	1,165
	300	0,984	4,280E+15	2,273E-01	1,212
	500	1,053	3,853E+15	2,301E-01	1,283
	1000	1,299	3,529E+15	2,323E-01	1,531
90. Gün	50	0,642	6,925E+15	2,149E-01	0,856
	100	0,704	5,634E+15	2,202E-01	0,925
	200	0,991	4,369E+15	2,268E-01	1,218
	300	1,035	3,971E+15	2,293E-01	1,265
	500	1,098	3,609E+15	2,318E-01	1,329
	1000	1,320	3,347E+15	2,337E-01	1,554
180. Gün	50	0,651	5,198E+15	2,223E-01	0,873
	100	0,720	4,682E+15	2,250E-01	0,945
	200	0,939	3,726E+15	2,309E-01	1,170
	300	0,975	3,435E+15	2,330E-01	1,208
	500	1,033	3,209E+15	2,348E-01	1,268
	1000	1,255	3,131E+15	2,354E-01	1,491
365. Gün	50				
	100				
	200				
	300				
	500				
	1000				

ÖLÇÜM ALINAMADI

Çizelge 4.26 Zamana bağlı olarak farklı frekanslarda AuCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun ters beslem C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplanan parametreleri

AuCu (1:1)/n-Si/Ti					
	f (kHz)	V_d (eV)	N_d (cm⁻³)	E_F (eV)	Φ_B (eV)
Hemen	50	0,497	1,296E+15	2,582E-01	0,756
	100	0,863	1,416E+15	2,560E-01	1,118
	200	0,764	1,326E+15	2,577E-01	1,021
	300	0,796	1,294E+15	2,583E-01	1,054
	500	0,534	1,060E+15	2,635E-01	0,797
	1000	0,505	9,906E+14	2,652E-01	0,770
1. Gün	50	0,610	1,065E+15	2,633E-01	0,873
	100	0,503	1,307E+15	2,580E-01	0,761
	200	0,552	9,087E+14	2,674E-01	0,819
	300	0,308	8,368E+14	2,696E-01	0,577
	500	0,280	7,874E+14	2,711E-01	0,551
	1000	0,499	8,609E+14	2,688E-01	0,768
7. Gün	50	0,508	9,645E+14	2,659E-01	0,773
	100	0,482	9,583E+14	2,661E-01	0,748
	200	0,549	8,957E+14	2,678E-01	0,817
	300	0,563	8,700E+14	2,686E-01	0,831
	500	0,502	8,318E+14	2,697E-01	0,771
	1000	0,629	8,473E+14	2,692E-01	0,899
15. Gün	50	0,497	9,439E+14	2,665E-01	0,764
	100	0,482	9,458E+14	2,664E-01	0,748
	200	0,545	8,811E+14	2,682E-01	0,813
	300	0,561	8,578E+14	2,689E-01	0,830
	500	0,580	8,396E+14	2,695E-01	0,849
	1000	0,627	8,374E+14	2,696E-01	0,897
30. Gün	50	0,789	1,394E+15	2,564E-01	1,046
	100	0,574	1,046E+15	2,638E-01	0,838
	200	0,772	1,117E+15	2,621E-01	1,034
	300	0,578	8,745E+14	2,684E-01	0,847
	500	0,599	8,500E+14	2,692E-01	0,868
	1000	0,663	8,568E+14	2,690E-01	0,932
90. Gün	50	0,530	9,540E+14	2,662E-01	0,796
	100	0,509	9,478E+14	2,663E-01	0,775
	200	0,576	8,982E+14	2,677E-01	0,844
	300	0,593	8,740E+14	2,684E-01	0,861
	500	0,616	8,529E+14	2,691E-01	0,885
	1000	0,697	8,562E+14	2,690E-01	0,966
180. Gün	50	0,513	9,545E+14	2,662E-01	0,779
	100	0,513	9,630E+14	2,659E-01	0,779
	200	0,577	8,899E+14	2,680E-01	0,845
	300	0,589	8,625E+14	2,688E-01	0,858
	500	0,611	8,456E+14	2,693E-01	0,881
	1000	0,685	8,515E+14	2,691E-01	0,954
365. Gün	50	0,527	9,740E+14	2,656E-01	0,793
	100	0,522	9,763E+14	2,656E-01	0,788
	200	0,590	9,074E+14	2,675E-01	0,858
	300	0,602	8,777E+14	2,683E-01	0,871
	500	0,630	8,590E+14	2,689E-01	0,899
	1000	0,741	8,655E+14	2,687E-01	1,009

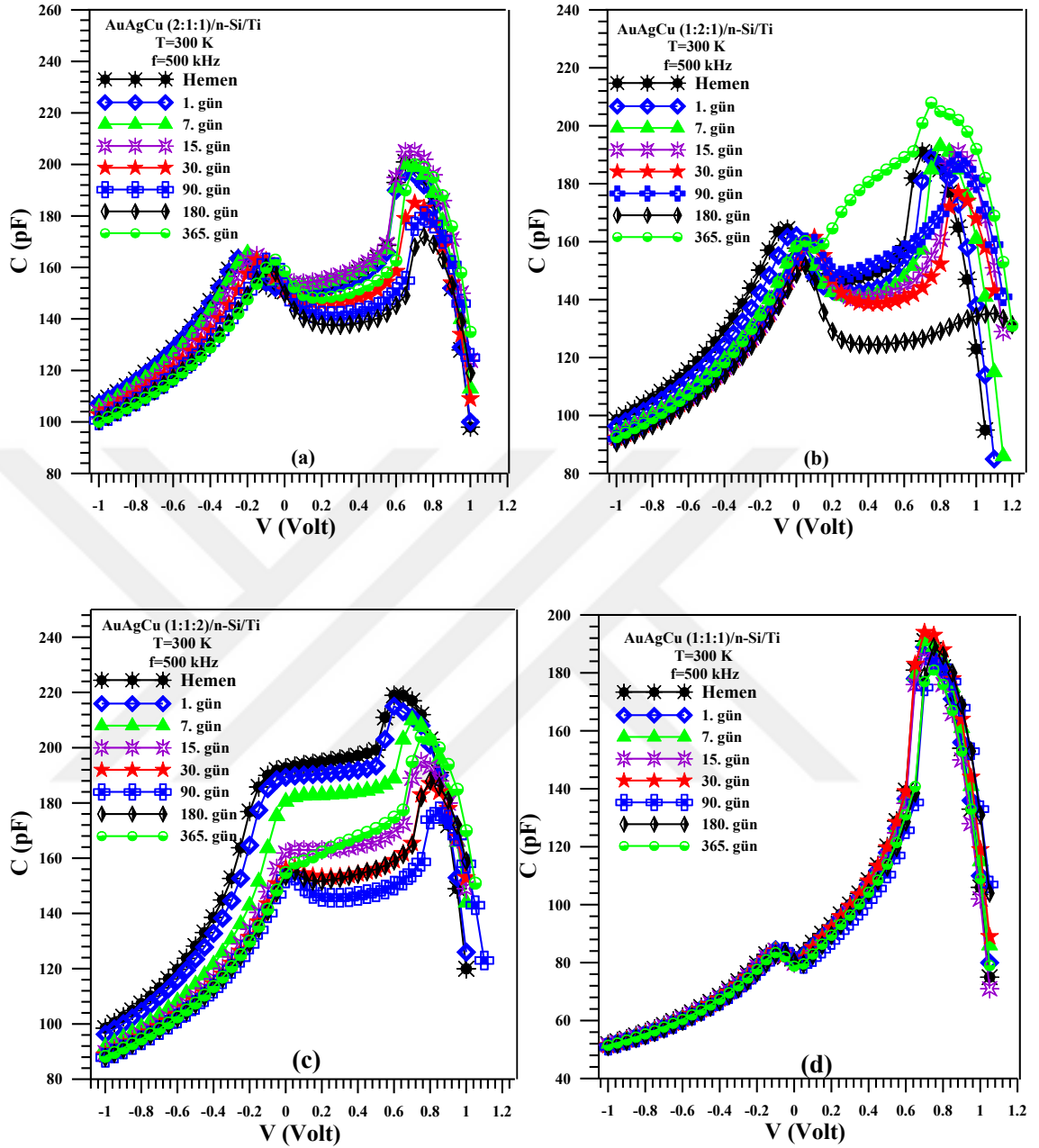
Çizelge 4.27 Zamana bağlı olarak farklı frekanslarda AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diodunun ters beslem C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplanan parametreleri

AgCu (1:1)/n-Si/Ti					
	f (kHz)	V_d (eV)	N_d (cm⁻³)	E_F (eV)	Φ_B (eV)
Hemen	50	0,503	1,158E+15	2,612E-01	0,7642
	100	0,533	1,143E+15	2,615E-01	0,7942
	200	0,620	1,039E+15	2,640E-01	0,8840
	300	0,644	9,962E+14	2,651E-01	0,9091
	500	0,660	9,584E+14	2,661E-01	0,9259
	1000	0,712	9,466E+14	2,664E-01	0,9787
1. Gün	50	0,490	1,135E+15	2,617E-01	0,751
	100	0,518	1,118E+15	2,621E-01	0,780
	200	0,601	1,008E+15	2,648E-01	0,866
	300	0,617	9,650E+14	2,659E-01	0,883
	500	0,614	9,197E+14	2,671E-01	0,881
	1000	0,680	9,192E+14	2,671E-01	0,948
7. Gün	50	0,483	1,131E+15	2,618E-01	0,745
	100	0,518	1,118E+15	2,621E-01	0,780
	200	0,601	1,008E+15	2,648E-01	0,866
	300	0,617	9,650E+14	2,659E-01	0,883
	500	0,614	9,197E+14	2,671E-01	0,881
	1000	0,680	9,192E+14	2,671E-01	0,948
15. Gün	50	0,419	1,045E+15	2,638E-01	0,683
	100	0,492	1,023E+15	2,644E-01	0,757
	200	0,611	9,337E+14	2,667E-01	0,878
	300	0,633	9,027E+14	2,676E-01	0,901
	500	0,659	8,785E+14	2,683E-01	0,927
	1000	0,704	8,765E+14	2,684E-01	0,972
30. Gün	50	0,526	1,099E+15	2,625E-01	0,788
	100	0,573	1,069E+15	2,632E-01	0,837
	200	0,665	9,514E+14	2,662E-01	0,931
	300	0,692	9,181E+14	2,672E-01	0,959
	500	0,720	8,931E+14	2,679E-01	0,988
	1000	0,770	8,920E+14	2,679E-01	1,038
90. Gün	50	0,498	8,288E+14	2,698E-01	0,768
	100	0,502	8,158E+14	2,702E-01	0,773
	200	0,573	7,390E+14	2,728E-01	0,846
	300	0,593	7,137E+14	2,737E-01	0,866
	500	0,612	6,935E+14	2,744E-01	0,887
	1000	0,653	6,813E+14	2,749E-01	0,928
180. Gün	50				
	100				
	200				
	300				
	500				
	1000				
365. Gün	50				
	100				
	200				
	300				
	500				
	1000				

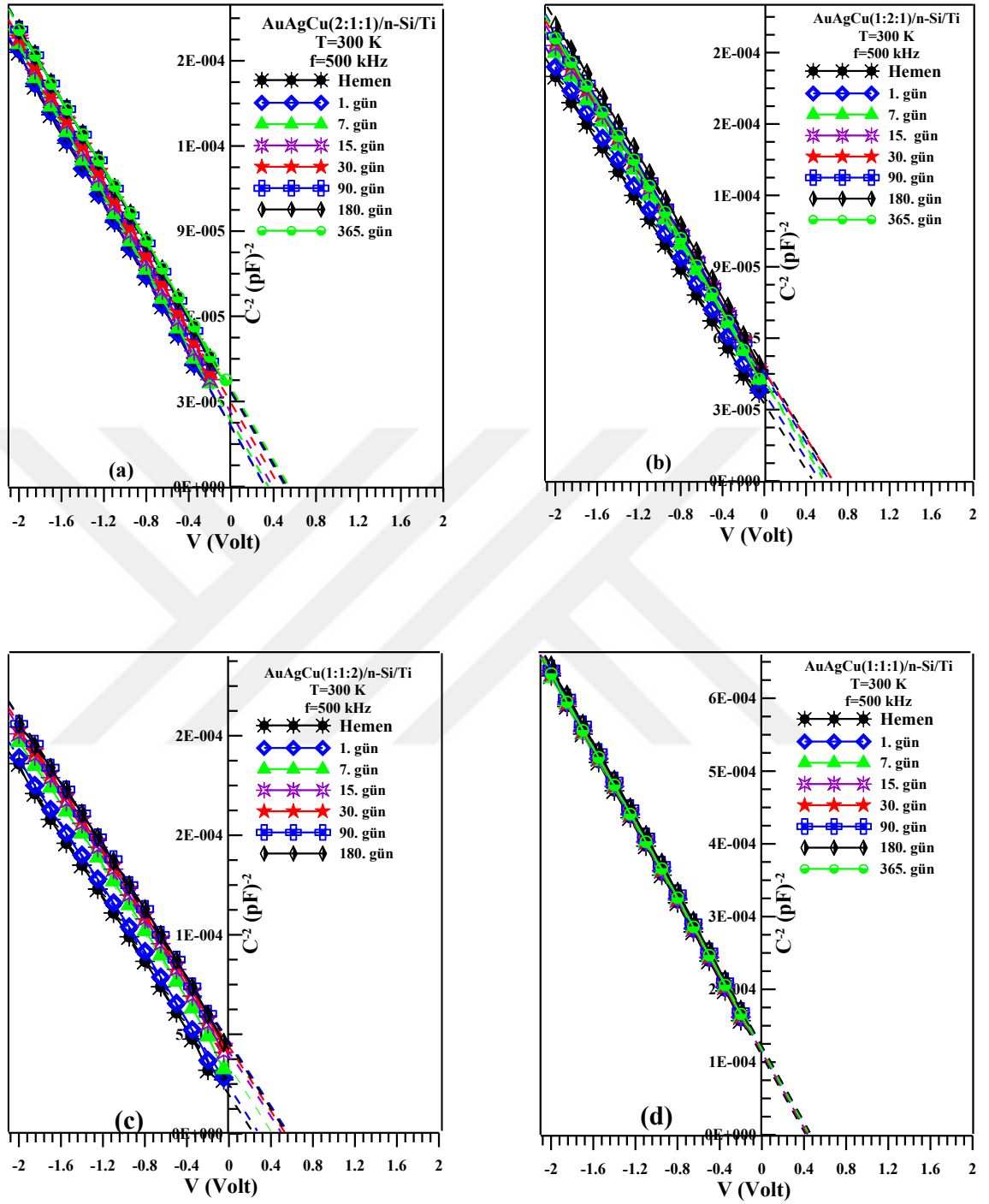
ÖLÇÜM ALINAMADI

4.4.3 AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti ve AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının oda sıcaklığında ve zamana bağlı olarak alınan C-V karakteristiklerinin incelenmesi

Önceki kesimlerde tartışıldığı gibi, C-V ölçümleri AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti ve AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının elektronik özelliklerinin incelenmesinde kullanılmıştır. Bu diyotların oda sıcaklığında, farklı günlerde ve $f=500$ kHz frekansta alınan C-V karakteristikleri Şekil 4.40'da verilmiştir. C-V değişimleri önceki diyotlarla benzerlik arz etmektedir. AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti diyonu hariç, kapasite artan yaşlanma zamanıyla ve frekansla azalmaktadır. AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti diyodunda ise 365 güne kadar alınan ölçümlerde C-V karakteristikleri hemen hemen değişmemiştir. Bu sonuçlar AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti diyodunun diğerlerine göre daha kararlı bir arayüzeye sahip olduğunu göstermektedir. Şekil 4.41; AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti ve AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti diyotları için V' 'ye karşılık $1/C^2$ sonuçlarını göstermektedir. Diyotların net taşıyıcı konsantrasyonları C^{-2} -V grafiklerinin lineer kısımları kullanılarak denklem (4.19)'dan hesaplanmıştır ve bu değerler Çizelge 4.28, 4.29, 4.30 ve 4.31'de verilmiştir. Bütün diyotlar için donör konsantrasyonları yaklaşık olarak 8×10^{14} - 4×10^{15} cm^{-3} aralığındadır. $C^{-2}=0$ iken grafiklerin voltaj eksenlerini kestikleri noktalardan diyotların difüzyon potansiyelleri belirlenmiştir ve bu değerler de Çizelge 4.28, 4.29, 4.30 ve 4.31'de verilmiştir. Tablolardan da görülebileceği gibi, difüzyon potansiyelleri artan frekansla artmaktadır. Her bir diyot için deneysel olarak tayin edilen donör konsantrasyonları göz önüne alınarak ve denklem (4.22)'den yararlanarak, Fermi enerji seviyeleri hesaplanmıştır ve yine sonuçlar Çizelge 4.28, 4.29, 4.30 ve 4.31'de verilmiştir. Diyotlar için difüzyon potansiyeli ve Fermi seviyesinin toplamının engel yüksekliğini verdiğini denklem (4.23)'den biliyoruz. Dolayısı ile denklem (4.23)'de kullanılarak Schottky diyotların engel yükseklikleri frekansa ve yaşlanma zamanına bağlı olarak hesaplanmıştır ve sonuçlar Çizelge 4.28, 4.29, 4.30 ve 4.31'de verilmiştir.



Şekil 4.40 (a) $\text{AuAgCu}(2:1:1)/\text{n-Si}/\text{Ti}$, (b) $\text{AuAgCu}(1:2:1)/\text{n-Si}/\text{Ti}$, (c) $\text{AuAgCu}(1:1:2)/\text{n-Si}/\text{Ti}$ ve (d) $\text{AuAgCu}(1:1:1)/\text{n-Si}/\text{Ti}$ Schottky diyotlarının oda sıcaklığında, farklı günlerde ve $f=500\text{ kHz}$ frekanstan alınan kapasite-voltaj karakteristikleri



Şekil 4.41 (a) AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, (b) AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti, (c) AgCu(1:1:2)/n-Si/Ti ve (d) AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotlarının C^2 -V değişimleri

Çizelge 4.28 Zamana bağlı olarak farklı frekanslarda AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti Schottky diodunun ters beslem C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplanan parametreleri

AuAgCu (2:1:1)/n-Si/Ti					
	f (kHz)	V_d (eV)	N_d (cm⁻³)	E_F (eV)	Φ_B (eV)
Hemen	50	0,209	4,065E+15	2,287E-01	0,437
	100	0,302	4,212E+15	2,278E-01	0,530
	200	0,357	3,461E+15	2,328E-01	0,590
	300	0,339	3,214E+15	2,347E-01	0,574
	500	0,381	3,087E+15	2,358E-01	0,617
	1000	0,594	3,160E+15	2,352E-01	0,829
1. Gün	50	0,192	4,076E+15	2,286E-01	0,420
	100	0,131	3,781E+15	2,305E-01	0,361
	200	0,347	3,423E+15	2,331E-01	0,580
	300	0,336	3,195E+15	2,349E-01	0,571
	500	0,378	3,062E+15	2,360E-01	0,614
	1000	0,602	3,137E+15	2,354E-01	0,837
7. Gün	50	0,157	3,742E+15	2,308E-01	0,388
	100	0,162	3,721E+15	2,310E-01	0,393
	200	0,331	3,320E+15	2,339E-01	0,565
	300	0,338	3,128E+15	2,355E-01	0,573
	500	0,383	3,003E+15	2,365E-01	0,619
	1000	0,589	3,035E+15	2,362E-01	0,826
15. Gün	50	0,179	3,773E+15	2,306E-01	0,410
	100	0,230	3,842E+15	2,301E-01	0,460
	200	0,346	3,291E+15	2,341E-01	0,580
	300	0,363	3,107E+15	2,356E-01	0,599
	500	0,407	2,972E+15	2,368E-01	0,644
	1000	0,596	2,948E+15	2,370E-01	0,833
30. Gün	50	0,268	4,058E+15	2,287E-01	0,497
	100	0,236	3,887E+15	2,298E-01	0,466
	200	0,383	3,362E+15	2,336E-01	0,617
	300	0,410	3,168E+15	2,351E-01	0,645
	500	0,458	3,020E+15	2,364E-01	0,694
	1000	0,638	2,985E+15	2,367E-01	0,875
90. Gün	50	0,284	3,947E+15	2,294E-01	0,514
	100	0,278	3,832E+15	2,302E-01	0,508
	200	0,422	3,322E+15	2,339E-01	0,656
	300	0,457	3,148E+15	2,353E-01	0,692
	500	0,508	2,999E+15	2,365E-01	0,744
	1000	0,691	2,933E+15	2,371E-01	0,928
180. Gün	50	0,291	4,171E+15	2,280E-01	0,519
	100	0,289	3,993E+15	2,291E-01	0,518
	200	0,446	3,371E+15	2,335E-01	0,679
	300	0,475	3,167E+15	2,351E-01	0,710
	500	0,527	3,027E+15	2,363E-01	0,763
	1000	0,743	2,991E+15	2,366E-01	0,979
365. Gün	50	0,3239	4,256E+15	2,275E-01	0,551
	100	0,3266	4,043E+15	2,288E-01	0,555
	200	0,4772	3,400E+15	2,333E-01	0,710
	300	0,5063	3,203E+15	2,348E-01	0,741
	500	0,5483	3,057E+15	2,360E-01	0,784
	1000	0,6928	3,020E+15	2,364E-01	0,929

Çizelge 4.29 Zamana bağlı olarak farklı frekanslarda AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun ters beslem C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplanan parametreleri

AuAgCu (1:2:1)/n-Si/Ti					
	f (kHz)	V_d (eV)	N_d (cm⁻³)	E_F (eV)	Φ_B (eV)
Hemen	50	0,291	3,196E+15	2,349E-01	0,526
	100	0,316	3,372E+15	2,335E-01	0,550
	200	0,423	3,040E+15	2,362E-01	0,659
	300	0,442	2,908E+15	2,373E-01	0,679
	500	0,483	2,827E+15	2,381E-01	0,721
	1000	0,642	2,875E+15	2,376E-01	0,880
1. Gün	50	0,336	3,170E+15	2,351E-01	0,571
	100	0,334	3,280E+15	2,342E-01	0,568
	200	0,461	2,998E+15	2,365E-01	0,697
	300	0,493	2,892E+15	2,375E-01	0,731
	500	0,536	2,805E+15	2,383E-01	0,774
	1000	0,683	2,851E+15	2,378E-01	0,921
7. Gün	50	0,411	3,170E+15	2,351E-01	0,646
	100	0,396	3,264E+15	2,344E-01	0,630
	200	0,523	2,961E+15	2,369E-01	0,760
	300	0,555	2,852E+15	2,378E-01	0,793
	500	0,603	2,777E+15	2,385E-01	0,841
	1000	0,742	2,786E+15	2,384E-01	0,981
15. Gün	50	0,464	3,190E+15	2,349E-01	0,699
	100	0,440	3,262E+15	2,344E-01	0,675
	200	0,566	2,971E+15	2,368E-01	0,802
	300	0,606	2,871E+15	2,377E-01	0,843
	500	0,653	2,785E+15	2,385E-01	0,891
	1000	0,805	2,769E+15	2,386E-01	1,043
30. Gün	50	0,459	3,116E+15	2,355E-01	0,694
	100	0,439	3,204E+15	2,348E-01	0,674
	200	0,559	2,927E+15	2,372E-01	0,797
	300	0,603	2,836E+15	2,380E-01	0,841
	500	0,652	2,757E+15	2,387E-01	0,891
	1000	0,812	2,780E+15	2,385E-01	1,051
90. Gün	50	0,441	3,127E+15	2,355E-01	0,676
	100	0,413	3,190E+15	2,349E-01	0,648
	200	0,531	2,867E+15	2,377E-01	0,769
	300	0,574	2,775E+15	2,385E-01	0,813
	500	0,625	2,695E+15	2,393E-01	0,864
	1000	0,792	2,722E+15	2,390E-01	1,032
180. Gün	50	0,432	3,051E+15	2,361E-01	0,668
	100	0,407	3,116E+15	2,355E-01	0,642
	200	0,542	2,827E+15	2,381E-01	0,780
	300	0,589	2,731E+15	2,390E-01	0,828
	500	0,658	2,669E+15	2,396E-01	0,897
	1000	0,963	2,756E+15	2,387E-01	1,202
365. Gün	50	0,395	3,043E+15	2,362E-01	0,632
	100	0,366	3,090E+15	2,358E-01	0,602
	200	0,491	2,819E+15	2,381E-01	0,729
	300	0,528	2,720E+15	2,391E-01	0,767
	500	0,576	2,659E+15	2,397E-01	0,816
	1000	0,742	2,699E+15	2,393E-01	0,982

Çizelge 4.30 Zamana bağlı olarak farklı frekanslarda AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti Schottky diodunun ters beslem C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplanan parametreleri

AuAgCu (1:1:2)/n-Si/Ti					
	f (kHz)	V_d (eV)	N_d (cm⁻³)	E_F (eV)	Φ_B (eV)
Hemen	50	0,038	2,679E+15	2,395E-01	0,278
	100	0,097	2,871E+15	2,377E-01	0,335
	200	0,166	2,508E+15	2,412E-01	0,407
	300	0,181	2,402E+15	2,423E-01	0,424
	500	0,232	2,355E+15	2,428E-01	0,475
	1000	0,431	2,441E+15	2,419E-01	0,673
1. Gün	50	0,074	2,652E+15	2,397E-01	0,313
	100	0,088	2,741E+15	2,389E-01	0,327
	200	0,211	2,499E+15	2,413E-01	0,452
	300	0,238	2,411E+15	2,422E-01	0,480
	500	0,287	2,351E+15	2,428E-01	0,529
	1000	0,473	2,408E+15	2,422E-01	0,715
7. Gün	50	0,184	2,640E+15	2,398E-01	0,424
	100	0,211	2,753E+15	2,388E-01	0,450
	200	0,344	2,521E+15	2,410E-01	0,585
	300	0,376	2,431E+15	2,420E-01	0,618
	500	0,425	2,365E+15	2,427E-01	0,668
	1000	0,568	2,358E+15	2,428E-01	0,811
15. Gün	50	0,279	2,674E+15	2,395E-01	0,519
	100	0,309	2,791E+15	2,384E-01	0,547
	200	0,433	2,559E+15	2,406E-01	0,674
	300	0,468	2,466E+15	2,416E-01	0,710
	500	0,514	2,396E+15	2,423E-01	0,757
	1000	0,647	2,401E+15	2,423E-01	0,889
30. Gün	50	0,333	2,705E+15	2,392E-01	0,572
	100	0,351	2,795E+15	2,384E-01	0,589
	200	0,468	2,573E+15	2,405E-01	0,708
	300	0,504	2,483E+15	2,414E-01	0,745
	500	0,548	2,405E+15	2,422E-01	0,791
	1000	0,682	2,396E+15	2,423E-01	0,924
90. Gün	50	0,3679	2,701E+15	2,392E-01	0,607
	100	0,3640	2,764E+15	2,387E-01	0,603
	200	0,4761	2,540E+15	2,408E-01	0,717
	300	0,5125	2,452E+15	2,418E-01	0,754
	500	0,5594	2,375E+15	2,426E-01	0,802
	1000	0,7075	2,385E+15	2,425E-01	0,950
180. Gün	50	0,370	2,748E+15	2,388E-01	0,609
	100	0,356	2,795E+15	2,384E-01	0,595
	200	0,481	2,532E+15	2,409E-01	0,721
	300	0,513	2,433E+15	2,420E-01	0,755
	500	0,554	2,370E+15	2,426E-01	0,796
	1000	0,682	2,376E+15	2,426E-01	0,924
365. Gün	50	0,362	2,751E+15	2,388E-01	0,600
	100	0,357	2,814E+15	2,382E-01	0,595
	200	0,479	2,549E+15	2,407E-01	0,720
	300	0,514	2,456E+15	2,417E-01	0,756
	500	0,552	2,391E+15	2,424E-01	0,795
	1000	0,667	2,400E+15	2,423E-01	0,910

Çizelge 4.31 Zamana bağlı olarak farklı frekanslarda AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun ters beslem C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplanan parametreleri

AuAgCu (1:1:1)/n-Si/Ti					
	f (kHz)	V_d (eV)	N_d (cm⁻³)	E_F (eV)	Φ_B (eV)
Hemen	50	0,360	8,411E+14	2,694E-01	0,630
	100	0,416	8,604E+14	2,688E-01	0,684
	200	0,412	7,876E+14	2,711E-01	0,683
	300	0,417	7,661E+14	2,719E-01	0,689
	500	0,432	7,512E+14	2,724E-01	0,704
	1000	0,466	7,561E+14	2,722E-01	0,738
1. Gün	50	0,353	8,163E+14	2,702E-01	0,623
	100	0,370	8,241E+14	2,700E-01	0,640
	200	0,420	7,823E+14	2,713E-01	0,691
	300	0,429	7,625E+14	2,720E-01	0,701
	500	0,446	7,491E+14	2,724E-01	0,718
	1000	0,479	7,519E+14	2,723E-01	0,752
7. Gün	50	0,365	8,207E+14	2,701E-01	0,635
	100	0,373	8,282E+14	2,698E-01	0,643
	200	0,428	7,893E+14	2,711E-01	0,699
	300	0,439	7,706E+14	2,717E-01	0,710
	500	0,455	7,571E+14	2,722E-01	0,727
	1000	0,489	7,575E+14	2,721E-01	0,761
15. Gün	50	0,360	8,197E+14	2,701E-01	0,630
	100	0,382	8,315E+14	2,697E-01	0,652
	200	0,424	7,851E+14	2,712E-01	0,696
	300	0,432	7,643E+14	2,719E-01	0,704
	500	0,447	7,513E+14	2,724E-01	0,719
	1000	0,478	7,538E+14	2,723E-01	0,750
30. Gün	50	0,375	8,231E+14	2,700E-01	0,645
	100	0,378	8,264E+14	2,699E-01	0,648
	200	0,425	7,810E+14	2,714E-01	0,697
	300	0,438	7,643E+14	2,719E-01	0,710
	500	0,453	7,497E+14	2,724E-01	0,726
	1000	0,486	7,501E+14	2,724E-01	0,758
90. Gün	50	0,400	8,192E+14	2,701E-01	0,670
	100	0,460	8,517E+14	2,691E-01	0,729
	200	0,463	7,912E+14	2,710E-01	0,734
	300	0,471	7,716E+14	2,717E-01	0,743
	500	0,486	7,536E+14	2,723E-01	0,758
	1000	0,531	7,524E+14	2,723E-01	0,803
180. Gün	50	0,380	8,109E+14	2,704E-01	0,650
	100	0,375	8,117E+14	2,704E-01	0,645
	200	0,433	7,727E+14	2,716E-01	0,704
	300	0,450	7,575E+14	2,721E-01	0,722
	500	0,468	7,447E+14	2,726E-01	0,740
	1000	0,505	7,442E+14	2,726E-01	0,778
365. Gün	50	0,363	8,223E+14	2,700E-01	0,633
	100	0,359	8,220E+14	2,700E-01	0,629
	200	0,418	7,801E+14	2,714E-01	0,690
	300	0,434	7,619E+14	2,720E-01	0,706
	500	0,452	7,499E+14	2,724E-01	0,724
	1000	0,481	7,542E+14	2,723E-01	0,753

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada yarıiletken olarak $\langle 111 \rangle$ yönelimine sahip, 1-10 $\Omega \cdot \text{cm}$ öz dirençli ve 400 μm kalınlığında, fabrikasyon olarak bir yüzü parlatılmış diğer yüzü mat olan n-tipi Si kullanıldı. n-Si yarıiletkeni çeşitli mekanik kirlilikler ihtiva etmemesinden dolayı direk olarak literatürde yer alan kimyasal temizleme işlemine maruz tutuldu. Kimyasal temizleme işleminden hemen sonra n-Si yarıiletkenin mat yüzeyine Ti metali vakum ortamında buharlaştırılıp, 425 $^{\circ}\text{C}$ 'de 3 dakika tavlansak omik kontak yapıldı.

Çalışmanın amacı doğrultucu kontak materyali olarak kullanılacak farklı oranlardaki ikili ve üçlü alaşımların kontakın kararlılığı üzerindeki etkilerini araştırmak olduğu için, Au, Ag ve Cu metalleri kullanılarak ağırlıkça eşit oranlarda AuAg, AuCu ve AgCu ikili alaşımları ve ağırlıkça farklı oranlarda AuAgCu üçlü alaşımları termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak elde edildi. Elde edilen alaşımların ağırlıkça oranlarının doğruluğu EDAX ölçümleriyle kontrol edildi. Elde edilen EDAX ölçüm sonuçları tablo halinde Çizelge 4.1'de verildi. Tablodan da görüldüğü gibi EDAX ölçümleri elde etmek istediğimiz oranlara yakın değerler vermiştir.

Ti metali ile omik kontak yapılan n-Si yarıiletkeni on farklı diyot üretebilmek için elmas uçlu kalem yardımıyla uygun boyutta olacak şekilde on parçaya bölündü. Bölünmüş Ti/n-Si parçaların herbirinin parlatılmış yüzeyleri üzerine aynı şartlar altında sırasıyla Au, Ag ve Cu metalleri, AuAg, AuCu ve AgCu ağırlıkça eşit oranlı ikili alaşımları ve AuAgCu ağırlıkça farklı oranlı üçlü alaşımları termal buharlaştırma yöntemi ile buharlaştırılarak Au/n-Si/Ti, Ag/n-Si/Ti, Cu/n-Si/Ti, AuAg(1:1)/n-Si/Ti, AuCu(1:1)/n-Si/Ti, AgCu(1:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti, AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti ve AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotları elde edildi. Böylece doğrultucu kontak materyalleri farklı üç grup diyot üretilmiş oldu. I-V ölçümlerini alabilmek için uygun numune tutucular hazırlandı. On diyodun herbiri bu tutuculara yerleştirildi. Oda sıcaklığında ve karanlıkta hemen alınan I-V ölçümleri 1, 7, 15, 30, 90, 180 ve 365 gün sonra tekrarlandı.

Üretilen üç grup diyodun herbirinin $\ln(I)$ -V grafikleri yaşlanma zamanının fonksiyonu olarak çizildi. Bu grafikler Au, Ag ve Cu metalleriyle üretilen birinci grup diyotlar için Şekil 4.1’de; AuAg, AuCu ve AgCu alaşımlarıyla üretilen ikinci grup diyotlar için Şekil 4.12’de ve farklı oranlardaki AuAgCu alaşımlarıyla üretilen üçüncü grup diyotlar için de Şekil 4.23’de görülmektedir. Diyotların tamamı iyi bir doğrultma karakteristiği göstermiştir. Bu $\ln(I)$ -V grafiklerinin doğru beslem kısımlarının lineer bölgelerine yapılan fitler ve (4.4) ve (4.5) denklemleri yardımıyla diyotların I_0 , n ve Φ_B değerleri yaşlanma zamanına bağlı olarak belirlenmiştir ve sonuçlar Çizelge 4.2, 4.3, 4.4, 4.8, 4.9, 4.10, 4.14, 4.15, 4.16 ve 4.17’de verilmiştir.

Metal/yarıiletken eklemlerden elde edilen birinci grup Au/n-Si/Ti, Ag/n-Si/Ti ve Cu/n-Si/Ti Schottky diyotları için yaşlanma zamanına bağlı idealite faktörü değerleri sırasıyla 1,018-1,06, 1,050-4,504 ve 1,021-1,163 aralığında; engel yüksekliği değerleri ise sırasıyla 0,713-0,729 eV, 0,608-0,683 eV ve 0,563-0,653 eV aralığında değişmiştir. İkili alaşım/yarıiletken eklemlerden elde edilen ikinci grup AuAg(1:1)/n-Si/Ti, AuCu(1:1)/n-Si/Ti ve AgCu(1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotları için yaşlanma zamanına bağlı idealite faktörü değerleri sırasıyla 1,054-4,111, 1,020-1,085 ve 1,020-1,673 aralığında; engel yüksekliği değerleri ise sırasıyla 0,621-0,706 eV, 0,566-0,581 eV ve 0,575-0,612 eV aralığında değişmiştir. Üçlü alaşım/yarıiletken eklemlerden elde edilen üçüncü grup AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti ve AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotları için yaşlanma zamanına bağlı idealite faktörü değerleri sırasıyla 1,033-1,082, 1,053-1,115, 1,029-1,107 ve 1,011-1,072 aralığında; engel yüksekliği değerleri ise sırasıyla 0,526-0,569 eV, 0,578-0,690 eV, 0,534-0,644 eV ve 0,553-0,627 eV aralığında değişmiştir.

Bir diyodun idealite faktörü 1 değerine ne kadar yakın ise diyotta ideale o kadar yakın demektir. Bu faktör $n=1,10$ değerinden küçük ise “diyot yaklaşık olarak idealdir” denilir. Bunun anlamı şudur: ideal bir diyotta akım termoiyonik emisyon teorisine uygun olarak gerçekleşir (Norde 1979). Her üç grubun zamana bağlı idealite faktörü değerleri incelendiğinde Ag/n-Si/Ti ve AuAg(1:1)/n-Si/Ti diyotların diğer diyotlara göre

ideallikten daha fazla saptığı görülmektedir. Tüm diyotların engel yüksekliği değerleri incelendiğinde zamanla çok az miktarda arttığı ve metal/yarıiletken eklemlerden elde edilen diyotlara kıyasla bu metallere elde edilen alaşımlardan oluşan diyotların daha az engel yüksekliği değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Bunun sebebi tezin kuramsal temeller kısmında da izah edildiği gibi, Schottky-Mott teorisinde engel yüksekliği değerinin, metal iş fonksiyonu ve yarıiletken elektronegatifliği arasındaki farka eşit olmasından dolayı alaşımların iş fonksiyonlarının saf metallere göre daha düşük olması gösterilebilir.

Bardeen ve benzer modellerde, engel yüksekliği arayüzeydeki elektronik yük ile belirlenir ve bu nedenle metal iş fonksiyonundan bağımsız olabilir. Uygulamada ise metalin seçiminde engel yüksekliğinin bağımlılık derecesinin, yarıiletken, kontak oluşumundan önce yarıiletkenin yüzeyinin yapısına ve arayüzey kimyasına çok bağlı olduğu bilinmektedir. Metal-yarıiletken arayüzeylerdeki Schottky engel yüksekliğinin olası uzaysal varyasyonu Schottky engelinin ana oluşum mekanizmasının tanımlanmasını doğrudan etkilemektedir. Hemen hemen tüm metal-Si arayüzeyleri bir miktar interdifüzyon ve/veya bileşik oluşumu içerir. Metaller silisyum ile kontak haline geldiğinde arayüzeyde meydana gelen çeşitli kimyasal ve metalürjik reaksiyonlar sonucunda silisyumun farklı silikat fazları oluşur. Metal-Si arayüzeylerinin ve elektriksel özelliklerinin kararlılığı açısından bu silikatlar mikroelektronik imalatlarında önemli bir yer sağlar. Arayüzeyde meydana gelen silikat reaksiyonları, nokta kusurlarına, metal kirliliklere, strese, katkı difüzyonuna ve yarıiletken materyaldeki diğer istenmeyen değişikliklere yol açabilir. Üstelik silikat difüzyon ve reaksiyonundaki homojensizlikler genellikle daha karmaşık arayüzey yapılarına ve stokiometreleri tamamlanmamış fazlara da neden olabilir. Böylece diyodun Schottky engel yüksekliği homojen olmayabilir. Homojen olmayan Schottky engel yüksekliklerinin en doğrudan açıklaması, Schottky engel mekanizmasının metal-yarıiletken arayüzeyinin bazı yerel parametrelerine bağlı olmasıdır. Yerel Schottky engel yüksekliğinin değişmesine neden olan bu yerel özelliklerin değişimidir. Dolayısıyla bir diyodunun gerçek engel yüksekliği yukarıda sunulan nedenlerden dolayı teorik olarak beklenen engel yüksekliğinden farklı olabilir. Bundan dolayı da engel yüksekliği kesinlikle deneysel olarak belirlenmesi gereken

diyodunun önemli bir parametresidir ve farklı metotlar (her metotta farklı etkiler söz konusu olduğu için) kullanılarak belirlenmelidir. Bu sebeple tez kapsamında üretilen on farklı diyodunun engel yükseklikleri dört farklı metotla belirlenmiştir.

Deneysel olarak gözlenen I-V karakteristikleri, termiyonik emisyon teorisi ile uyum içinde, bazı beslem aralığında neredeyse her zaman yarı logaritmiktir. Bununla birlikte, bu tür grafiklerin eğimleri genellikle teorik öngöründen farklıdır, bu da denklem (4.1) ile verilen eklem akımının tanımında ampirik idealite faktörünün dahil edilmesini gerekli kılmaktadır. Birden büyük bir idealite faktörü, termiyonik emisyon teorisi içinde doğrudan bir açıklamaya sahip değildir ve genellikle beslem-bağımlı olan bir Schottky engel yüksekliğine atfedilir. Homojen olmayan bir Schottky engelinin etkin Schottky engel yüksekliklerinin (eyer noktası potansiyeli) bu beslem bağımlılığı, idealite faktörlerinin gözlenen tüm davranışlarını açıklayabilir. Schottky engel diyotlarının akımları genellikle düşük Schottky engel yükseklikli yamaları (patch) ile baskın olduğu için, birden daha büyük idealite faktörleri rutin olarak gözlemlenir. Ayrıca, imaj kuvvet engel düşmesi, jenerasyon-rekombinasyon, arayüzey durumları ve termiyonik alan emisyonunun hepsi, birden daha büyük bir idealite faktörüne yol açabilecek olası mekanizmalardır (Brillson 1993).

Doğrultma oranı bir diyodunun elektronik teknolojisinde kullanılabilmesi bakımından önemli karakteristiklerden biridir. Bu sebeple, üretilcek bir diyodun çok iyi derecede bir doğrultucu davranış göstermesi istenir. Bir Schottky diyodunun doğrultma oranı, verilen bir potansiyel değerinde düz beslem akımı değerinin ters beslem akımına oranı şeklinde tanımlanır. Bu çalışmada, üretilen her bir Schottky diyodunun doğrultma oranının bulunabilmesi için ölçüm yapılan -1V ile +1V aralığındaki her bir ölçüm adımında düz beslem akımı değeri ters beslem akımına oranlanmıştır. Au/n-Si/Ti, Ag/n-Si/Ti, Cu/n-Si/Ti, AuAg(1:1)/n-Si/Ti, AuCu(1:1)/n-Si/Ti, AgCu(1:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(2:1:1)/n-Si/Ti, AuAgCu(1:1:2)/n-Si/Ti, AuAgCu(1:2:1)/n-Si/Ti ve AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyotları için hesaplanan doğrultma oranlarının uygulanan gerilime karşı grafikleri sırasıyla Şekil 4.2 (b), 4.3 (b), 4.4 (b), 4.13 (b), 4.14 (b), 4.15 (b), 4.24 (b), 4.25 (b), 4.26(b) ve 4.27 (b)'de verilmiştir. Birinci grup Schottky diyotların 0,4-1,0 V

aralığındaki yaşlanma zamanına bağlı doğrultma oranları Au/n-Si/Ti diyotu için 10^6 'dan 10^4 mertebesine azalmıştır, Ag/n-Si/Ti diyotu için 30 güne kadar 10^5 'den 10^6 mertebesine artmış sonraki günlerde bozulmaya doğru gittiğinden doğrultma oranı önemli ölçüde azalmıştır ve Cu/n-Si/Ti diyotu için 10^4 'den 10^5 mertebesine artmıştır. İkinci grup Schottky diyotların doğrultma oranları AuAg(1:1)/n-Si/Ti diyotu için 30 güne kadar 10^4 - 10^6 mertebeleri arasında azalma göstermişken sonraki günlerde bozulmaya doğru gittiğinden doğrultma oranı önemli ölçüde azalmıştır, AuCu(1:1)/n-Si/Ti diyotu için 10^4 'den 10^3 mertebesine azalmıştır ve AgCu(1:1)/n-Si/Ti diyotu için 10^5 'den 10^3 mertebesine azalmıştır. Üçüncü grup Schottky diyotların ise doğrultma oranları her dört diyot için de 10^4 - 10^6 mertebeleri arasında çok az değiştiği görülmüştür. Bu üç grubun doğrultma oranları birbirleri ile kıyaslandığında üçlü alaşım/yarıiletken eklemlerden elde edilen Schottky diyotların daha kararlı olduğu görülmektedir.

Bir Schottky engel diyotu, metal ve yarıiletken arasında ince bir arayüzey doğal oksit tabakasına sahiptir. Böyle bir yalıtım tabakasının varlığı cihazı bir diyot karaktersitiği üzerinde güçlü bir etkiye sahip olabilen ve arayüzey-durum yükünü düz beslem uygulama potansiyeli ile değiştirebilen metal/arayüzey katmanı/yarıiletken (MIS) diyodununa dönüştürür, bu da arayüzey tabakasında ilave bir alana yol açar. Bu nedenle SBD'lerin performans ve güvenilirliği genellikle arayüzey durum yoğunluğuna ve bunların enerji dağılımına ve doğal oksit tabakasının mevcudiyetine bağlıdır. Arayüzey durumlarının incelenmesi Schottky engel diyotlarının elektriksel özelliklerinin anlaşılması için son derece önemlidir (Tataroğlu and Altındal 2007).

Her üç grup diyotlar için $\ln I$ - V karakteristiklerinden elde edilen arayüzey hal yoğunluklarının yaşlanma zamanına göre değişimleri Şekil 4.2 (a), 4.3 (a), 4.4 (a), 4.13 (a), 4.14 (a), 4.15 (a), 4.24 (a), 4.25 (a), 4.26 (a) ve 4.27 (a)'da verilmiştir. Burada açık olarak arayüzey hal yoğunluğunun bant ortasından iletkenlik bandının tabanına doğru üstel olarak artışı gözlenmiştir. Yine arayüzey halleri yaklaşık 10^{18} mertebesinde olup üstel bir değişime sahiptir ve zamanla bariz değişim gözlenmiştir.

Aynı zamanda tüm diyotlar için bazı düz beslem voltajlarının fonksiyonu olarak düz beslem diyot akımının zaman ile değişimi incelenmiştir. Bu değişimler Şekil 4.5, 4.16 ve 4.28’de verilmiştir. Üç farklı düz beslem voltajında diyottan geçen akım değerleri 90 gün ölçümlerine kadar zamanla azalmış ve daha sonra hemen hemen kararlı hale gelmiştir.

Schottky diyotların elektriksel karakteristikleri çoğu zaman arayüzey halleri, arayüzey tabakası ve seri direnç gibi çeşitli ideal olmayan etkilerle değişir. Düşük voltajda, doğru beslem akım voltajı (I-V) karakteristikleri, yarılogaritmik ölçekte doğrusaldır, fakat uygulanan voltaj yeterince büyük olduğunda seri direnç, arayüzey tabakası ve arayüzey durumlarının etkisinden dolayı I-V karakteristikleri doğrusallıktan önemli ölçüde sapmaktadırlar. Seri direnç yarıiletken gövde, temas telleri ve omik kontakların toplam direncidir. Norde, Schottky diyotların doğru beslem I-V eğrilerinden seri direnci belirlemek için bir yöntem öneren ilk kişidir. Norde özel bir $F(V)$ fonksiyonu tanımlamıştır ve ideal bir Schottky diyot için ($n=1$) seri direncin $F(V)$ ’nin minimumunun belirlenmesiyle hesaplanabileceğini göstermiştir. Ancak Norde’nin yöntemi $n>1$ olan gerçek diyotlar için geçerli değildir. Norde metodu daha sonraları Bohlin tarafından modifiye edilmiştir ve $n>1$ olan gerçek diyotlarda da kullanılmıştır (Bohlin 1986).

Tezin kuramsal temeller kısmında da verildiği gibi modifiye edilmiş Norde fonksiyonu $F(V)$ ’nin V ’ye karşı grafiği çizilip, grafiğin minimum noktasına karşılık gelen akım ve gerilim değerleri belirlenerek tüm diyotlar için Φ_B ve R_S değerli hesaplanmıştır. Tüm diyotlar için çizilen $F(V)$ - V grafikleri Şekil 4.9, 4.20 ve 4.33’de, hesaplanan değerler de Çizelge 4.5, 4.6, 4.7, 4.11, 4.12, 4.13, 4.18, 4.19, 4.20 ve 4.21’de sunulmuştur. Aynı şekilde Cheung S. K. ve Cheung N. W. $n>1$ olan diyotlar için başka bir model önermiş ve sadece bir tek I-V ölçümünden diyot parametrelerini türetmeyi başarmışlardır. Doğru beslemde akım eğrisi hızlı bir şekilde seri direnç tarafından baskın hale geldiğinden ve doğrusallıktan saptığından dolayı, n ve Φ_B ’yi ölçmek için $\ln(I)$ - V karakteristiklerinin düşük doğru beslem kısmı kullanılmıştır. Ancak bu metot sadece I-V eğrisinin düşük doğru beslem bölgesinde ihmal edilebilecek kadar düşük seri dirençli diyotlar için çalışır ki bizim diyotlarımız böyle görünmüyordu. Seri direnç Schottky diyotların elektriksel karakteristiklerini etkileyen en önemli parametredir, bu nedenle n , Φ_B ve R_S ’yi

değerlendirebilmek için Cheung metodunu etkin bir yöntem olarak tekrar kullandık. Seri direnç ile Schottky engel diyodunun termiyonik emisiyondan dolayı doğru beslem I-V karakteristikleri, tezin daha önceki kesimlerinde detayları verildiği gibi $dV/d\ln(I)=(nkT/q)+IR_S$ ve $H(I)=n\Phi_B+IR_S$ Cheung fonksiyonları yardımıyla ifade edilebilirler. Çalışmamızda kullandığımız tüm diyotların $dV/d\ln(I)$ -I ve $H(I)$ -I grafikleri sırasıyla Şekil 4.6, 4.7, 4.8, 4.17, 4.18, 4.19, 4.29, 4.30, 4.31 ve 4.32’de verilmiştir. $dV/d\ln(I)$ -I grafikleri çizilip, lineer fitler yapıldıktan sonra, eğimlerden ve doğrusal fitlerin akım eksenini kestiği noktalardan n ve R_S değerleri hesaplanmıştır. Aynı şekilde tüm diyotların $H(I)$ -I grafiklerine lineer fitler yapıldıktan sonra, fitlerin eğimlerinden ve akım eksenini kestiği noktalardan Φ_B ve R_S değerleri hesaplanmıştır. Tüm diyotlar için yaşlanma zamanına bağlı olarak hesaplanan n , Φ_B ve R_S değerleri Çizelge 4.5, 4.6, 4.7, 4.11, 4.12, 4.13, 4.18, 4.19, 4.20 ve 4.21’de sunulmuştur. $dV/d\ln(I)$ -I ve $H(I)$ -I grafiklerinden hesaplanan R_S değerlerinin birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Bu durum Cheung’un yaklaşımının tutarlılığını göstermektedir (Aydın *et al.* 2010).

Yukarıda ifade edilen üç metottan üretilen n , Φ_B ve R_S değerleri karşılaştırıldığında, seri direnci dikkate alan son iki yöntemden (Cheung ve Norde metotları) elde edilen değerlerin birbiriyle yakın bir şekilde uyumlu olduğu görülebilir. Bu tutarlılık, bu yöntemlerin verimliliğini kanıtlamak için iyi bir neden olmakla birlikte, seri dirençleri ihmal eden ilk yöntemin (temel I-V yöntemi) makul görülmeyen küçük bir idealite faktörüne yol açtığını da göstermektedir. Bu nedenle özellikle idealite faktörü büyük olduğunda seri direncin ihmal edilmesi Schottky diyodunun elektriksel parametrelerinin hesaplanmasında hatalara neden olabilir (Karataş and Türüt 2006; Hamdaoui *et al.* 2014; Reddy 2014).

Her üç grup diyotlar için de termiyonik emisyon, Norde ve Cheung metotlarıyla hesaplanan idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerlerinin yaşlanma zamanına bağlı değişimleri Şekil 4.10, 4.11, 4.21, 4.22, 4.34 ve 4.35’de verilmiştir. Cheung ve Norde metotları ile hesaplanan engel yüksekliği değerleri aynı günler için hemen hemen yakın bulunmuştur. Termiyonik emisyon metodu ile hesaplanan diyot parametreleri Cheung ve Norde metodundan hesaplanan diyot parametrelerinden daha

düşük bulunmuştur. Bunun nedeni, Cheung metodu I-V karakteristiğinin doğrusallıktan saptığı yüksek akım bölgesini ve Norde metodu bütün düz beslem $\ln(I)$ -V karakteristiklerini kullanır ve bu sebeple seri direnç ve arayüzey durumları diyot parametreleri hesaplamasında etkili olur. Termiyonik emisyon metodunda $\ln(I)$ -V grafiklerinin düz beslem lineer bölgesi kullanılır bu nedenle seri direnç ve arayüzey durumlarının hesaplanan diyot parametrelerine etkisi yoktur (Taşer *et al.* 2017). Cheung ve Norde metotlarından hesaplanan seri direnç değerlerinin uyum içinde olduğu ve zamanla artış gösterdiği gözlenmiştir.

Her üç gruptaki Schottky diyotların belirlenen zamanlarda (hemen, 1., 7., 15., 30., 90., 180. ve 365. gün) ve 50, 100, 200, 300, 500 ve 1000 kHz frekans değerlerinde C-V ölçümleri -1V ile +1V aralığında alınmıştır. Şekil 4.36, 4.38 ve 4.40'da tüm Schottky diyotların 500 kHz frekansta zamana bağlı C-V değişimleri verilmiştir. Ters beslem uygulama gerilimi arttıkça, kapasite hızlı bir şekilde azalmaktadır. Aynı şekilde kapasite zamanlarda bir miktar azalmıştır. C-V değişimlerinden faydalanılarak elde edilen C^{-2} -V değişimleri Şekil 4.37, 4.39 ve 4.41'de verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi uygulama gerilimi, ters beslem bölgesi için azaldıkça, C^{-2} azalmaktadır. C^{-2} -V değişimlerinden yararlanılarak Schottky diyotların frekansa ve zamana bağlı engel yüksekliği, yarıiletkendeki taşıyıcı konsantrasyonu, difüzyon potansiyeli ve Fermi enerji seviyesi değerleri hesaplanmıştır ve bu değerler Çizelge 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28, 4.29, 4.30 ve 4.31'de tablo halinde verilmiştir. Birinci grup diyotlar için C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplanan V_d , E_F ve Φ_B değerleri hem uygulama frekansıyla hem de yaşlanma zamanıyla hafifçe artmıştır. İkinci grup diyotlarda ise AuAg/n-Si/Ti diydununda V_d , E_F ve Φ_B değerleri artan frekans ve yaşlanma zamanıyla bir miktar artmıştır. Taşıyıcı Konsantrasyonu (N_d)(cm^{-3}) 10^{15} mertebesinde değerler almıştır. AgCu(1:1)/n-Si/Ti ve AuCu(1:1)/n-Si/Ti diyotları için bu değerler çok az miktarda düzensiz bir değişim sergilemiştir. Taşıyıcı Konsantrasyonu (N_d)(cm^{-3}) 10^{14} - 10^{15} mertebe arasında değerler almıştır. Üçüncü grup diyotlarda da V_d , E_F ve Φ_B değerleri artan frekans ve yaşlanma zamanıyla çok az değişimler sergilemişlerdir. Bu değişimler diyotların arayüzey özelliklerinin zamana bağlı değişimlerine atfedilebilir.

Genellikle, Schottky engel yüksekliği değerleri ölçüm tekniğine bağlı olduğu için, doğru beslem I-V karakteristiklerinden elde edilen engel yüksekliği değerleri ters beslem C^{-2} -V karakteristiklerinden elde edilenlerden önemli ölçüde farklı olabilir. Homojen olmayan Schottky engellerinde akım iletimi, düşük Schottky engel yüksekliği yamaları (patch) ile baskındır ve bu tüm diyodun aritmetik ortalamasından daha düşük olan, görünür Schottky engel yüksekliklerinin I-V tekniğinde ortaya çıkmasına yol açar. Normal şartlar altında, C-V tekniği tüm diyet için ortalama bir Schottky engel yüksekliği ürettiğinden Schottky engel yüksekliğinin ölçüm tekniği üzerindeki deneysel olarak gözlenen bağımlılığının engel yüksekliğinin homojen olmamasından kaynaklanması muhtemeldir (Tung *et al.* 1991).

C-V deneylerinde yaygın olarak görülen bir olay, gerçek aritmetik ortalamadan bile daha yüksek olan görünür bir Schottky engel yüksekliğinin ortaya çıkmasıdır. Bu durum çoğu zaman deneysel problemlerle yani hem C-V verilerinden gerçek uzay yükü kapasitansının nasıl belirleneceği ile ilişkilidir. Gerçek eklem kapasiteleri olmayan görünür kapasitelerin ölçülmesine yol açabilecek birçok iyi bilinen mekanizma vardır. Derin seviyeler, katkılama varyasyonları, kenarlar, arayüzey durumları ve hatta büyük bir seri direnç böyle bir gözlem yapılmasına yol açabilir. Diğer taraftan C^{-2} -V grafiklerinde lineerlikten sapmalar (aşağı doğru bükülmeler) şeklinde görülen anormalliklerde bir fazla (excess) kapasitans ile açıklanabilir ve arayüzey durumlarının varlığına atfedilebilir (Werner *et al.* 1988).

Metal/yarıiletken arayüzeylerinde meydana gelen olayların her zaman önerilen teorilerin ve mekanizmaların açıklayabileceğinden daha karmaşık olduğu bilinmektedir. Deney sonuçlarındaki bu tutarsızlıklar şimdiye kadar önerilmiş olan basit modellerden daha karmaşık olan arayüzey elektronik özelliklerinin olmasındandır. Herhangi bir metal/yarıiletken arayüzeyindeki kimyasal ve metalürjik reaksiyonlar oldukça heterojen olabilir ve bunun sonucu olarak deneysel olarak gözlemlenen Schottky engel yüksekliği verilerindeki dalgalanmaların ve varyasyonların homojen olmayan engel gerçeği ile iyi bir uyum içinde olduğu söylenebilir (Jun *et al.* 2015; Hamdaoui *et al.* 2014).

Diyotlarda zamanla Schottky engel yüksekliği özelliklerinin değişimi yaşlanma olarak bilinmektedir. Böyle bir etki, metal-yarıiletken arayüzeyindeki iyonik aktiviteden veya silisyum yüzeyinde metal biriktirilmesi (depozisyonu) sonrası metal/yarıiletken arayüzeyine yayılan havadaki oksijenden kaynaklanmış olabilir. Aynı zamanda metal/yarıiletken arayüzeyindeki arayüzey durumlarının varlığı da bu yaşlanma etkisinin bir açıklaması olarak sunulabilir. Doğrultucu kontak metalinin buharlaştırılması veya püskürtülmesi sırasında meydana gelen yüzey hasarları ve donör benzeri tuzaklar da bu etkiye sebep olabilir (Hamdaoui *et al.* 2014).

Schottky engel oluşumunun alternatif bir kimya tabanlı modeli, metal/yarıiletken arayüzeyinde yeni alaşım fazlarının oluşumunu içerir. Metal ve yarıiletken arasındaki kimyasal etkileşimler başlangıç malzemelerinin iş fonksiyonlarından farklı olarak yeni arayüzey fazlarına yol açabilir. Yani arayüzeyde silisyum bakımından zengin çeşitli silikat fazları oluşur ve bu silikat fazlarının iş fonksiyonları engelin oluşumunda metalinkinden daha etkili olur. Sadece nanometre kalınlığındaki silikat tabakalar devre elemanının özelliklerinde büyük değişiklikler meydana getirebilir. Zamanla yerel arayüzey kimyasındaki değişiklikler Schottky engel yüksekliğindeki değişiklikler olarak elektriksel karakteristikleri etkilerler. İşte bu yüzden doğrultucu kontak materyali olarak kullanılan bazı ikili ve üçlü alaşımlar arayüzey kimyasal yapısının kontrolünü sağlayarak daha kararlı karakteristikler sağlayabilirler. Bileşik metal alaşım tabakalar arayüzeyin yeniden yapılanması, azaltılmış arayüzey kimyasal aktivitesi ve aynı zamanda iyi bir örgü uyumu için önemli alternatif oluşturabilirler. Özel bir yeniden yapılanma, metal olmayan yüzey fazları ve/veya daha düşük arayüzey reaktivitesi sağlayabilir. Böylece arayüzeyde meydana gelen kararlı bileşikler (veya silikatlar) devre elemanının elektriksel karakteristiklerinin de zamanla daha kararlı olmasını sağlar (Chilukuri and Balagia 1999).

Metal/yarıiletken, ikili alaşım/yarıiletken ve üçlü alaşım/yarıiletken Schottky diyotlardan oluşan üç grup diyodun yaşlanma zamanına bağlı elektriksel karakteristikleri incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda üçüncü grup üçlü alaşım/yarıiletken Schottky diyotların yaşlanma zamanı ile daha kararlı olduğu bu üçüncü grup diyotlar

içinde de AuAgCu(1:1:1)/n-Si/Ti Schottky diyodunun zamanla daha kararlı bir yapı sergilediği açıkça görülmüştür.



KAYNAKLAR

- Aboelfotoh, M. O., 1987. Schottky-barrier behavior of a Ti-W alloy on Si(100). *Journal of Applied Physics* 61(7), 2558-2565.
- Arızumı, T., Hirose, M., and Altaf, N., 1968. Au-Ag Alloy-Silicon Schottky Barriers. *Japanese Journal Of Applied Physics*, 7(8), 870-874.
- Aydın, M. E., Yakuphanoglu F., Öztürk G. 2010. Modification of electrical properties of the Au/1,1 dimethylferrocenecarboxylate/n-Si Schottky diode, *Synthetic Metals*, 160, 2186–2190
- Ayyıldız, E., and Türüt, A., 1999. The effect of thermal treatment on the characteristic parameters of Ni/-, Ti/- and NiTi alloy/n-GaAs Schottky diodes. *Solid-State Electronics* 43, 521-527.
- Ayyıldız, E., Türüt, A., and Tüzemen, S., 1999. Thermal stability of NiTi alloy contacts on n-type liquid encapsulated Czochralski GaAs. *Solid State Communications*, 110, 419–423.
- Babcock, S. E. and Tu, K. N. 1982. Titanium-tungsten contacts to Si: The effects of alloying on Schottky contact and on silicide formation. *Journal of Applied Physics*, 53(10), 6898-6905.
- Brillson, L. J., 1993. *Contacts to Semiconductors. Fundamentals and Technology*, 680, New York.
- Brillson, L.J., Brucker, C.F., Katnani, A.D., Stoffel, N.G., Daniels, R., Margaritondo, G. 1982. Fermi-level pinning and chemical structure of InP–metal interfaces. *Journal of Vacuum Science and Technology* 21, 564.
- Bohlin, K. E., 1986, Generalized Norde plot including determination of the ideality factor *J.Appl.Phys.*, 60 (3), 86
- Card, H.C., Rhoderick, E.H., 1973. The Effect of Interfacial Layer on Minority Carrier Injection in Forward Biased Silicon Schottky Diodes. *Solid-State Electron*, 16(3), 365- 374.
- Caferov, T., (2000), *Yarıiletken Elektroniği*, Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi, İstanbul.
- Ceylan, N., 2005. *Metal-Yalıtkan-Yarıiletken Yapıdaki Gözenekli Silisyum Güneş Pillerinin Elektriksel Karakteristikleri*. Yüksek Lisans Tezi, Muğla Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla.
- Cheung S. K., Cheung, N. W. 1986. Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics, *Applied Physics Letters*, 58, 382.
- Chilukuri, R. K., and Balagia, B. J., 1999. High Voltage Ni/4H-SiC Schottky Rectifiers. *North Carolina State University*, 161-164, USA
- Cowley, A. M., and Sze, S. M., 1965. Surface States and Barrier Height of Metal-Semiconductor Systems. *Journal of Applied Physics*, 36(10), 3212.
- Çağlar, Y., Çağlar, M., İlcan, S. 2018. XRD, SEM, XPS studies of Sb doped ZnO films and electrical properties of its based Schottky diodes. *Optik*, 164, 424-432.
- Duke, C. B., 1996. *Semiconductor Surface Reconstruction: The Structural Chemistry of Two-Dimensional Surface Compounds*. *Chemical Reviews*, 96(4), 1237–1260.
- Durmuş H., and Atav, U., 2011. Extraction of voltage-dependent series resistance from I-V characteristics of Schottky diodes. *Applied Physics Letters*, 99, 093505.

- Geppert D. V., Cowley A. M. and Dore B. V., 1966. Correlation of Metal-Semiconductor Barrier Height and Metal Work Function; Effects of Surface States. *Journal of Applied Physics* 37, 2458.
- Gümüş, A., Türüt, A., and Yalçın, N., 2002. Temperature dependent barrier characteristics of CrNiCo alloy Schottky contacts on n-type molecular-beam epitaxy GaAs. *Journal of Applied Physics*, 91(1), 245-250.
- Güzeldir, B., Sağlam, M., Ateş, A., and Türüt, A., 2011. Effects of ageing on the electrical characteristics of Cd/CdS/n-Si/Au-Sb structure deposited by SILAR method. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 72, 1506-1514.
- Hamdaoui, N., Ajjel, R., Salem, B., Gendry, M., 2014. Distribution of barrier heights in metal/n-InAlAs Schottky diodes from current-voltage-temperature measurements. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 26, 431-437.
- Hikita, Y., Kawamura, M., Bell, C. and Hwang, H. Y., 2011. Electric field penetration in Au/Nb:SrTiO₃ Schottky junctions probed by bias-dependent internal photoemission. *Applied Physics Letters* 98, 192103.
- Huang, T. S., and Jean, S. M., 1994. Characteristics of Ta and Ta-Al alloy Schottky contacts to n-GaAs. *Journal of Applied Physics*, 75(11), 7519-7525.
- Huang, T.S., and Pang J.G., 1997. Thermal stability of the Pd-Al alloy Schottky contacts to n-GaAs. *Materials Science and Engineering*, B49, 144-151.
- Iczkowsky, R. P., and Margrave, J. L., 1961 Electronegativity. *Journal of the American Chemical Society*, 83, 3547.
- Jun, C., Qingsong W., Jiabing L., Hengjing T., and Xue, L., 2015. Current-voltage-temperature and capacitance-voltage-temperature characteristics of TiW alloy/p-InP Schottky barrier diode. *Journal of Alloys and Compounds*, 649, 1220-1225.
- Kaminski, A., Marchand, J., and Laugier, A., 1991. I- V methods to extract junction parameters with special emphasis on low series resistance. *Solid-State Electronics*, 43, 741.
- Karataş, Ş. and Türüt, A., 2006. The determination of electronic and interface state density distributions of Au/n-type GaAs Schottky barrier diodes. *Physica B*, 381, 199-203.
- Mikhelashvili, V., Eisenstein, G., Garber, V., Fainleib, S., Bahir, G., Ritter, D., Orenstein, M. and Peer, A., 1999. On the extraction of linear and nonlinear physical parameters in nonideal diodes. *Journal of Applied Physics*, 85, 6873.
- Miura, N., Nanjo, T., Suita, M., Oishi, T., Abe, Y., Ozeki, T., Ishikawa, H., Egawa, T., Jimbo, T., 2004. Thermal annealing effects on Ni/Au based Schottky contacts on n-GaN and AlGaN/GaN with insertion of high work function metal. *Solid-State Electronics* 48, 689-695.
- Monch, W., 1990. *Electronic structure of metal-semiconductor contacts*. Kluwer Academic Publishers, 300, Dordrecht, London.
- Moormann, H., Kohl, D., and Heiland, G., 1979 Work function and band bending on clean cleaved zinc oxide surfaces. *Surface Science*, 80, 261-264.
- Muret, P. 1982. Capacitance spectroscopy of localized states at metal-semiconductor interfaces. II. Experiments about Ag, Au, and Ni on crystalline (111) Si surfaces. *J. Appl. Phys.*, 53, 6300
- Neamen, D. 1992. *Semiconductor Physics and Devices*, R. R. Donnelley & Sons Company, Sydney.

- Norde, H., 1979. A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 50, 5052-5054
- Okumura, T. and Tu, K. N. 1985. Tungsten-platinum alloy Schottky barriers on n-type GaAs. Citation: *Applied Physics Letters*, 47(1), 42-44
- Ortiz-Conde, A., Ma, Y., Thomson, J., Santos, E., Liou, J., Garsia Sanchez, F., Lei, M., Finol, J., and Layman, P., 1999. Direct extraction of semiconductor device parameters using lateral optimization Method. *Solid-State Electronics*, 43, 845.
- Perlman, S.S., 1969. Barrier height diminution in Schottky diodes due to electrostatic screening. *IEEE Transaction on Electron Devices*, 16, 450-454.
- Prietsch, M., 1995. Ballistic-electron emission microscopy (BEEM): studies of metal /semiconductor interfaces with nanometer resolution. *Physics Reports*, 253, 163-233.
- Rappe, A. K., and Goddard, W. A., 1991. Charge equilibration for molecular dynamics simulations. *Journal of Physical Chemistry*, 95(8), 3358.
- Reddy, V.R., 2014. Electrical properties and conduction mechanism of an organicmodified Au/NiPc/n-InP Schottky barrier diode. *Applied Physics A*, 116, 13791387.
- Rhoderick, E.H. and Williams, R.H. 1988. *Metal-Semiconductor Contacts*, 2nd Ed.(Clarendon, Oxford). 1-225.
- Sağlam, M., and Güzeldir, B., 2016. Time-dependent of characteristics of Cu/CuS/n-GaAs/In structure produced by SILAR Method. *Materials Research Bulletin*, 81, 55–62.
- Sağlam, M., Ateş, A., Güzeldir, B., Yıldırım, M.A. ve Astam, A., 2008. Calculation from the current–voltage and capacitance–voltage measurements of characteristics parameters of Cd/CdS/n-Si/Au–Sb structure with CdS interface layer grown on n-Si substrate by SILAR Method. *Microelectronic Engineering* 85, 1831–1835.
- Sağlam, M., Biber, M., Çakar, and M., Türot, A., 2004. The effects of the ageing on the characteristic parameters of polyaniline/p-type Si/Al structure. *Applied Surface Science*, 230, 404–410.
- Sağlam, M., Korucu, D., and Türot, A., 2004. The effects of the time-dependent on the characteristic parameters of polypyrrole/p-type Si/Al diode. *Polymer*, 45, 7335–7340.
- Schottky, W. 1938. The development of silicon crystal rectifiers for microwave radar receivers, *Z. Phys.*, 113, 367-414.
- Streetman, B. G., 1990. *Solid State Electronic Devices*. Prentice Hall Series in Solid State Physical Electronics, 200-205, USA.
- Sze, S. M., 1981. *Physics of Semiconductor Devices*, Wiley, 245, New York.
- Sze, S. M., Crowell, C. R., Kahng, D. 1964. Photoelectric Determination of the Image Force Dielectric Constant for Hot Electrons in Schottky Barriers, *J. Appl. Phys.*, 35, 2534-2542.
- Taşer, A., Güzeldir, B., and Sağlam, M., 2017. The stability of electrical characteristics of Ti/n-Si/Ag, Ti/n-Si/Cu and Ti/nSi/AgCu diodes prepared under the same conditions with respect to increasing aging time. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 68, 186–192.
- Tataroğlu, A., Altındal, Ş. 2007, Analysis of interface states and series resistance of MIS Schottky diodes using the current – voltage (I-V) characteristics, 167-931.
- Temirci, C., 2000. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi. Erzurum.

- Thompson, R., Eizenberg, M., and Tu, K. N., 1981. Schottky contacts of Gd-Pt and Gd-V alloys on n-Si and p-Si. *Journal of Applied Physics*, 52(11), 6763-6768
- Tung, R.T., Levi, A. F. J., Sullivan, J. P. and Schrey, F., 1991. Schottky-Barrier Inhomogeneity at Epitaxial NiSi₂ Interfaces on Si(100). *Physical Review Letters*, 66, 1.
- Türüt, A., Tüzemen, S., Yıldırım, M., Abay, B., Sağlam, M. 1992. Barrier height enhancement by annealing Cr-Ni-Co alloy Schottky contacts on LEC GaAs, *Solid-State. Electron*, 35, 1423-1426.
- Werner J., Levi A.F.J., Tung R.T., Anzlowar M., and Pinto M. (1988), Origin of the excess capacitance at intimate Schottky contacts, *Physical Review Letters*, 60(1), P.53.
- Winkler, R., and Pantelides, S., 1997. Charge transfer and dipole moments of polyatomic systems. *The Journal of Chemical Physics*, 106, 7714.
- Ye, M., Wang, X., and Xu, Y., 2009. Parameter extraction of solar cells using particle swarm optimization. *Journal of Applied Physics*, 105, 094502.
- Young, S.J., Chang, S.J., Ji, L.W., Meen, T.H., Hsiao, C.H., Liu, K.W., Chen, K.J., Hu, Z.S., 2011. Thermally stable Ir/n-ZnO Schottky diodes. *Microelectronic Engineering*, 88, 113-116.
- Zeghbrouck, B V., 2004. Metal Semiconductor Junctions. Colorado, https://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter3/ch3_5.htm
- Zhang, X., Zhai, J., Yu, X., Ding, L., Zhang, W., 2013. Fabrication and characterization of flexible Ag/ZnO Schottky diodes on polyimide substrates. *Thin Solid Films*, 548, 623-626.

ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Hatay’ın İskenderun ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini İskenderun’da tamamladı. 2002 yılında Atatürk Üniversitesi Kazım Kara Bekir Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliği bölümünü kazandı. 2007 yılında bu bölümden mezun oldu. Aynı yıl Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Katıhal Fiziği Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans yapmaya başladı. 2012 yılında Yüksek Lisans eğitimini tamamladı. 2013 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Katıhal Fiziği Ana Bilim Dalı’nda Doktora yapmaya başladı.