



**CuO ve NiO ARAYÜZEYLİ FOTODİYOTLARIN
ÜRETİMİ ve ELEKTRİKSEL
KARAKTERİZASYONU**

Gültekin ÇAĞLAR
Yüksek Lisans Tezi

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA
BİLİM DALI**

Danışman: Doç. Dr. Adem KOÇYİĞİT
2020

**T.C.
IĞDIR ÜNİVERSİTESİ**

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**CuO ve NiO ARAYÜZEYLİ FOTODİYOTLARIN ÜRETİMİ ve ELEKTRİKSEL
KARAKTERİZASYONU**

Gültekin ÇAĞLAR

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

IĞDIR

2020

Her hakkı saklıdır

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Gültekin ÇAĞLAR



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

ÖZET

CuO ve NiO ARAYÜZEYLİ FOTODİYOTLARIN ÜRETİMİ ve ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU

ÇAĞLAR, Gültekin

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Adem KOÇYİĞİT

Haziran 2020, 86 sayfa

Bu çalışmada Al/p-Si/CuO:Ni/Al ve Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyot yapıları, fotodiyot özellikleri, frekansa ve sıcaklığa bağlı karakteristiklerini incelemek üzere üretildi. Ara yüzey tabaka Ni katkılı CuO ve Cu katkılı NiO filmleri hem döndürmeli kaplama (sol-gel spin coating) hem de püskürtme (spray pyrolysis) metotları kullanılarak elde edildi. Üretilen ara yüzey tabakalarının XRD ve SEM cihazlarıyla yapısal özellikleri ve yüzey morfolojileri incelenerek analizleri yapıldı. Karanlıkta ve 30-40-60-100 mV/cm² aralığında farklı ışık şiddetleri altındaki I-V karakteristik ölçümleri alınarak grafikleri çizildi. Engel yüksekliği, idealite faktörü, kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre voltajı (V_{OC}), güneş pili verimi (η_p), dolgu faktörü (FF) ve maksimum güçteki akım (I_{max}) ile gerilim (V_{max}) değerleri hesaplandı. Işık şiddetleri altında alınan ölçümler incelendiğinde üretilen diyotların fotodiyot özellik gösterdikleri görüldü. Norde denklemleri kullanılarak engel yükseklikleri ile seri direnç (R_s) değerleri hesaplandı ve F(V)-V grafikleri çizilerek yorumlandı. 60K-320K aralığında farklı sıcaklık değerlerindeki I-V grafikleri çizilip tartışıldı ve sıcaklığa bağlı engel yüksekliği ile idealite faktörü değerleri hesaplanarak analiz edildi. Al/p-Si/CuO:Ni/Al ve Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyot yapılarının 320K'deki engel yüksekliği ile idealite faktörü değerleri sırasıyla 0,76 eV, 2,07 ve 0,76 eV, 1,82 olarak hesaplandı. Frekansa bağlı G-V, C-V, $1/C^2$ -V, R_i -V grafikleri çizilerek grafikleri tartışıldı. Ayrıca farklı frekans değerlerindeki N_{ss} , W_d , E_F , Φ_b ve R_s gibi parametreler hesaplanarak farklı frekans değerlerine karşı olan değişimleri yorumlandı. Sonuç olarak elde edilen aygıtlar hem fotodiyot hem de anahtarlama elemanlarında kullanılabilecekleri görüldü.

Anahtar kelimeler: Fotodiyot, Schottky diyot, Yarıiletken, spin coating, idealite faktörü

ABSTRACT

PRODUCTION AND ELEKTRICAL CHARACTERIZATION OF CuO AND NiO INTERLAYER PHOTODIODE

ÇAĞLAR, Gültekin

Master Thesis, Electric-Electronic Main Discipline

Thesis Adviser: Doç. Dr. Adem KOÇYİĞİT

June 2020, 86 pages

In this study, Al/p-Si/CuO:Ni/Al and Al/p-Si/NiO:Cu/Al diode structures, photodiode properties, frequency and temperature-dependent characteristics were investigated. Interfacial layer Ni-doped CuO and Cu-doped NiO films were obtained using both spin-coating and spray pyrolysis methods. The structural properties and surface morphologies of the produced interfacial layers with XRD and SEM devices were examined and analyzed. I-V characteristic measurements under different light intensities in the dark and in the range of 30-40-60-100 mV/cm² were taken and their graphics were drawn. The barrier height, ideality factor, short circuit current (I_{sc}), open circuit voltage (V_{OC}), solar cell efficiency (η_p), fill factor (FF) and maximum power current (I_{max}) and voltage (V_{max}) values were calculated. When the measurements taken under light intensities were examined, it was seen that the diodes produced showed photodiode properties. Using Norde equations, barrier heights and series resistance (R_s) values were calculated and interpreted by drawing F(V)-V graphs. I-V graphics at different temperatures in the range of 60K-320K were drawn and discussed. temperature dependent barrier height and ideality factor values were analyzed. The 320K barrier height values and ideal factor values of diodes Al/p-Si/CuO:Ni/Al and Al/p-Si/NiO:Cu/Al were calculated as 0,76V, 2,07 and 0,76V, 1,82 respectively. Frequency dependent G-V, C-V, 1/C²-V, Ri-V graphics were drawn and their graphics were discussed. In addition, parameters such as N_{ss} , W_d , E_F , Φ_b and R_s at different frequency values were calculated and their changes against different frequency values were interpreted. According to the result, it was seen that the devices can be used in both photodiode and switching devices.

Key words: Photodiode, Schottky diode, Semiconductor, spin coating, ideality factor

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi olarak hazırladığım bu çalışmanın deneyleri, Iğdır Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Araştırma ve uygulama laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarım süresince bilimsel anlamda danıştığım, destek aldığım danışman hocam Sayın Doç. Dr. Adem KOÇYİĞİT'e teşekkür ederim. Iğdır Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim elemanlarına teşekkür ederim.

DeneySEL ve teorik bilgisi yönünden faydalandığım, I-V,C-V,G-V gibi data ölçümleri için yardımlarını esirgemeyen Bingöl Üniversitesin'den Sayın Doç. Dr. İKRAM ORAK' teşekkür ederim.

Ayrıca Yüksek Lisans boyunca bana karşı desteklerini esirgemeyen; anneme, babama ve eşime gösterdikleri anlayış ve fedakârlıklar için çok teşekkür ederim.

Gültekin ÇAĞLAR

Haziran, 2020

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viv
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1.GİRİŞ	1
2.KAYNAK ÖZETLERİ	3
2.1.Yarı İletken Malzemeler	3
2.1.1. Katkısız yarıiletkenler.....	5
2.1.2. Katkılı yarıiletkenler.....	6
2.1.2.a. n-tipi yarıiletkenler.....	7
2.1.2.b. p-tipi yarıiletkenler	8
2.2. Fermi Enerji Seviyesi.....	9
2.3. Yarıiletkenlerde Elektriksel Özellikler	11
2.3.1. Katkısız yarıiletkenlerin taşıyıcı yoğunluğu	11
2.3.2. Katkılı yarıiletkenlerin taşıyıcı yoğunluğu	12
2.4. Metal-Yarıiletken Kontaklar	14
2.4.1. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontaklar	15
2.4.2. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontaklar	20
2.4.3. Metal/n-tipi yarıiletken/metal yapısı	22
2.4.4. Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontaklar	23
2.4.5. Metal/p-tipi yarıiletken omik kontaklar	26
2.4.6. Metal/p-tipi yarıiletken/metal yapısı	27
2.5. Termoiyonik Emisyon Modeliyle Schottky Diyotta Akım İletimi.....	28
2.6. Fotodiyot.....	31

3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	34
3.1. Kullanılan Malzemeler ve Temizlik Prosedürü.....	34
3.2. Çözelti Hazırlama İşlemleri.....	34
3.2.1. %5 Nikel (Ni) katkılı CuO çözeltisinin hazırlanışı.....	35
3.2.2. %5 Bakır (Cu) katkılı NiO çözeltisinin hazırlanışı.....	36
3.3. Omik Kontak Yapılışı	38
3.4. Filmlerin Altlık Yüzeylerine Büyütülmesi.....	38
3.4.1. Döndürmeli kaplama yöntemiyle ince film yapılması.....	39
3.4.2. Püskürtme yöntemi ile ince film yapılması	40
3.5. Schottky Diyotların Elde Edilmesi ve Elektriksel Ölçümlerinin Alınması.....	41
3.6. Karakterizasyon Yöntemler.....	42
3.6.1. X Işını Kırınımı (XRD)	42
3.6.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	42
3.6.3. Elektriksel Ölçümler.....	43
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	44
4.1. XRD Ölçümleri ve Analizler.....	44
4.2. SEM Görüntüleri	46
4.2.1. %5 Ni katkılı CuO ile hazırlanan ince filmlerin SEM görüntüleri	46
4.2.2. %5 Cu katkılı NiO ile hazırlanan ince filmlerin SEM görüntüleri	47
4.3. Üretilen Schottky Diyotların Akım-Gerilim Grafikleri ve Schottky Diyot Parametrelerinin Hesaplanması.....	49
4.3.1. Fotovoltaik Ölçümler.....	57
4.3.2. Sıcaklığa bağlı değişimler.....	62
4.3.3. Frekansa bağlı kapasite-gerilim (C-V) değişimleri.....	66
4.3.4. Frekansa bağlı kondüktans-gerilim (G-V) değişimleri.....	67
4.3.5. Frekansa bağlı $1/C^2$ değişimleri.....	69
4.3.6. Frekansa bağlı direnç-voltaj (R_f -V) değişimleri	75
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	77
KAYNAKLAR	80
ÖZGEÇMİŞ.....	87

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A	Diyot kontak alanı
A*	Richardson sabiti
E_a	Alıcı enerji seviyesi (eV)
E_c	İletim bandı min. Enerji seviyesi (eV)
E_d	Verici enerji seviyesi (eV)
E_g	Yasak enerji aralığı (eV)
E_f	Fermi enerji seviyesi (eV)
E_v	Değerlik bandı en yüksek enerji seviyesi (eV)
e⁻	Elektron yükü
eV	Elektron volt
g_e(E)	Elektron durum yoğunluğu
g_h(E)	Oyuk durum yoğunluğu
h⁺	Boşluk
I	Akım (A)
I₀	Ters doyma akımı (A)
I_m	Maksimum güçteki akım (A)
I_{sc}	Kısa devre akımı (A)
J	Akım yoğunluğu (A/cm ²)
k	Boltzman sabiti
m_e	Elektronların etkin kütlesi
m_h	Oyukların etkin kütlesi
N_{ss}	Arayüzey durum yoğunluğu
n	İdealite faktörü
P	Güç (Watt)
R_i	İletken direnci (ohm)

R_s	Seri direnç (ohm)
RR	Doğrultma oranı
T	Mutlak sıcaklık (K)
V	Gerilim
V_d	Yarıiletken tarafındaki engel potansiyeli
V_m	Maksimum güçteki gerilim
V_{oc}	Açık devre voltajı
Φ_B	Metal tarafındaki engel yüksekliği (eV)
Φ_b	Engel yüksekliği (eV)
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu (eV)
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu (eV)
η_p	Işığa karşı duyarlılık/verim
W_d	Tüketim bölgesi kalınlığı

Kısaltmalar

$C-V$	Kapasite-Gerilim
CuO	Bakır Oksit
DEA	Dietanolamin
FF	Dolgu faktörü
$G-V$	Kondüktans-Gerilim
$I-V$	Akım-Gerilim
$J-V$	Akım yoğunluğu-Gerilim
MIS	Metal-Yalıtkan-Yarıiletken
MOS	Metal-Oksit-Yarıiletken
MS	Metal-Yarıiletken
NiO	Nikel-Oksit
R_i-V	İletken direnci-Gerilim

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 2.1. Bant diyagramının şematik gösterimi.....	4
Şekil 2.2. Yalıtkanlar, yarıiletkenler ve iletkenler için enerji bant aralığı değişimi.....	4
Şekil 2.3. Yarıiletkenin enerji-bant yapısı a) Katkısız saf yarıiletkenin $T=0$ K sıcaklıktaki bant yapısı. b) , $T>0$ K sıcaklıkta katkısız saf yarıiletken bant yapısı.....	6
Şekil 2.4. a) n-tipi yarıiletkenin kovalent bağ oluşumu b) n-tipi yarıiletkenin bant yapısı.....	8
Şekil 2.5. a) p-tipi yarıiletkenin kovalent bağ oluşumu b) p-tipi yarıiletken bant yapısı.....	9
Şekil 2.6. Fermi dağılım fonksiyonu (Streetman and Banerjee, 2014).....	10
Şekil 2.7. Enerji durum yoğunluğu fonksiyonu (Sarı, 2008).....	11
Şekil 2.8. n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerde elektron-oyuk konsantrasyonu ve fermi seviyesi (Colinge and Colinge, 2011).....	13
Şekil 2.9. $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda metal ile n-tipi yarıiletkenin enerji bant diyagramı a) Kontak yapılmadan önceki gösterimleri b) Kontak yapıldıktan sonra ve termal denge durumunda (Ayhan, 2012).....	16
Şekil 2.10. Termal denge durumunda Metal ile n-tipi yarıiletken kontak durumu.....	18
Şekil 2.11. Doğrultucu metal ile n-tipi yarıiletken kontakta enerji-bant gösterimi a) düz besleme durumunda, b) ters besleme durumunda.....	19
Şekil 2.12. Metal ile n-tipi yarıiletkenin ($\Phi_m < \Phi_s$) olması durumunda enerji diyagramı a) Ayır ayrı durumdayken b) Termal denge durumundayken c) Ters besleme d) Doğru besleme (Kaya,2010).....	20
Şekil 2.13. Metal-n-tipi yarıiletken-metal yapısı enerji-bant diyagramı (Göksu, 2013)	23
Şekil 2.14. Metal-p tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji bant diyagramı a) Kontakta önce b) Kontakta sonra c) $V>0$ ve $V<0$ durumlarında (Canlı,2018a).....	24
Şekil 2.15. Metal-p tipi yarıiletken omik kontağın enerji/bant diyagramı a) Kontakta önce b) kontakta sonra ve termal dengede c) $V \neq 0$ (pozitif ve negatif besleme) olması durumlarında (Boy,2013).....	26
Şekil 2.16. Metal/p-tipi yarıiletken/metal yapısının termal dengede enerji bant diyagramı (Çetinkaya, 2011).....	28
Şekil 2.17. Doğru besleme altındaki bir Schottky diyotun imaj azalmasına ait enerji-bant diyagramı (Canlı, 2018b).....	29
Şekil 2.18. Yarıiletken diyodun ters polarlama ve doğru polarlama karakteristiği.....	32

Şekil 3.1. p-tipi silisyum (Si) kristali ile cam altlık temizleme ve kurutma işlemleri.....	34
Şekil 3.2. CuO çözelti oluşumu (400 d/dk hızda ve 60 °C sıcaklıkta).....	35
Şekil 3.3. %5 Ni için NiO çözelti oluşumu (400 d/dk hızda ve 60 °C sıcaklıkta).....	36
Şekil 3.4. CuO:Ni Çözeltisine damla damla dietanolamin (DEA) damlatılması.....	36
Şekil 3.5. %5 Ni katkılı CuO çözeltisine DEA damlatıldıktan sonraki son hali.....	37
Şekil 3.6. Döndürme kaplama yöntemi ile %5 Ni katkılı CuO ve %5 Cu katkılı NiO ara yüzeyli ince filmlerin yapılışı.....	39
Şekil 3.7. Döndürme kaplama yöntemi ile ince filmleri yapılan numunelerin 150 °C sıcaklıktaki fırında kurutulması.....	40
Şekil 3.8. Püskürtme yöntemi ile %5 Ni katkılı CuO ve %5 Cu katkılı NiO ara yüzeyli ince filmlerin yapılışı.....	41
Şekil 3.9. a) Al/p-Si/CuO:Ni/Al diyot b) Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyotun şematik gösterimleri.....	42
Şekil 4.1. 550°C’de tavllanmış CuO:Ni filmlerin XRD ölçümleri.....	44
Şekil 4.2. 550°C’de tavllanmış NiO:Cu filmlerin XRD ölçümleri.....	45
Şekil 4.3. Döndürmeli kaplama yöntemiyle elde edilen CuO:Ni filmlerinin çeşitli büyütme oranlarında SEM görüntüleri.....	47
Şekil 4.4. Püskürtme yöntemiyle elde edilen CuO:Ni filmlerinin çeşitli büyütme oranlarında SEM görüntüleri.....	47
Şekil 4.5. Döndürmeli kaplama yöntemiyle elde edilen NiO:Cu filmlerinin çeşitli büyütme oranlarında SEM görüntüleri.....	48
Şekil 4.6. Püskürtme yöntemiyle elde edilen NiO:Cu filmlerinin çeşitli büyütme oranlarında SEM görüntüleri.....	48
Şekil 4.7. Döndürme kaplama yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky diyot yapısının oda sıcaklığında ve karanlık ortamdaki I-V grafiği.....	49
Şekil 4.8. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky diyot yapısının oda sıcaklığında ve karanlık ortamdaki I-V grafiği.....	50
Şekil 4.9. Döndürme kaplama yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapısının oda sıcaklığında ve karanlık ortamdaki I-V grafiği.....	51
Şekil 4.10. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapısının oda sıcaklığında ve karanlık ortamdaki I-V grafiği.....	52
Şekil 4.11. Farklı yöntemler ile ince filmleri yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al diyotun F(V)-V grafiği a) Döndürme kaplama yöntemi ile b) Püskürtme yöntemi ile.....	55
Şekil 4.12. Farklı yöntemler ile ince filmleri yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyotun	

F(V)-V grafiği a) Döndürme kaplama yöntemi ile b) Püskürtme yöntemi ile.....	55
Şekil 4.13. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky diyot yapısının karanlık ortam ve değişik ışık şiddetleri altındaki I-V grafiği.....	58
Şekil 4.14. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapısının karanlık ortam ve değişik ışık şiddetleri altındaki I-V grafiği.....	58
Şekil 4.15. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky diyot yapısının 100 mW ışık şiddeti altındaki J-V grafiği	60
Şekil 4.16. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapısının 100 mW ışık şiddeti altındaki J-V grafiği	61
Şekil 4.17. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky yapısının karanlık ortamda 60K-320K sıcaklık aralığındaki I-V grafiği.....	62
Şekil 4.18. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapısının karanlık ortamda 60K-320K aralığındaki I-V grafiği.....	63
Şekil 4.19. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky diyot yapısının oda sıcaklığı ve karanlık ortamda frekansa bağlı C-V grafiği a) 1kHz-500kHz frekans aralığında b) 700kHz-5000kHz frekans aralığında.....	66
Şekil 4.20. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapısının oda sıcaklığı ve karanlık ortamda frekansa bağlı C-V grafiği a) 1kHz-500kHz frekans aralığında b) 700kHz-5000kHz frekans aralığında.....	67
Şekil 4.21. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky diyot yapısının oda sıcaklığı ve karanlık ortamda frekansa bağlı G-V grafiği a) 10kHz-500kHz frekans aralığında b) 700kHz-5000kHz frekans aralığında.....	68
Şekil 4.22. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapısının oda sıcaklığı ve karanlık ortamda frekansa bağlı G-V grafiği a) 1kHz-500kHz frekans aralığında b) 700kHz-5000kHz frekans aralığında.....	68
Şekil 4.23. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky diyot yapısının oda sıcaklığı ve karanlık ortamda frekansa bağlı $1/C^2$ -V grafiği a) 1kHz-500kHz frekans aralığında b) 700kHz-5000kHz frekans aralığında.....	69
Şekil 4.24. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapısının oda sıcaklığı ve karanlık ortamda frekansa bağlı $1/C^2$ -V grafiği a) 1kHz-500kHz frekans aralığında b) 700kHz-5000kHz frekans aralığında.....	70
Şekil 4.25. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky diyot yapısının oda sıcaklığı ve karanlık ortamda frekansa bağlı R_i -V grafiği a) 1kHz-500kHz frekans aralığında b) 700kHz-5000kHz frekans aralığında.....	75
Şekil 4.26. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapısının oda sıcaklığı ve karanlık ortamda frekansa bağlı R_i -V grafiği a) 1kHz-500kHz frekans aralığında b) 700kHz-5000kHz frekans aralığında.....	76

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 4.1: p-Si/CuO:Ni Schottky diyot için farklı pik değerlerine karşı gelen açıl değerleri.....	45
Çizelge 4.2: p-Si/NiO:Cu Schottky diyot için farklı pik değerlerine karşı gelen açıl değerleri	46
Çizelge 4.3: Al/p-Si/CuO:Ni/Al ve Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapılarının üretim yöntemi, idealite faktörü ve engel yükseklik değerleri.....	54
Çizelge 4.4: Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky diyot yapısının 30-100 mW/cm ² ışık şiddeti aralığında lnI-V grafiğinden çıkarılan I_{sc} , I_{max} , V_{oc} , V_{max} , ışığa karşı duyarlılık (η_p) ve dolgu faktörü (FF) değerleri.....	59
Çizelge 4.5: Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapısının 30-100 mV/cm ² ışık şiddeti aralığında I-V grafiğinden çıkarılan I_{sc} , I_{max} , V_{oc} , V_{max} , ışığa karşı duyarlılık (η_p) ve dolgu faktörü (FF) değerleri.....	61
Çizelge 4.6: Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky diyot yapısının farklı sıcaklık değerlerindeki idealite faktörü, engel yüksekliği ve doyma akımı değerleri.....	64
Çizelge 4.7: Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapısının farklı sıcaklık değerlerindeki idealite faktörü, engel yüksekliği ve doyma akımı değerleri.....	65
Çizelge 4.8: Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky diyot yapısının 700kHz-5000kHz frekans aralığında C-V ölçümlerinden elde edilen bazı deneysel parametreler.....	71
Çizelge 4.9: Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapısının 700kHz-5000kHz frekans aralığında C-V ölçümlerinden elde edilen bazı deneysel parametreler.....	72

1. GİRİŞ

Metal ile yarıiletken arasında kontak yapılarak oluşturulan diyotlarda ilk doğrultma olayı 1874 yılında F. Braun tarafından keşfedilmiş ancak ilk ispatı Schottky ve Mott tarafından 1938 yılında yapılmıştır (Aydoğan, 2011). Metal-yarıiletken kontaklar arasındaki bir engelin oluşumu ile ilgili modeli ilk Walter H. Schottky geliştirdiğinden dolayı oluşturulan bu tür diyotlara Schottky diyotlar denilmektedir. Daha sonraki yıllarda metal-yarıiletken, metal-yalıtkan-yarıiletken ve metal-metal oksit-yarıiletken kontaklar optoelektronik teknolojisinde ve yarıiletken teknolojisinde sıklıkla kullanılmaya başlamıştır. Bu konuda yapılan çalışmalar incelendiğinde ara yüzey tabaka olarak kullanılan yalıtkan veya metal oksit tabakanın ince film olarak üretimi için çeşitli yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir. (Alshahrie *et al.*, 2016a; Daoudi *et al.*, 2019; Moumen *et al.*, 2019). Genel olarak; spin coating (döndürme-kaplama), kimyasal buhar depolama (CVD), yüzeye iyon bombardımanı, spreyci (püskürtme), elektrokimyasal tortulaşma (ECD), fiziksel buhar kaplama (PVD), SILAR gibi birçok kimyasal ve fiziksel yöntemin kullanıldığı görülmektedir. (Alshahrie *et al.*, 2016b; Das *et al.*, 2018; Muiva *et al.*, 2016). Kullanılan bu yöntemler arasında döndürme kaplama ve püskürtme yöntemleri diğer tekniklere kıyasla saf ve homojen kaplama yapabilme, basit ve ekonomik olması, geniş yüzeye uygulanabilmesi ve ince filmin yüzey yapısının kontrol edilmesi gibi nedenlerden dolayı kullanımları öne çıkmaktadır. Döndürme-kaplama yönteminde farklı olarak düşük sıcaklıklarda kristalleşme sağlanabilmektedir (Polat, 2009). Ayrıca Bu kaplama tekniğinin avantajları arasında; ayarlanabilir biriktirme hızı, yüksek oksijen basıncında üretim, yönlendirilmiş filmlerin büyümesi ve ayarlanabilir bir alt sıcaklık bulunmaktadır (Baturay *et al.*, 2019a).

Bir metal oksit olarak CuO' nun doğada bol miktarda bulunabilirliği sebebiyle düşük maliyetli olması ve yoğun güneş emilimi sebebiyle dikkat çekmekle birlikte gaz sensörleri, piller, kataliz, yarıiletken fotovoltaiik hücreler, alan emisyonu ve fotokatalitik reaksiyonlar gibi uygulamalar için CuO, karlı ve umut veren bir nano malzeme haline getirebildiği bildirilmiştir (Chtouki *et al.*, 2019).

CuO, (1,2-1,9 eV) aralığında dar bir bant boşluğuna sahip önemli bir monoklinik yarı iletken, güneş pili ve sensör teknolojisinde kullanılan önemli bir adaydır

(Baturay *et al.*, 2019b). Ayrıca CuO, p-tipi bir yarıiletken malzeme olup bununla ilgili araştırmacılar tarafından dünya çapında araştırmalar sürdürülmektedir (Jayakrishnan *et al.*, 2016).

Yarıiletken teknolojisinde dikkat çekenlerden biri de NiO yarıiletkenidir. NiO zehirli olmayan, kimyasal olarak kararlı, düşük maliyetli, doğada bolca bulunan ve üretimi kolay olan bir malzemedir. Metal oksit filmlerde NiO, manyetik ve termoelektrik davranışın özel etkileri nedeniyle son dönemlerde büyük önem kazanmış 3,6-4 eV bant aralığına sahip p-tipi bir yarı iletken olup oda sıcaklığında yalıtkan gibi davranır (Ganesh *et al.*, 2019).

Bu çalışmada püskürtme ve döndürme kaplama yöntemlerini kullanarak Al/p-Si/NiO:Cu/Al ve Al/p-Si/CuO:Ni/Al aygıtları elde edilmiş ve bu aygıtların ara yüzey tabakalarının yapısal ve morfolojik olarak, aygıtların kendilerinin ise elektriksel özelliklerinin sıcaklığa ve frekansa bağlı olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Ara yüzey malzemesi olarak kullanılan Cu katkılı NiO ve Ni katkılı CuO metal oksit davranışları ile ve kullanılan farklı yöntemlere bağlı olarak üretilen aygıtların özellikleri araştırılmıştır. Üretimi yapılan diyotların farklı sıcaklık, farklı frekans, karanlık ortam, farklı ışık şiddetleri altındaki davranışları ile tek tek bu değişkenlere bağlı olarak elektriksel özellikleri incelenmiştir. Dahası ışık şiddetine bağlı olarak akım-gerilim (I-V), akım yoğunluğu-gerilim (J-V), kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre voltajı (V_{OC}), güneş pili verimi (η_p), dolgu faktörü (FF), maksimum güçteki I_{max} ile V_{max} değişimleri çalışılmıştır. Sıcaklık artışına bağlı olarak engel yüksekliği (Φ_b) ile idealite faktörü (n) değerlerinin değişimi incelenerek karşılaştırılması yapılmıştır. Farklı frekans değerlerindeki ara yüzey durum yoğunluğu (N_{ss}), tüketim bölgesi kalınlığı (W_d), fermi enerji seviyesi (E_F), difüzyon potansiyeli (V_d), potansiyel engel yüksekliği (Φ_b) ve seri direnç (R_s) gibi parametreler hesaplanarak farklı frekans değerlerindeki değişimlerinin bulunması hedeflenmiştir. Bu verilerden fiziksel olarak en iyi özelliklere sahip fotodiyot yapısının belirlenmesi üzerine çalışılmıştır.

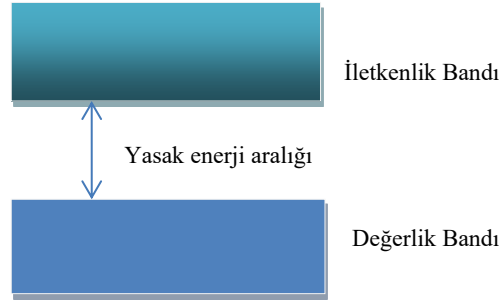
2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 Yarı İletken Malzemeler

Doğada malzemeler, yalıtkan, iletken ve yarıiletken halde bulunurlar. Yarıiletken malzemeler normalde yalıtkan halde bulunurlar fakat ısı, ışık ve çeşitli kimyasal metotlar yardımıyla iletkenlik özelliği kazanırlar. Günümüzde yarıiletken teknolojisine çok büyük önem verilmekte, elektronik teknolojisinde de bu önem artarak devam etmektedir. Yarıiletken malzemeler, iletkenliklerine göre yalıtkan ile iletken malzemeler arasında bulunduklarından dolayı teknolojik olarak kullanılabilirliği sebebiyle yeterli ilgiyi üzerine çekmektedir. Bu sebeple elektronik endüstrisinde çok çeşit yarıiletken malzeme kullanılmaktadır.

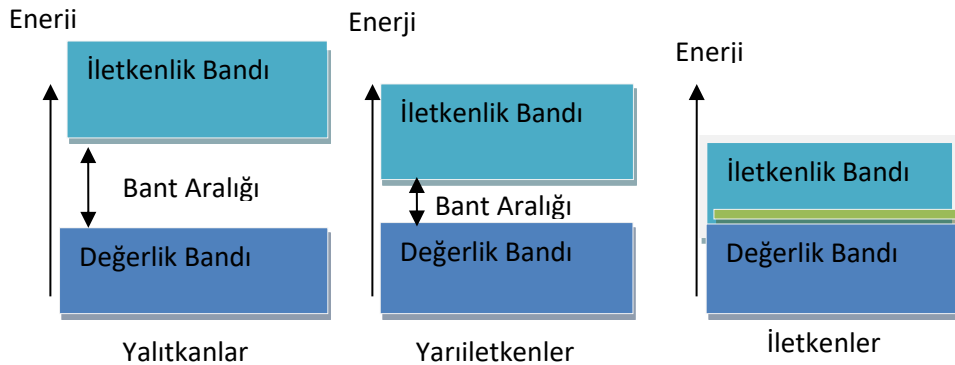
Yarıiletken malzemelerin özdirençleri oda sıcaklığında genel olarak 10^{-2} ile 10^9 Ω -cm arasında bulunurlar. Yarı iletken malzemelerin elektriksel özellikleri, ışık, ısı, optik, katkılandırma uygulaması gibi yöntemlerle değiştirilebilir. Bu malzemeler ile transistör, diyot, anahtar gibi pek çok elektronik devre elemanı yapılabilir. (Uzun, 2012a)

İzoleli bir atomda elektronlar kesik enerji seviyesinde bulunurlar. Bir tek atomda belirli sayıda enerji seviyesi mevcut iken birden fazla atom bir araya gelip katı bir hal oluşturduklarında bu durum geçerli değildir. Birden fazla atom bir araya gelerek kristal bir yapı oluşturduklarında, belirli sayıda enerji seviyesine sahip olan bu tek atomlar, birçok enerji seviyesi oluştururlar. Oluşan bu enerji seviyelerinden birbirine çok yakın olanlar enerji bantları oluştururlar. $T=0$ K'de son enerji seviyesi elektronlar tarafından doldurulmuş ise buna değerlik bandı enerji seviyesi denir. Aynı şekilde $T=0$ K'de ilk enerji seviyesi elektronlar tarafından doldurulmamış banda ise iletim bandı enerji seviyesi denir. Değerlik bandı enerji seviyesi ile iletim bandı enerji seviyesi arasındaki farka ise yasak enerji aralığı veya bant aralığı denilmektedir (Göktaş, 2018a). Bahsedilen bantların şematik gösterimi Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Bant diyagramının şematik gösterimi

İletkenlerde iletkenlik bandı ile değerlik bandı bitişik gibidir ve yasak enerji aralığı yoktur. Bu yüzden verilen en ufak bir enerji ile değerlik durumundaki pek çok elektronu serbest hale geçer. Yarıiletkenlerde iletkenlik bandı ile değerlik bandı arasında bir miktar yasak enerji aralığı bulunmaktadır. Arada bulunan yasak enerji farkı kadar değerlik elektronlarına enerji verildiği takdirde iletkenlik bandına geçer ve iletken haline gelirler. Yalıtkanlarda ise iletkenlik bandı ile değerlik bandı arasındaki fark oldukça fazladır. Bu yüzden elektronları değerlik bandından iletkenlik bandına geçirebilmek için aradaki yasak enerji aralığı farkı kadar bir enerji uygulamak gerekmektedir. Özetle iletkenlerde enerji bantları arasında fark yokken yalıtkanlara doğru gidildikçe enerji bantları arasındaki fark artmaktadır. Bu durumda yalıtkan bir malzemeyi iletken hale getirebilmek için çok fazla enerji vermek gerekir. Yalıtkanlar, yarıiletkenler ve iletkenler için enerji bant aralığı değişimleri Şekil 2.2’de ayrı ayrı verilmiştir.



Şekil 2.2. Yalıtkanlar, yarıiletkenler ve iletkenler için enerji bant aralığı değişimi

Genel olarak yarı iletkenlerden en çok germanyum (Ge) ile silisyum (Si) bilinir. Ancak ikili, üçlü veya çeşitli elementlerin birleşmesinden birçok yarı iletken malzeme elde edilebilmektedir. Örneğin; CuO (Bakır Oksit), NiO (Nikel Oksit) gibi birer metal oksit yarıiletkendir.

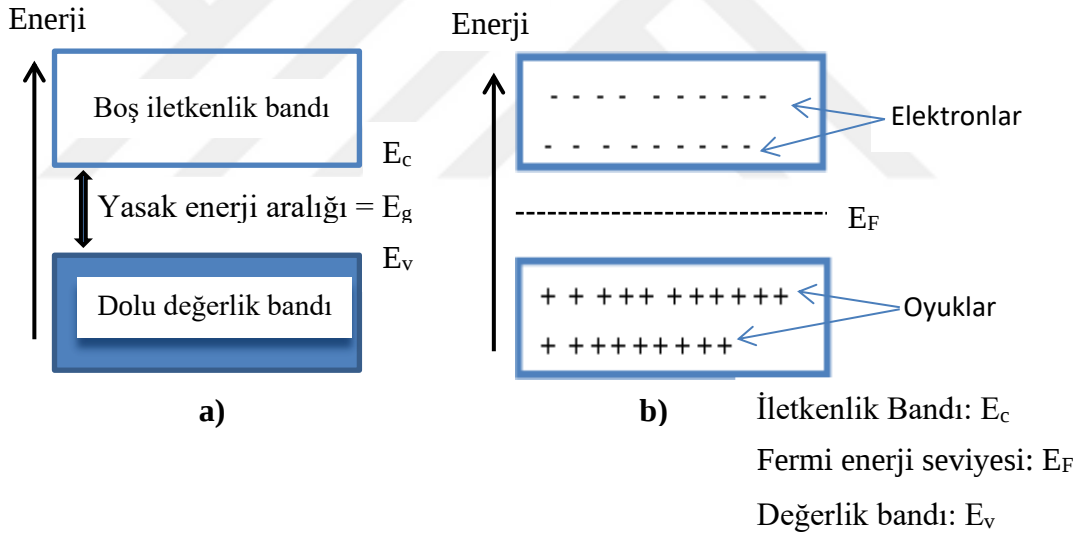
Malzemelerin iletkenliği sahip olunan serbest elektron sayısı ve bu serbest elektronların mobilitesine bağlıdır. Yılmaz and Gölcür (2014), iletkenlik ve mobilite üzerine çalışma yaparak sıcaklık mobilite ilişkisinin değişimlerine bağlı olarak nötral verici safsızlığı, iyonize safsızlığı ve akustik fonon saçılmalarının belirli sıcaklık aralıklarında etkin olduklarını göstermiştir.

Metallerde serbest elektron sayısı fazla olduğundan genel olarak iletkenlerdir. Yarıiletkenlerin iletkenlere göre değerlik yörüngeleri daha fazla dolu olduklarından dolayı atomlar arasındaki bağlar daha kuvvetlidir. Bu bağı koparabilmek için bir enerji uygulamak gerekir. Yani değerlik bandından iletim bandına bir elektron çıkarabilmek için değerlik bandı ile iletim bandı arasındaki bant aralığı enerjisinden daha büyük bir enerji vermek gerekir. Silisyum enerji bant aralığı 1,1 eV iken germanyumun enerji bant aralığı 0,7 eV'tur. Yalıtkanlarda ise değerlik yörüngesindeki elektronlar arasındaki bağlar çok kuvvetli olduklarından dolayı bu bağları koparmak zordur bu nedenle iletimi sağlayacak serbest elektronlar bulunmamaktadır (Göktaş, 2018b). Yarıiletkenler çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir, ancak taşıyıcı oranına göre katkısız (öz) yarıiletkenler ve katkı yarıiletkenler olarak ikiye ayrılırlar. Katkı yarıiletkenler ise kendi aralarında katkı tipine göre n-tipi ve p-tipi katkı yarıiletkenler olarak ikiye ayrılmaktadırlar (Yazıcı, 2007).

2.1.1. Katkısız yarıiletkenler

Malzemelerin elektrik iletkenlikleri bant yapılarıyla ilgilidir. Malzemeler iletim bantları tamamen boş olduğunda veya değerlik bandı tamamen dolu olduğu zaman yalıtkan özellik gösterirler. Bu durumda elektrik alan uygulandığında mevcut değerlik bant içerisinde oyuklar veya iletim bandında elektronlar bulunmadığı için elektronlar malzeme içerisinde serbest hareket edemezler. $T=0$ K sıcaklıkta saf bir yarıiletken malzemenin iletim bandı boş olup, değerlik bandı ile aralarında yasak enerji aralığı (bant aralığı) olacak şekilde ayrılmıştır ve saf haldeki bu yarıiletken yalıtkan özellik gösterir. Sıcaklık yavaş yavaş artırıldığında değerlik bandındaki elektronların ısı

enerjileri artar. Enerjileri artan bu elektronların ısı enerjileri yasak enerji seviyesine ulaştığında değerlik bandından iletim bandına elektronlar geçer. Değerlik bandından iletim bandına elektronlar geçtiği için değerlik bandındaki elektronların yerlerinde oyuklar oluşur. Değerlik bandındaki diğer elektronlar bu oyukları doldurmaya başlarlar. Bu oyuklar doldurulurken aynı enerji bandındaki oyukları dolduran mevcut elektron yerlerinde oyuklar oluşmaya başlar ve böylelikle kopan elektron yerlerinde oyuklar oluştuğu için sanki bir oyuk hareketiymiş gibi görünür. Kopan bu hareketli elektronlar negatif yük taşıyıcılarıdır. Şekil 2.3.b’de görüldüğü üzere değerlik bandında kopan elektronların yerine pozitif yüklü oyuklar oluşur. Değerlik bandında oluşan bu pozitif yüklü oyuklar iletkenliğe katkıda bulunur ve sıcaklık arttıkça değerlik bandında kopan elektron sayısı artacağı için değerlik bandındaki oyukların sayısının da artacağı açıktır (Ayhan, 2012). Bu tip yarıiletkenler katkısız (saf) yarıiletkenler olarak adlandırılırlar.



Şekil 2.3. Yarıiletkenin enerji-bant yapısı **a)** Katkısız saf yarıiletkenin $T=0$ K sıcaklığındaki bant yapısı. **b)** $T>0$ K sıcaklıkta katkısız saf yarıiletken bant yapısı

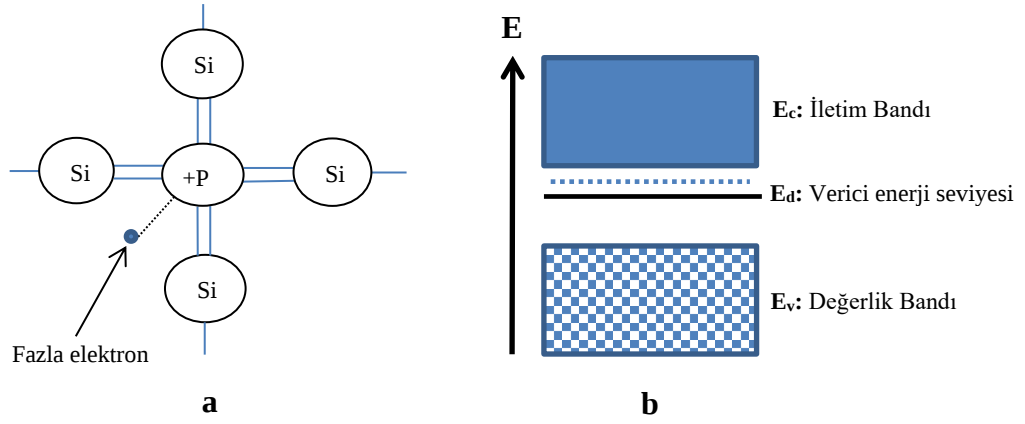
2.1.2.Katkılı yarıiletkenler

Katkılı yarıiletkenler saf yarıiletken içerisine katkı maddesi eklenerek oluşturulurlar. Eklenen malzeme çeşidine göre p-tipi yarı iletken veya n-tipi yarı iletken malzeme elde edilir. Burada akım taşıyıcı rolünü yarıiletkenin tipine göre elektronlar veya oyuklar üstlenirler. Oluşan katkılı yarıiletken malzemede elektron veya oyukların sayısı iletkenliğin ölçüsünü belirler. Saf yarıiletken içerisine madde eklenerek katkılı

yarıiletken malzeme elde etme işlemine doping işlemi denir. Katkılı yarıiletken malzemede iletkenlik kontrollü olarak artırılır. Örneğin saf yarı iletken malzemelerden silisyum elementinin atom numarası 14'tür dolayısıyla 4 değerlikli bir elementtir. Atomları kararlı hale gelebilmek için son yörüngesindeki elektron sayısını 8'e tamamlamak isterler. Bu durumda başka bir element ile son yörüngesindeki elektronları ortak kullanarak kovalent bağ oluşturup kararlı hale gelmek isterler. Yarıiletken elementler ortak elektronları kullanarak kararlı bir bağ yapısı oluştururlar ve eklenen maddenin çeşidine göre farklı katkılı yarıiletken malzemeler üretilmiş olur. Aşağıda katkılı yarıiletken tipleri ele alınmıştır.

2.1.2.a. n-tipi yarıiletkenler

Son yörüngesinde 5 elektron bulunduran V. grup elementlerinden antimon veya fosfat gibi elementler ile son yörüngesinde 4 elektron bulunduran silisyum (Si) veya germanyum (Ge) gibi saf yarıiletken elementlere katkılандığında 4 elektronu ortak Si veya Ge'un komşu elektronları ile kovalent bağ yaparlar. Bu oluşan kovalent bağ soncunda V. Grup elementlerin son yörüngesinde 5 elektron bulunduğu için, fazla olan 1 elektronunu kristale verirler. Birer elektron her bir katkı atomundan ortama verildiğinden dolayı bu tür atomlara verici (donor) atomlar denir. Verici atomlar kristale fazladan elektron verdikleri için kristalde (-) yük yoğunluğu meydana gelir ve dolayısıyla (-) yük taşıyıcı yoğunluğu artmış olur. Boşta kalan 1 elektron, bağ yapmayan elektronlar ile iletkenlik bandının hemen altında bir enerji seviyesi oluşturur. Bu oluşan safsızlıklara verici, oluşan bu enerji seviyesine ise verici seviyesi denir. Verici seviyesinde bulunan elektronlar az bir enerji ile iletkenlik bandına geçer. Elektron fazlalığı oluşan yarıiletken tipine n-tipi yarıiletken denir. Bu tip yarıiletkenlerde fermi enerji seviyesi verici enerji seviyesine yaklaşır (Uzun, 2012b).

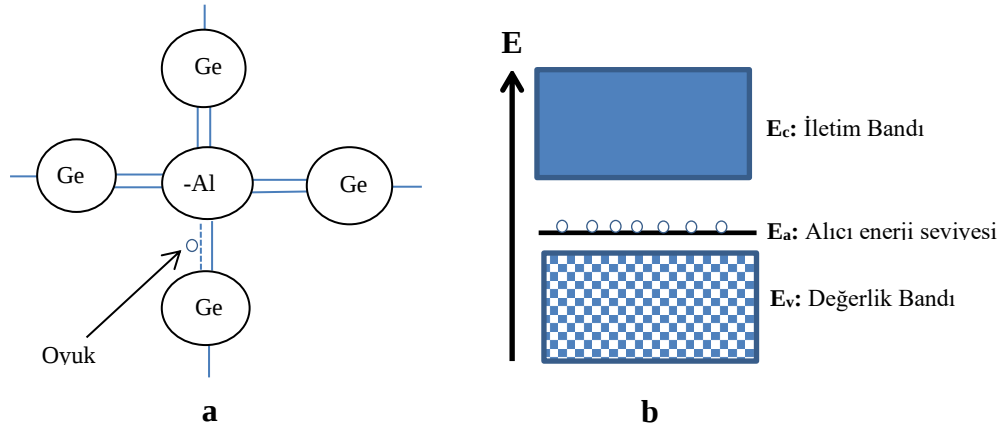


Şekil 2.4. a) n-tipi yarıiletkenin kovalent bağ oluşumu b) n-tipi yarıiletken bant yapısı

Yukarıdaki Şekil 2.4'te de gösterildiği üzere fosfat (P) atomu kovalent bağ oluşturduğu zaman bir elektronunu kaybettiği için pozitif (+) yükle yüklenmiştir. Oluşan kovalent bağlı bileşik sebebiyle fosfat (P) elementinin kaybettiği elektron, oluşan kristal yapı içerisinde elektron fazlalığına sebep olur ve böylece n-tipi yarıiletken elde edilmiştir.

2.1.2.b. p-tipi yarıiletkenler

Son yörüngesinde 3 elektron bulunan 3. Grup elementlerinden bor (B) veya alüminyum (Al) ile son yörüngesinde 4 elektrona sahip olan silisyum (Si) veya germanyum (Ge) gibi yarıiletkenlerin katkılanması sonucunda son yörüngesinde 3 elektronu bulunan atom, son yörüngesinde 4 elektron bulunan yarıiletken ile bir elektronlarını ortak kullanarak kovalent bağ oluşturur. Ancak yarıiletkenin 4, katkılanan atomun 3 elektronu bulunduğundan bir elektron çiftlenip bağ oluşturamaz. Dolayısıyla yapıda elektronların rahat bir şekilde hareket edebileceği bir boşluk oluşur. Bu şekilde oyukların meydana geldiği tür yarıiletkenlere p-tipi yarıiletken denir. p-tipi yarıiletkenlerde yük taşıyıcılar, + yüklü oyuklardır (Sarı, 2008).



Şekil 2.5. a) p-tipi yarıiletkenin kovalent bağ oluşumu b) p tipi yarıiletken bant yapısı

Yukarıdaki Şekil 2.5a’ da son yörüngesinde 4 elektron bulunan yarıiletken Ge ile son yörüngesinde 3 elektron bulunan Al elementi ile p-tipi yarıiletkenin oluşumu gösterilmiştir. Burada Al atomu 1 adet elektron aldığı için negatif (-) yüklenmiştir. Katkılanan Al atomu boşluğa neden olduğu için boşluk sayısı artmış olup oluşan kristal yapı içerisinde pozitif (+) yüklü oyuklar oluşmuştur. Değerlik bandında bu şekilde oyuk oluşması sebebiyle iletim bandına elektron çıkamaz. Bu durumda değerlik bandında oluşan oyuk diğer elektronlar tarafından doldurulurken sürekli bir oyuk hareketi gözlemlenir. Hareket eden bu oyuklar yük taşıyıcı görevini üstlenerek iletkenliğe katkıda bulunurlar. Oluşan bu oyuklar değerlik bandına yakın bir enerji seviyesi oluştururlar ki buna alıcı enerji seviyesi denilmektedir. p-tipi yarı iletkenlerde fermi enerji seviyesi alıcı enerji seviyesine yakın bulunmaktadır. Şekil 2.5b’de görüldüğü üzere alıcı enerji seviyesinin değerlik bandına yakın olduğu görülmektedir.

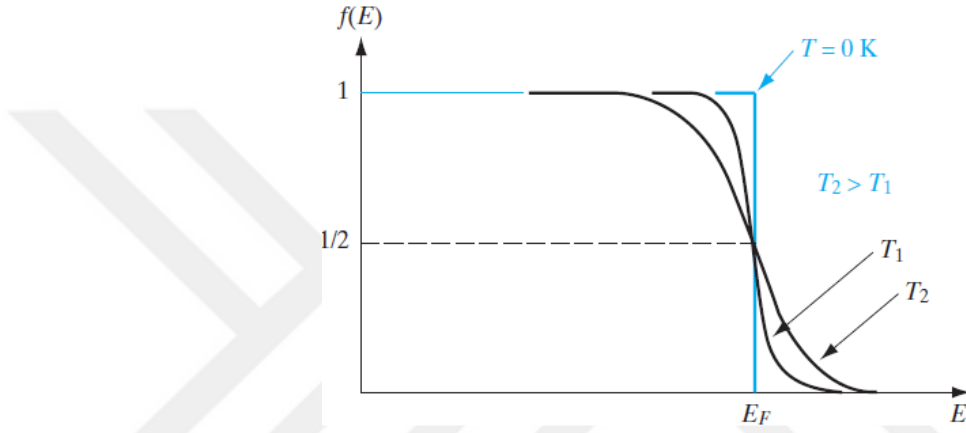
2.2.Fermi Enerji Seviyesi

$T=0$ K’de yani mutlak sıcaklık değerinde elektronun bulunabileceği en yüksek enerji seviyesine fermi enerji seviyesi denir. Fermi enerji seviyesinin üstündeki seviyelerde elektron bulunmaz. Sıcaklık arttıkça dolu enerji seviyelerinden bir üst boş enerji seviyelerine elektron geçişleri olur. Değerlik veya iletim bandında ne kadar elektron olduğunu öğrenebilmek için Fermi-Dirac dağılım ($f(E)$) fonksiyonundan yararlanılır. Bant yapılarında bulunan elektronların enerji seviyeleri dağılımı bu yol ile hesaplanır. Bir elektron E enerjisine sahip bir seviyi işgal ettiğinden dolayı bu seviyeleri

işgal edecek elektronların ortalama sayısını verir ve bu kısıtlama Pauli dışarlama prensibi tarafından yönetilir (Sarı, 2008b). Herhangi bir sıcaklıkta enerji seviyelerinin elektronlarla doldurulma olasılığı (Soylu, 2006);

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_f)/kT}} \quad (2.1)$$

ile verilir. Bu fonksiyona göre çizilen dağılım fonksiyonunun enerjiye bağlı değişimi sıcaklığın fonksiyonu olarak Şekil 2.6’da verilmiştir.



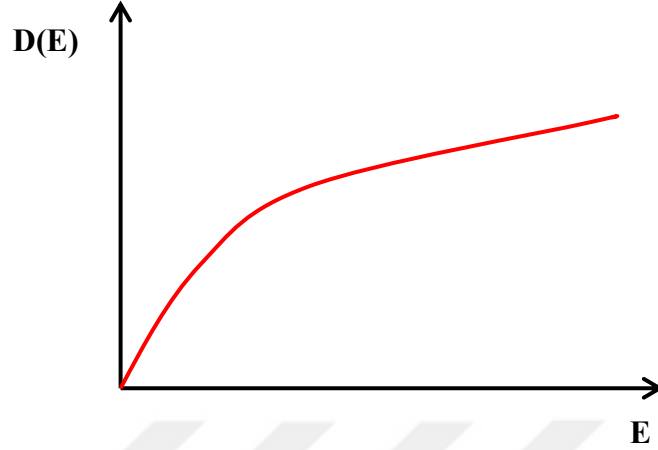
Şekil 2.6. Fermi dağılım fonksiyonu (Streetman and Banerjee, 2014)

Şekil 2.6’da görüldüğü üzere mutlak sıcaklığın sıfırdan farklı ($T \neq 0$) olduğu durumlarda elektron enerjisi fermi enerjisinden küçük olduğunda fermi dağılım fonksiyonu 1,0 değerine eşit iken, elektron enerjisi fermi enerjisine eşit olduğu durumda fermi dağılım fonksiyonu 0,5 değerini aldığı görülmektedir. Elektron enerjisinin fermi enerjisinden büyük olduğu durumda ise grafikte de görüldüğü üzere sıcaklık durumuna göre fermi fonksiyonu parabolik olarak azalır sıfıra düşmektedir. Mutlak sıcaklığın ($T=0$) olduğu durumda ise fermi dağılım fonksiyonunun basamak değerini aldığı görülmektedir.

Değerlik bandı veya iletim bandında kaçar tane enerji seviyesi bulunduğunu ve bu enerji seviyelerinde ne kadarının elektronlarca doldurulduğunu hesaplamak için ise enerji bantlarında enerji durum yoğunluğunu $D(E)$ hesaplamak gerekir. Durum yoğunluğu;

$$D(E) = \frac{4\pi}{h^3} (2m_e)^{3/2} \cdot E^{1/2} \quad (2.2)$$

denklemleriyle verilir.



Şekil 2.7. Enerji durum yoğunluğu fonksiyonu (Sarı, 2008b)

Şekil 2.7’de görüldüğü üzere elektronların enerjisi arttıkça bantlarda var olan enerji düzey yoğunluklarının arttığı görülmektedir.

2.3. Yarıiletkenlerde Elektriksel Özellikler

2.3.1. Katkısız yarıiletkenlerin taşıyıcı yoğunluğu

Yarıiletkenlerde elektriksel iletkenlik, yarıiletkenlerdeki oyuklar ve elektronlar tarafından oluşan serbest yükler vasıtasıyla oluşur. Katkısız yarıiletkenlerde değerlik bandındaki elektron ve oyuk sayıları eşittir, çünkü değerlik bandında bir oyuk, bir elektronun uyarılarak iletim bandına geçmesiyle oluşur.

Bantlardaki taşıyıcı yoğunluğu aşağıdaki Denklem (2.3) ile verilir.

$$n = \int D(E).f(E)dE \quad (2.3)$$

Burada Fermi-Dirac dağılım ve durum yoğunluğu fonksiyonları yerlerine yazılıp gerekli matematiksel işlemler yapıldığında iletkenlik bandındaki taşıyıcı elektron yoğunluğu;

$$n = 2 \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-(E_C - E_F)/kT} \quad (2.4)$$

ile ve değerlik bandındaki taşıyıcı oyuk yoğunluğu;

$$p = 2 \left(\frac{2\pi m_h kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-(E_F - E_V)/kT} \quad (2.5)$$

denklemleri ile verilir. Bu denklemlerde E_F , fermi enerji seviyesini, E_V , değerlik bandı üst sınırını, E_C , iletkenlik bandı alt sınırını, m_h , oyukların etkin kütlelerini ve m_e , elektronların etkin kütlelerini göstermektedir.

Katkısız yarıiletkenlerde oyuk taşıyıcılarının sayısı ile elektron taşıyıcı sayıları eşit ($p=n$) olduğundan dolayı bu iki denklem eşitlenirse;

$$E_F = \frac{1}{2} E_g + \frac{3}{4} kT \ln \left(\frac{m_h}{m_e} \right) \quad (2.6)$$

elde edilir. Yukarıdaki denklemde de görüleceği üzere fermi enerji seviyesi sıcaklığa, oyukların etkin kütlelerine, elektronların etkin kütlelerine ve yasak enerji aralığına bağlıdır.

Katkısız yarıiletkenlerde tüm oyuklar elektronlar ile dolu olduğu için, m_h değeri m_e değerine eşittir. Eşitlik 2.6'da değerler yerine yazılarak işlem yapıldığında, $\ln(1)=0$ olacağından dolayı $E_F = E_g/2$ değerine eşit olur. Yani katkısız yarıiletkenlerde fermi enerji seviyesi yasak enerji seviyesinin tam ortasında olur. Katkısız yarıiletkenlerde taşıyıcı yoğunluğu, n_i ;

$$n_i = 2 \left(\frac{kT}{2\pi\eta} \right)^{3/2} \left(\frac{m_e}{m_h} \right)^{3/4} e^{-E_g/4kT} \quad (2.7)$$

denklemleri ile gösterilir. Elektron durum yoğunluğu ($g_e(E)$), oyuk durum yoğunluğu ($g_h(E)$) ile gösterilmek üzere;

$$g_h(E) = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{2m_h}{\eta^2} \right)^{3/2} (E_V - E)^{1/2}, \quad E_V > E \text{ durumunda} \quad (2.8)$$

$$g_e(E) = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{2m_e}{\eta^2} \right)^{3/2} (E - E_C)^{1/2}, \quad E_C < E \text{ durumunda} \quad (2.9)$$

denklemleri ile gösterilir (Kittel, 1986).

2.3.2. Katkılı yarıiletkenlerin taşıyıcı yoğunluğu

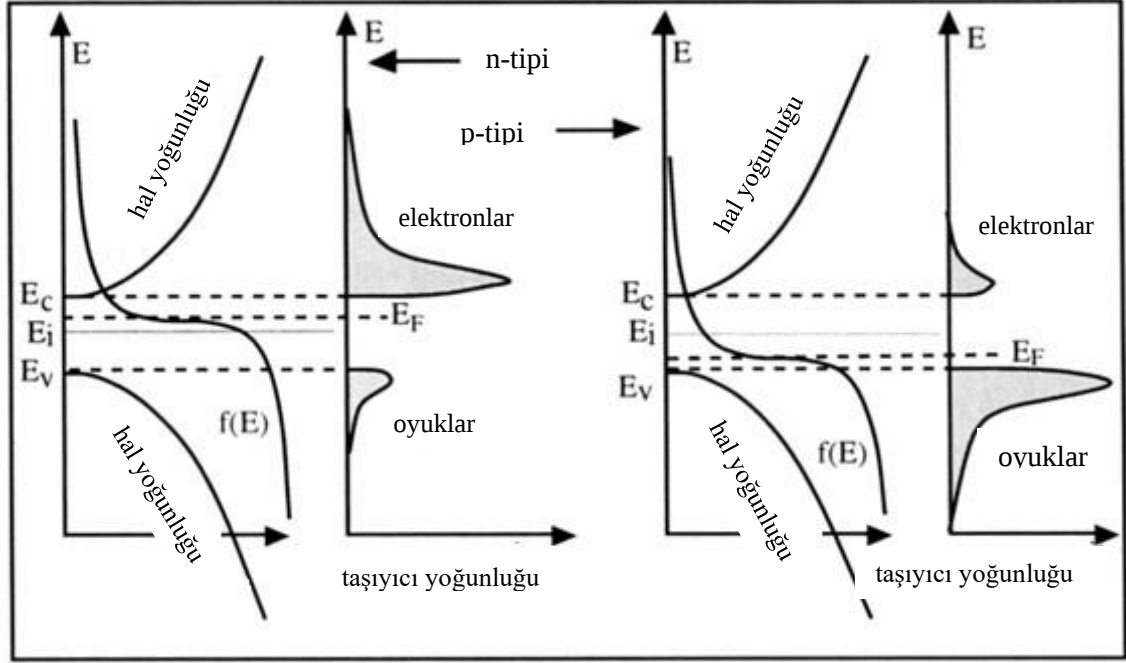
n-tipi yarıiletkenlerde elektron fazlalığı bulunduğu için çoğunluk taşıyıcıları elektronlar oluştururken, azınlık taşıyıcıları ise oyuklar oluşturur. p-tipi yarıiletkenlerde ise oyuk sayısı fazla olduğundan dolayı çoğunluk taşıyıcıları oyuklar iken azınlık taşıyıcıları ise elektronlardır. n-tipi yarıiletkenler için taşıyıcı yoğunluğu;

$$n = 2 \left(\frac{kT}{2\pi\eta^2} \right)^{3/2} (m_e)^{3/2} e^{(E_F - E_C)/kT} \quad (2.10)$$

ve p-tipi yarıiletkenler için taşıyıcı yoğunluğu ise;

$$p = 2 \left(\frac{kT}{2\pi\eta^2} \right)^{3/2} (m_h)^{3/2} e^{-E_F/kT} \quad (2.11)$$

denklemleri ile verilir.



Şekil. 2.8. n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerde elektron-oyuk konsantrasyonu ve fermi seviyesi (Colinge and Colinge, 2011)

Şekil 2.8. incelendiğinde p-tipi yarıiletken ve n-tipi yarıiletken için hal yoğunluğu ve fermi fonksiyonun $f(E)$ benzer parabolik eğri göstermektedir. Fermi enerji seviyesinin n-tipi yarı iletkende iletkenlik bandına yaklaştığı, p-tipi yarıiletkende değerlik bandına yaklaştığı görülmektedir. n-tipi yarıiletkende iletkenlik bandı üzerindeki elektron yoğunluğunun değerlik bandı altındaki oyuk yoğunluğundan fazla olduğu, p-tipi yarıiletkende ise değerlik bandı altındaki oyuk yoğunluğunun iletkenlik bandındaki elektron yoğunluğundan fazla olduğu söylenebilir. Hem n-tipi hem de p-tipi yarıiletkende hal yoğunluğu ile $f(E)$ eğrilerinin hemen hemen aynı olması, n-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk taşıyıcı olan elektronların görevini, p-tipi yarıiletkende çoğunluk taşıyıcı olan oyukların yaptığı yorumu yapılabilir.

2.4. Metal-Yarıiletken Kontaklar

Optoelektronik ve yarıiletken teknolojisinde metal-yarıiletken (MS), metal-okisit-yarıiletken (MOS), metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalarda ki ana etken metal ile yarıiletken arasına engel tabaka oluşturmaktır. Metal ile yarıiletken arasına bir engel tabaka oluşturma fikrini ortaya atan ilk kişi Walter H. Schottky olduğu için bu kontaklara Schottky diyotlar denilmektedir. Metal-yarıiletken kontaklar arasına doğal veya yapay bir engel tabakası oluşturulabilir (Karabat ve Arsel, 2015a).

Bir metal ile bir yarıiletken madde bir araya gelerek omik kontak veya doğrultucu (Schottky) olmak üzere iki tür kontak oluşturabilir. Kontak yapacak maddelerin kontak durumunda dirençlerinin en düşük olası hedeflenir. Hatta mümkünse ideal şartlarda temas dirençlerinin sıfır olması hedeflenir. Olabildiğince düşük direnç ile kontak yapabilmek için yapılacak kontak temas yüzeylerinin mümkün olduğunca temiz ve pürüzsüz olması çok önemli bir etkidir (Cowley and Sze, 1965).

Metal-yarıiletken malzemelerin üretim aşaması sırasında uygun kontak yapımını olumsuz etkileyen ara yüzey örgü bozuklukları ile oksitlenme, seri direncin artmasına sebep olur ve diyot karakteristiğini önemli ölçüde etkiler (Dağdelen, 2015a). Metal ile yarıiletkenin ara yüzeyinde istenmeyen parçacıklar ile istenmeyen reaksiyon ürünlerinin oluşmasının sebebi, genellikle yarıiletken teknolojisinde kullanılan rutin yöntemlerden kaynaklanmaktadır (Çatır, 2018a). Bu sebeple yalıtkan, metal ve yarıiletken kristallerin elektriksel iletkenliklerinin araştırılmasında uygun kontak için uygulanacak yöntemin titizlikle yapılması önemlidir. Kontak yapılırken kontaklar arası direncin olabildiğince az olması hatta idealde sıfır dirençli olması istenilir (Orak, 2013a). Fotodiyotlar, lazer diyotlar, Schottky diyotlar, ışık yayan diyotlar gibi elektronik ve optoelektronikte birçok aygıtın yapımında kullanıldığı düşünüldüğünde, metal-yarıiletken kontakların ne kadar önemli olduğu görülmektedir. Çalışmaların bu alanda yoğunlaşmasının en büyük sebebi çok geniş uygulama alanlarının bulunmasıdır.

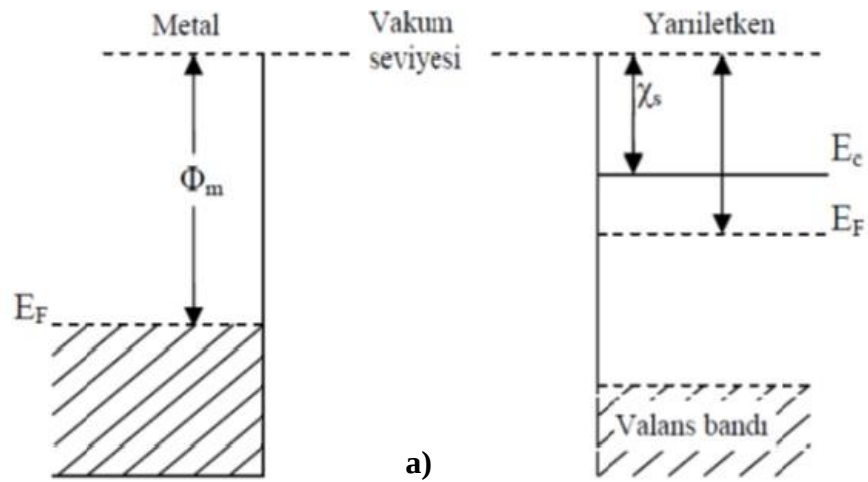
Metal-yarıiletken yapının ara yüzeyi arasında çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Kullanılan malzeme çeşidine bağlı olarak kontakların elektriksel özellikleri değişmektedir. İdealite faktörü, kontak ara yüzey durumları ve engel yüksekliği gibi diyota bağlı özellikler, metal-yarıiletken arasına kullanılan malzeme

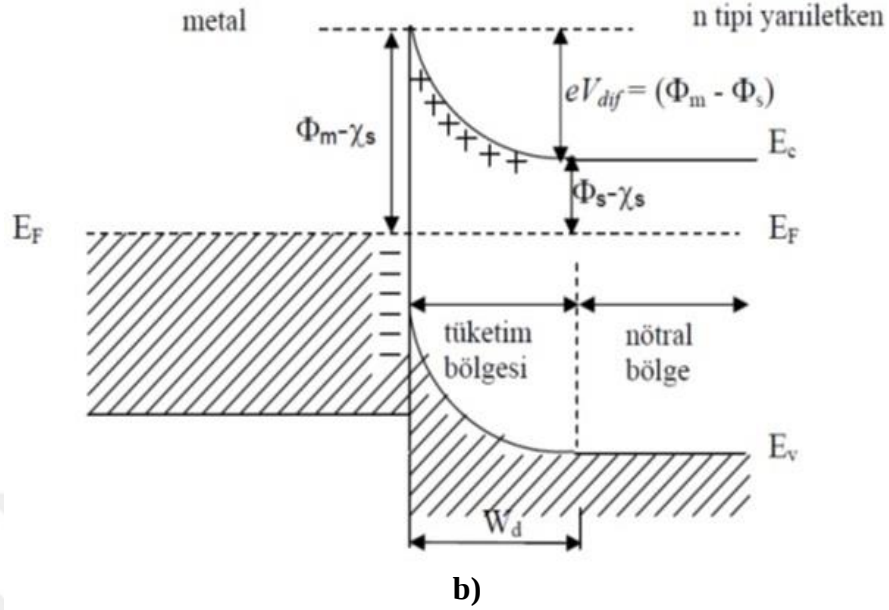
çeşidine bağlı olarak değiştiği için, kullanılacak ara yüzey malzemenin seçimi önemlidir. Günümüzde yapılan birçok çalışmada ara yüzey malzemesi olarak organik malzemeler kullanılmaktadır. Organik malzemelerin değiştirilmesi ile diyota bağlı birçok özellik değiştirilebileceğinden dolayı organik yarıiletken malzemeler, geleceğin teknolojisi olarak görülmektedir (Yıldırım ve Durumlu, 2017).

Metal-yarıiletken kontaklar termal işlem uygulama, buharlaştırma (elektron demeti ısıtması), püskürtme, kimyasal ayrıştırma veya metallerin kaplanması gibi çeşitli yöntemlerle oluşturulabilirler (Size, 1981). Aşağıda n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerin metallerle kontak oluşturulması ele alınmıştır.

2.4.1. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontaklar

Bir metal ile n-tipi bir yarıiletkenin temas ettirilerek doğrultucu veya Schottky kontak yapabilmesi metal ile yarıiletken malzemenin iş fonksiyonlarına bağlıdır. Metal iletkenin iş fonksiyonu (Φ_m), n-tipi yarıiletkeninin iş fonksiyonundan (Φ_s) büyük ise ($\Phi_m > \Phi_s$) metal ile yarıiletken malzemenin temas ettirilmesi sonucunda ara bölgede bir potansiyel engel oluşur, oluşacak kontak çeşidine Schottky (doğrultucu) kontak denilmektedir.



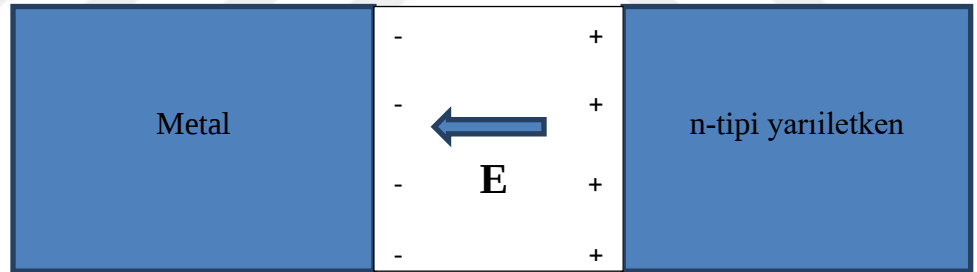


Şekil 2.9. $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda metal ile n-tipi yarıiletkenin enerji bant diyagramı **a)** Kontak yapılmadan önceki gösterimleri **b)** Kontak yapıldıktan sonra ve termal denge durumunda (Ayhan, 2012)

Yukarıdaki Şekil 2.9a incelendiğinde metalin fermi seviyesi n-tipi yarı iletkenin fermi seviyesinden $\Phi_m - \Phi_s$ farkı kadar daha aşağıda olduğu görülmektedir. Aralarında kontak yapıldıktan sonra denge hali oluşuncaya kadar yük alış verişi devam eder. Metalin iş fonksiyonu (Φ_m), n-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonundan (Φ_s) büyük olduğu görüldüğünden dolayı gösterilen metal ile n-tipi yarıiletken temas ettirildiğinde tek yönde akım geçiren doğrultucu (Schottky) diyot oluşur.

Metal iletkenin iş fonksiyonu (Φ_m), n-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonundan (Φ_s) büyük olduğundan dolayı n-tipi yarıiletken içerisindeki serbest elektronlar metal iletkeninden daha kolay vakum seviyesine çıkabilirler. Böylece metal ile n-tipi yarıiletken malzemenin temas ettirilmesi sonucunda yarıiletken malzemedeki serbest elektronlar metal yüzeyine doğru hareket ederler. Serbest elektronlar yarıiletkeni terk ettiklerinde gerisinde iyonize olmuş yükler (donorlar) bırakırlar. Bu sebeple yarıiletken tarafında bir pozitif yük bölgesi oluşur. Bu durum, yarıiletken tarafında elektron sayısının azalmasına metal tarafında ise elektron sayısının artmasına neden olur. Metal tarafında elektron sayısının artması metalin fermi enerji seviyesini değiştirmezken n-tipi yarıiletken tarafındaki elektron sayısı azalacağı için yarıiletkenin fermi seviyesi

iletkenlik bandından uzaklaşarak yasak enerji bandın ortalarına doğru kayar (Pakma, 2008a). Fermi seviyesinin denge durumunda oluşan bu kayma durumundan dolayı Şekil 2.9b’de görüldüğü gibi yarıiletkenin değerlik bandı ile iletim bandının aşağıya doğru büküldüğü görülmektedir. Metalin fermi seviyesi, n-tipi yarıiletkenin fermi seviyesinden $\Phi_m - \Phi_s$ farkı kadar aşağıda olduğundan, aralarında temas olduğunda yarıiletkenin fermi seviyesi ile metalin fermi seviyesi eşitleninceye kadar aralarında yük alış verişi devam eder (Ziel, 1968). Bu durumun sonucunda yarıiletkenin fermi seviyesi $\Phi_m - \Phi_s$ farkı kadar alçalarak metalin fermi seviyesiyle aynı düzeye gelir. Metal tarafında biriken negatif ince yük tabakası ile n-tipi yarıiletken tarafında oluşan pozitif uzay yükü bölgesi bir dipol tabaka oluşturur ve yarıiletken tarafındaki bantların bükülmesine sebep olur. Oluşan bu denge durumunda Şekil 2.10’da görüldüğü gibi yarıiletken tarafından metal tarafına doğru bir elektrik alan oluşur. Mott (1938)’e göre yarıiletken içerisinde ince yüksüz bir alan bulunmaktadır, bu ince yüksüz alandaki elektrik alan büyüklüğü sabittir ve bu bölgedeki potansiyel, belirtilen ince alan boyunca lineer olarak artmaktadır.



Şekil 2.10. Termal denge durumunda Metal ile n-tipi yarıiletken kontak durumu

Metal ile n-tipi yarıiletken arasındaki dipol yüzey yükleri sebebi ile kontaklar arasında bir potansiyel engeli oluşmaktadır. Oluşan bu potansiyel engelin yarıiletken tarafındaki yüksekliği,

$$eV_d = (\Phi_m - \Phi_s) \quad (2.12)$$

metal tarafında oluşan potansiyel engel ise,

$$e\Phi_B = (\Phi_m - \chi_s) \quad (2.13)$$

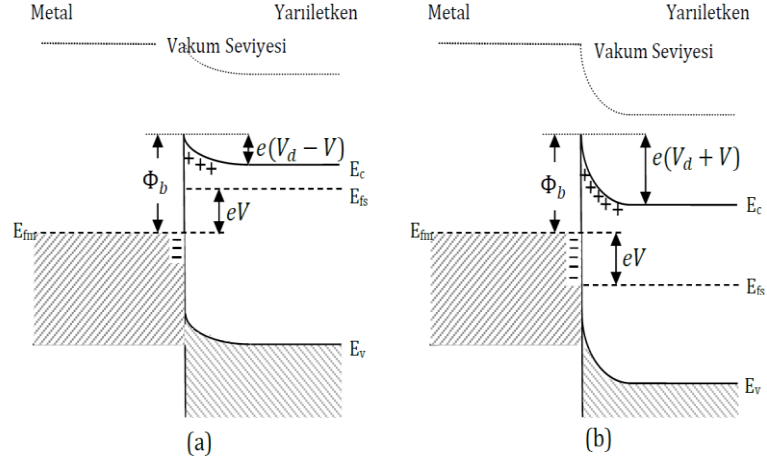
ile verilir. Burada Şekil 2.9a'da anlaşılabacağı üzere χ_s kontak yapılmadan önce yarıiletken tarafında iletkenlik bandı (E_c) ile vakum seviyesi arasındaki enerjidir ve elektron ilgisi olarak isimlendirilir. Denklem (2.13)'te gösterilen Φ_B metal tarafındaki engel yüksekliği, Denklem (2.12)'de gösterilen V_d ise yarıiletken tarafındaki engel potansiyelidir.

Şekil 2.9b'de metal tarafındaki engel potansiyeli dik olarak arttığı görülürken, yarıiletken tarafında ise parabolik olarak W_d genişliğinde tüketim bölgesi oluşturduğu görülmektedir. Yarıiletken tarafında elektronlardan arınmış pozitif yükler kalırken metal tarafında ise elektron yoğunluklu negatif yük çoğunluğu oluşmuştur. Bu pozitif yüklü olan bölge ile negatif yüklü olan bölge arasında kalan dirençli kısımda elektron taşıyıcılar tükendiğinden dolayı tüketim tabakası ismini almıştır. Aynı zamanda Schottky engeli olarak isimlendirilmektedir. Tüketim tabakası, kontaklar arasında oluşan tabakanın kalınlığına, elektronlar tarafından iyonize edilmiş donör yoğunluğuna ve oluşan engel potansiyeline bağlı olarak değişir (Rhoderick and Williams, 1988).

Bir ısısal uyarma sonucunda yüksek enerjiye sahip elektronlar metalden n-tipi yarıiletkene ve n-tipi yarıiletkenden metale doğru hareket edecektir. Bu elektron hareketinden dolayı birbirine eşit ve zıt yönlü I_0 akımları oluşur. Oluşan bu kontakın metal tarafına pozitif, n-tipi yarıiletken tarafına negatif bir V gerilimi uygulandığında; metal kısımdan n-tipi yarıiletken tarafına geçen elektronların karşılaştığı engel yüksekliğini değiştirmedeğinden dolayı n-tipi yarıiletkenden metal tarafa doğru akan I_0 akımını da değiştirmeyecektir. Fakat uygulanan bu pozitif V gerilimi, Şekil 2.11a'da görüldüğü üzere iletkenlik bandındaki enerji seviyesini eV kadar yükselirken yarıiletkenden metale doğru akan elektronların engel yüksekliği de eV kadar alçalır ve $e(V_d - V)$ değerine düşer. Bu durumların sonucunda meydana gelen akım,

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{eV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.14)$$

denklemini ile bulunur. Metal tarafındaki engel yüksekliği, uygulanan gerilimden etkilenmezken yarıiletken tarafındaki engel yüksekliği uygulanan gerilimle azalır. Dolayısıyla metal kısmından n-tipi yarıiletkene doğru elektron geçişleri kolaylaşacağı için uygulanan V geriliminin değişmesi ile kontakta akan akım, Denklem (2.14)'te görüldüğü gibi üstel olarak değişir.

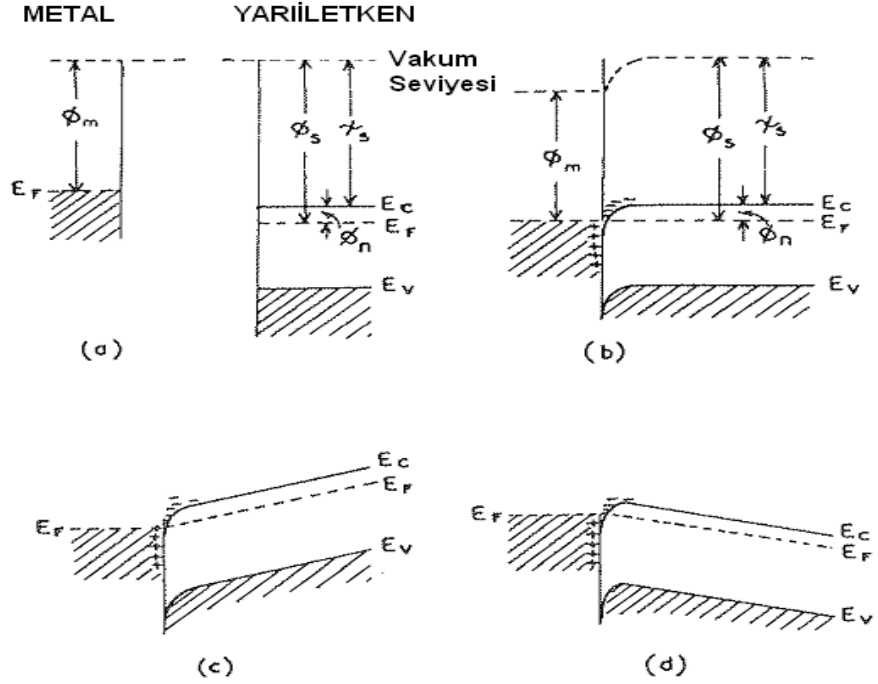


Şekil 2.11. Doğrultucu metal ile n-tipi yarıiletken kontakta enerji-bant gösterimi, **a)** düz belseme durumunda, **b)** ters besleme durumunda (Göksu, 2013)

Yukarıdaki Şekil 2.11b’de gösterildiği üzere kontakın metal tarafına negatif, n-tipi yarıiletken tarafına ise pozitif bir V gerilimi uygulandığında iletkenlik bandı eV kadar azalırken yarıiletken tarafındaki engel yüksekliği ise görüldüğü üzere eV kadar artarak $e(V_d + V)$ değerini alır. Bu duruma ters besleme denilir. Yarıiletken tarafındaki engel yüksekliği arttığından dolayı yarıiletkenden metal kısma elektron geçişleri zorlaşır dolayısıyla n-tipi yarıiletkenden metale geçen akım azalarak belli bir süre sonra elektron akışı tamamen durur. Ters beslemede yarıiletkenden metale doğru elektron akışı duracağından dolayı kontak akımını, sadece metalden n-tipi yarıiletken tarafına termiyonik emisyon yoluyla geçen elektronlar oluşturur ve yüzey durumları olmadığı durumda doyma akımı çok küçüktür (Pakma, 2008b).

2.4.2. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontaklar

Bir metal ile bir n-tipi yarıiletken kendi aralarında kontak oluşturduklarında nasıl bir kontak oluşturacaklarını bilmek için, metal ile n-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonlarına bakmak gereklidir. Metal iletkenin iş fonksiyonu (Φ_m), n-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonundan (Φ_s) küçük ise ($\Phi_m < \Phi_s$) ikisi arasında bir kontak yapıldığında omik kontak oluşur.



Şekil 2.12. Metal ile n-tipi yarıiletkenin ($\Phi_m < \Phi_s$) olması durumunda enerji diyagramı
a) Ayrı ayrı durumdayken **b)** Termal denge durumundayken **c)** Ters besleme **d)** Doğru besleme (Kaya, 2010)

Yukarıdaki Şekil 2.12 incelenirse metal ile n-tipi yarıiletkenin omik kontak öncesi ve sonrası tüm durumları verilmiştir. Şekil 2.12a'da görüldüğü üzere metal ile n-tipi yarıiletkenim kontak yapılmadan önce enerji-bant diyagramları verilmiştir. Grafiğe bakıldığında metal ile n-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_m), n-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonundan (Φ_s) daha yukarıda olduğu ve metalin fermi enerji seviyesinin n-tipi yarıiletkenin fermi enerji seviyesinden $\Phi_s - \Phi_m$ farkı kadar yukarıda olduğu görülmektedir. Burada χ_s , elektron ilgisi olup şekilden de görüleceği üzere, n-tipi yarıiletkenin iletkenlik seviyesinin (E_c) alt sınırı ile vakum seviyesi arasında kalan kısımdır. E_c , değerlik bandının üst sınırı (E_v) ve fermi seviyesinin sabit oldukları görülmektedir.

Metal ile n-tipi yarıiletken kontak edildikten sonraki termal denge durumu enerji-bant diyagramı Şekil 2.12b'de gösterilmiştir. Aralarında kontak yapıldığında n-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonu daha büyük olduğu için metal ile n-tipi yarıiletken arasında doğru elektron hareketi başlar. Bundan dolayı metaldeki hareket eden elektron yerleri boş kalır ve oyuklar oluşur. Yani metal yüzeyinde pozitif yüklü bir tabaka oluşmuş olur. Aynı şekilde metalden yarıiletkenine doğru elektron hareketi olduğu

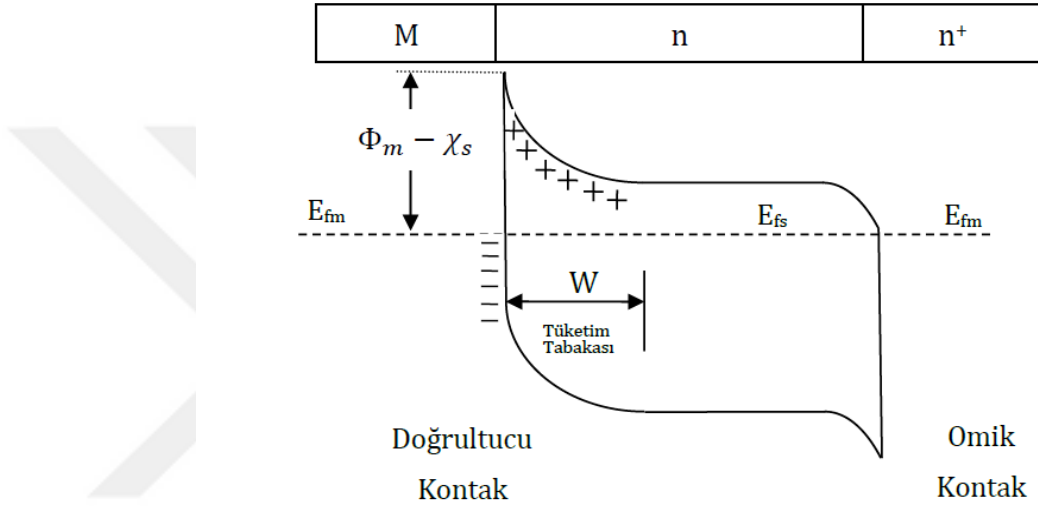
için n-tipi yarıiletken yüzeyinde elektron fazlalığı oluşur. Yani aşırı n-tipi olur ve kontak bölgesinde Şekil 2.12b’de gösterildiği gibi dipol bir tabaka meydana gelir. Aralarındaki yük alış verişi, n-tipi yarıiletkenin fermi seviyesi metalin fermi seviyesine eşitleninceye kadar devam eder ve n-tipi yarıiletkenin fermi seviyesi $\Phi_s - \Phi_m$ farkı kadar yükselerek termal denge durumunu oluşur. n-tipi yarıiletkende yüzey yükleri olan elektronlar negatif ve sınırlı kalınlıkta bir tabaka oluşturur. n-tipi yarıiletken tarafında bir tüketim bölgesi oluşmadığından dolayı metalden n-tipi yarıiletken tarafına ve n-tipi yarıiletkenden metal tarafına elektron geçişleri için bir potansiyel engeli yoktur.

Denge durumuna gelen bu kontak yapısının metal kısmına bir $+V$ gerilimi, n-tipi yarıiletkene $-V$ gerilimi uygulandığında, n-tipi yarıiletken tarafında herhangi bir engel olmadığından dolayı elektron akışı kolayca devam eder. Aynı şekilde kontağın metal tarafına $-V$ gerilimi, n-tipi yarıiletken tarafına ise $+V$ gerilimi uygulandığında, zaten yarıiletken tarafı aşırı n-tipi olduğundan dolayı elektron akışları herhangi bir engel ile karşılaşmayacaktır. Buradan da görüleceği üzere kontağa uygulanan gerilimin yönü akımı etkilememektedir. Doğrultucu kontakta uygulanan gerilim sadece kontak bölgesinde yayılırken omik kontak uygulanan gerilim tüm gövde boyunca dağılır. Bu yüzden omik kontaklar doğrultucu kontaklardan farklı olarak akımı tek yönde değil, her iki yönde de iletir (Henisch, 1984). Omik kontakların mümkün olduğunca sistemi az etkilemesi hedeflenir. Kontak üzerinde gerilim düşümünün en az olması hedeflenir ve kontak direncinin oldukça küçük olması sebebiyle üzerine düşen gerilime bağlı olarak akımın doğru orantılı olarak artması amaçlanır. Pratik uygulamalarda omik kontak elde edebilmek için, n-tipi yarıiletken yüzeyine metal buharlaştırılır ve yarıiletken-metal karışımından oluşan bir alaşım oluşur. Bu alaşım sebebiyle yarıiletkenin dış yüzeyi yarıiletken gövdeye göre elektron bakımından daha zengindir ve yarıiletken dış yüzeyinde bir n^+ tabakası oluşur.

2.4.3. Metal/n-tipi yarıiletken/metal yapısı

n-tipi yarı iletkenin bir tarafına omik kontak, diğer tarafına ise doğrultucu kontak uygulaması sonucunda oluşturulur. n-tipi yarıiletkenin bir tarafında omik kontak yapabilmek için; kullanılan metalin iş fonksiyonu (Φ_m), n-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonundan (Φ_s) küçük ($\Phi_m < \Phi_s$) olacak şekilde elektron bakımından zengin bir metal seçilir. Aynı şekilde n-tipi yarıiletkenin diğer tarafına ise doğrultucu kontak

yapabilmek için kullanılacak metalin iş fonksiyonu (Φ_m), n-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonundan (Φ_s) büyük ($\Phi_m > \Phi_s$) olacak şekilde metal seçilerek kontak yapılır. Omik kontak yapılan metal tarafında elektron bakımından zengin bir metal kullanıldığı için yarıiletken içerisine çok fazla difüze olacak şekilde kontak yapılırken, doğrultucu kontak yapılacak tarafta ise metal yarıiletken içerisine çok az yayılacak şekilde kontak yapılarak oluşan bu yapıya Schottky diyot denir. (Seçuk, 2011).

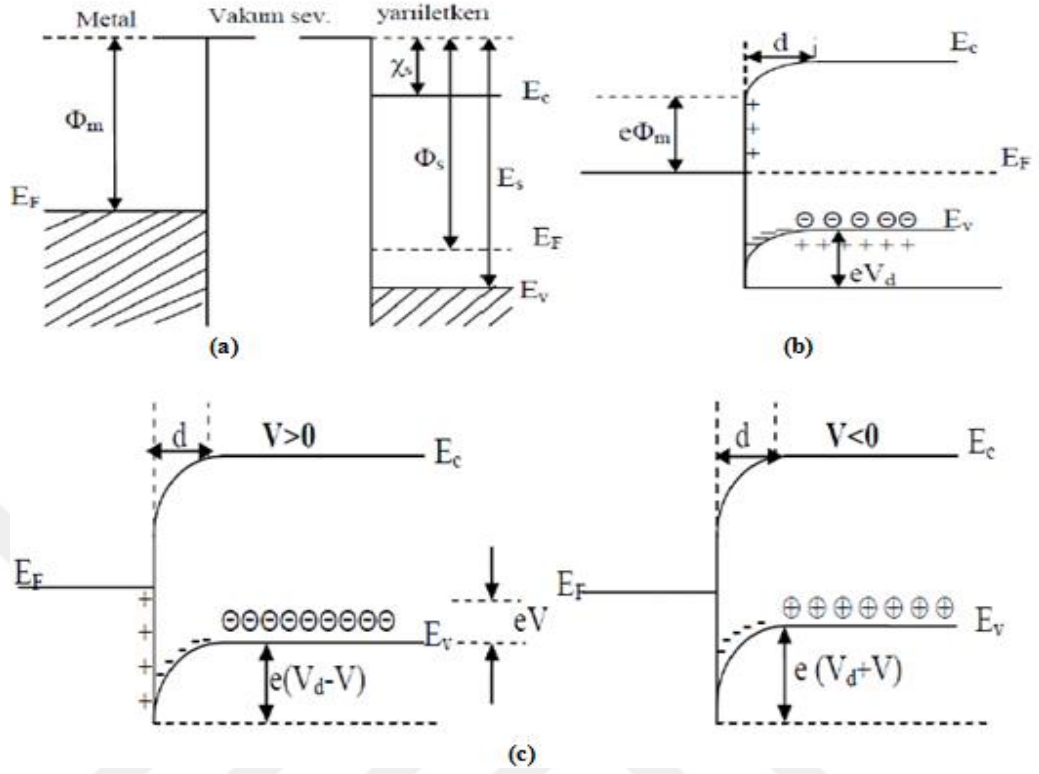


Şekil 2.13. Metal–n-tipi yarıiletken-metal yapısı enerji-bant diyagramı (Göksu, 2013)

Şekil 2.13'te metal-n-tipi yarıiletken-metal yapısının termal denge durumu verilmiştir. İlgili şekilde de görüldüğü üzere omik kontak tarafı ($n-n^+$), doğrultucu kontak tarafı ($n-M$) ile gösterilmiştir. Doğrultucu kontakta yarı iletken tarafında W genişliğinde bir tüketim bölgesi oluşmuştur. Omik kontak tarafına (n^+) negatif bir gerilim ($V < 0$) uygulandığında düz besleme oluşurken, aynı taraftan olacak şekilde pozitif bir gerilim ($V > 0$) uygulandığında ise ters besleme meydana gelir.

2.4.4. Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontaklar

Metal/p-tipi yarıiletkenlerde ise metal, p-tipi yarıiletken ile kontak yaptığında boşlukların tek yönde daha rahat akmasını sağlar. Metal iletkeni ile p-tipi yarıiletken aralarında bir kontak oluşturduğunda metal iletkenin iş fonksiyonu (Φ_m), yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s)'den küçük olduğunda doğrultucu (Schottky) kontak oluşur.



Şekil 2.14. Metal-p tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji bant diyagramı **a)** Kontakdan önce **b)** Kontakdan sonra **c)** $V > 0$ ve $V < 0$ durumlarında (Canlı, 2018a)

Şekil 2.14a’da görüldüğü üzere metal ile p-tipi yarıiletken malzeme arasında kontak yapılmadan önce metal iletkeninin fermi enerji seviyesi, p-tipi yarıiletken malzemenin fermi enerji seviyesinden daha yüksektir. Yani metalin fermi enerji seviyesi, p-tipi yarıiletkenin fermi enerji seviyesinden $\Phi_s - \Phi_m$ farkı kadar yukarıda olduğu görülmektedir. Metalin fermi enerji seviyesi daha yukarıda olduğundan dolayı metalden p-tipi yarıiletkene doğru bir elektron (yük) akışı başlar ve fermi enerji seviyeleri denge durumuna ulaşip eşit hale gelinceye kadar bu yük akışı devam eder (Ziel, 1968). Metalde bulunan bu elektronlar p-tipi yarıiletkende bulunan boşlukları doldurarak iyonize ederler ve metalde bir pozitif yük fazlalığı oluşur. Bunun sonucunda yarıiletken yüzeyinde elektron artışı olurken yarıiletken tarafında iyonize olan bu akseptörler (alıcılar), d kalınlığında oluşturdukları bir uzay yükü tabakası içerisinde yayılırlar. Şekil 2.14b’de görüldüğü üzere, yarıiletkenin fermi enerji seviyesini metalin

fermi enerji seviyesine çıkarabilmek için $\Phi_s - \Phi_m$ kadar enerji gerekmektedir. Kontak yapıldıktan sonra yarıiletken yüzeyindeki oyukların oluşturduğu engel yüksekliği,

$$eV_d = (\Phi_s - \Phi_m) \quad (2.15)$$

denklemleriyle verilir. Burada gösterilen V_d , yarıiletken yüzeyinde oluşan potansiyel farktır ve metal yüzeyine göre alınır (Neamen, 2003). Metal/p-tipi ekleminde metal yüzeyindeki boşlukların yarıiletken yüzeyine göre oluşturduğu engel yüksekliği de aşağıdaki gibi olur.

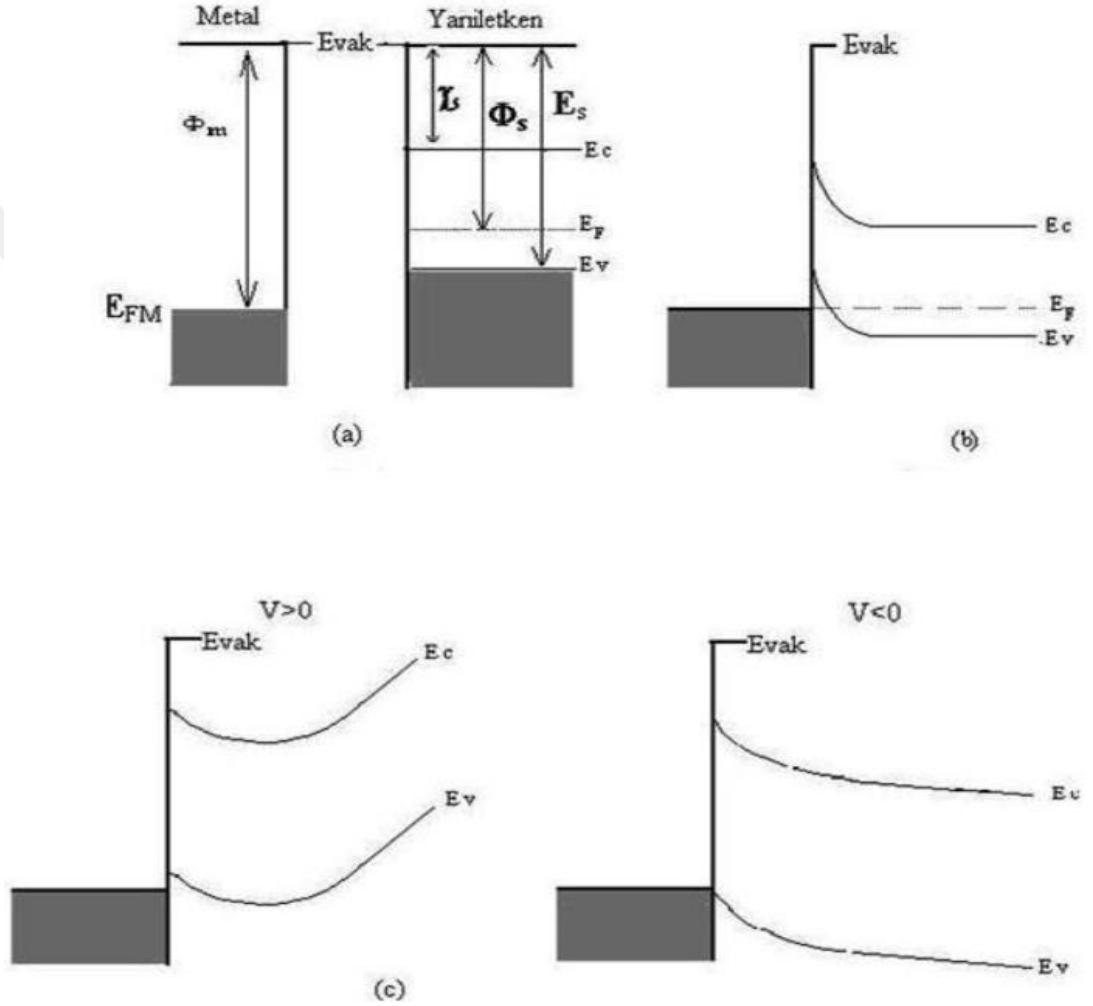
$$e\Phi_B = (E_s - \Phi_m) \quad (2.16)$$

Termal bir uyarı verilmesi halinde metalden p-tipi yarıiletkene doğru elektronlar hareket etmeye başlar. p-tipi yarıiletkende metal yüzeyine göre eV_d 'lik bir potansiyel fark oluşur. Bu potansiyel farkı aşan oyuklar metale doğru hareket ederler. Aynı durumun tersi olarak metal içerisine termal bir uyarım sonucunda metal yüzeyinde oluşan elektronlar, metalin p-tipi yarıiletken yüzeyinde oluşturduğu $e\Phi_B$ potansiyel engelini aşarak p-tipi yarıiletkene doğru bir elektron hareketi oluşur. Metal ile p-tipi yarıiletken arasında fermi enerji seviyesi eşitleninceye kadar metalden p-tipi yarıiletkene doğru yük hareketi devam eder. Bu yük hareketi sonunda denge durumuna ulaşarak fermi enerji seviyesi eşitlenir ve karşılıklı I_o doyum akımı oluşmaya başlar.

Şekil 2.14c'de görüldüğü üzere p-tipi yarıiletkenden metale doğru oluşan bu doğrultucu kontağa bir V gerilimi uygulandığında yarıiletkenden metale geçen oyuk sayısı değişmektedir. Geçen oyuk sayısına bağlı olarak oyuk akımı $\exp(eV/kT)$ oranında değişir. p-tipi yarıiletkende bulunan tüm enerji seviyeleri ve yasak enerji aralığı eV kadar azalır. Aynı şekilde metalden p-tipi yarıiletkene ters bir V gerilimi uygulandığında (Şekil 2.14d) ise doğrultucu kontağa ters yönde olduğu için herhangi bir değişiklik olmaz. Denge durumunda birbirine zıt olarak karşılıklı oluşan I_o doyum akımı olmak üzere oluşacak I akımı, Denklem 2.14 kullanılarak hesaplanır. Bu denklemde gösterilen e elektronun yükünü, k Boltzman sabitini, T mutlak sıcaklığı V ise uygulanan gerilimi göstermektedir.

2.4.5. Metal/p-tipi yarıiletken omik kontaklar

Bir metal ile bir p-tipi yarıiletken arasında omik kontak oluşabilmesi, yine metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonlarına bağlıdır. Yani metalin iş fonksiyonu (Φ_m), yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) den büyük olması ($\Phi_m > \Phi_s$) durumunda omik kontak oluşur.



Şekil 2.15. Metal-p tipi yarıiletken omik kontakın enerji/bant diyagramı **a)** kontak öncesi **b)** kontak sonrası ve termal dengede **c)** $V \neq 0$ (pozitif ve negatif besleme) olması durumlarında (Boy, 2013)

Şekil 2.15a'da görüldüğü üzere metal ile p-tipi yarıiletken arasında kontak oluşmadan önceki durumları gösterilmiştir. Kontak oluşmadan önce metalin fermi seviyesi, $\Phi_m - \Phi_s$ farkı kadar yarıiletkenin fermi seviyesinden aşağıda olduğu görülmektedir. Metal ile yarıiletken arasında kontak oluşuktan sonra yarıiletkendeki

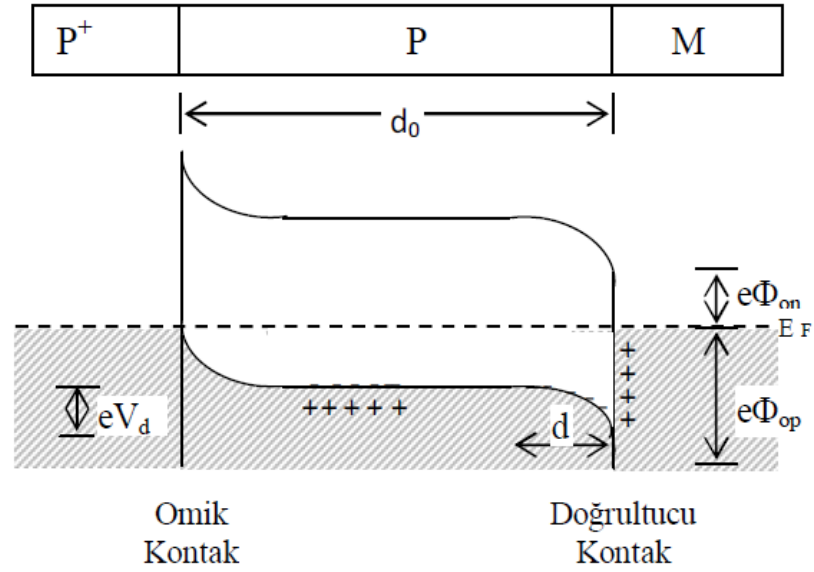
elektronlar hareket ederek metal içerisine doğru geçmeye başlarlar. Bu elektron hareketinden dolayı yarıiletken tarafında oyuk fazlalığı oluşur ve pozitif bir yüzey tabakası meydana gelirken metal yüzeyinde negatif bir yüzey tabakası meydana gelir. Yarıiletkenden metale doğru oluşan elektron hareketinden dolayı yarıiletken tarafında oyuk sayısı artacağından dolayı yarıiletken tarafı daha fazla p-tipi olmuş olur. Metal yüzeyinde elektron fazlalığı olduğu için bu negatif yük yoğunluğu yarıiletken içerisindeki oyukların içerisine kolayca geçebilirler. Bu elektron hareketi yarıiletkendeki oyukların metale doğru akmasına sebep olur. Metale doğru hareket eden bu oyuklar, metal içerisindeki yüksek elektron yoğunluğu sebebiyle nötralize olurlar. Ters besleme uygulandığında metal tarafında oluşan oyuklar yarıiletken tarafına kolayca hareket edebilir. Böylece kontak bölgesinde bir dipol yüzey tabakası oluşarak iki yönde yük geçişini sağlayan omik kontak oluşur. Bu şekilde metalden yarıiletkene ve yarıiletkenden metale doğru kolayca yük akışı sağlandığı için bu tür kontaklara omik kontak denir (Sze, 1981b). Bu yük hareketi sebebiyle yarıiletkenin fermi seviyesi metalin fermi seviyesine düşüncüye kadar devam eder ve termal denge durumuna gelir.

Termal denge durumuna gelince yarıiletkenin fermi seviyesi $\Phi_m - \Phi_s$ farkı kadar düşerek metalin fermi seviyesine iner. Termal dengede olan kontağa bir gerilim uygulandığında uygulanan bu besleme, tüm yarıiletkene dağılarak her iki yönde akım geçmesine neden olur. Kontak direnci oldukça küçüktür. Küçük bir gerilim uygulamasında akım geçirilebilir (Milnes and Feucht, 1972). Ters besleme ($V < 0$) ve düz besleme ($V > 0$) uygulandığında iletkenlik bandı ile değerlik bandının parabolik olarak değişimleri Şekil 2.15c' de gösterilmiştir.

2.4.6. Metal/p-tipi yarıiletken/metal yapısı

p-tipi yarıiletkenin bir tarafına omik kontak, diğer tarafına ise doğrultucu kontak uygulaması sonucunda oluşturulur. Omik kontak oluşturabilmek için p-tipi yarıiletkenin yüzeyine metal buharlaştırıp, yarıiletkenle alaşım haline getirilerek yarıiletkenin yüzeyinde bir P^+ tabakası oluşur, bu tabaka deşik bakımından yarıiletken gövdeye göre daha zengindir. (Çetinkara, 2002). p-tipi yarıiletkenin bir tarafında omik kontak yapabilmek için kullanılacak metalin iş fonksiyonu (Φ_m), p-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonundan (Φ_s) büyük ($\Phi_m > \Phi_s$) bir metal kaplayarak oluşturulur. Aynı şekilde p-tipi yarıiletkenin diğer tarafına ise doğrultucu kontak yapabilmek için kullanılacak

metalin iş fonksiyonu (Φ_m), p-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonundan (Φ_s) küçük ($\Phi_m < \Phi_s$) olacak şekilde metal uygulanarak kontak yapılır. Omik kontak yapılan metal tarafında elektron bakımından zengin bir metal uygulandığı için yarıiletken içerisine çok fazla yayılacak şekilde kontak yapılırken, doğrultucu kontak yapılacak tarafta ise metal yarıiletken içerisine çok az yayılacak şekilde kontak yapılır.



Şekil 2.16. Metal/p-tipi yarıiletken/metal yapısının termal dengede enerji bant diyagramı (Çetinkaya, 2011)

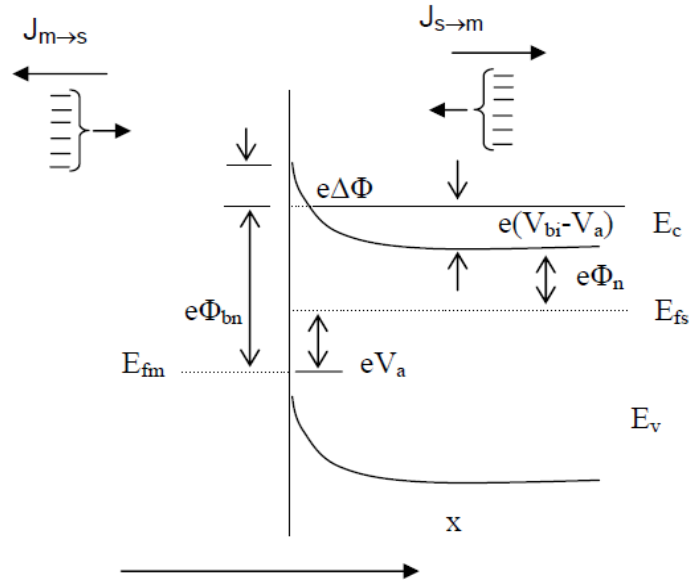
Şekil 2.16’da metal/p-tipi yarıiletken/metal yapısının termal denge durumu verilmiştir. İlgili şekilde de görüldüğü üzere omik kontak tarafı ($P^+ P$), doğrultucu kontak tarafı ($P-M$) ile gösterilmiştir. Omik kontak tarafına (P^+) pozitif bir gerilim ($V > 0$) uygulandığında doğru besleme oluşur. Aynı şekilde omik kontak tarafında olacak şekilde negatif bir gerilim ($V < 0$) uygulandığında ise ters besleme oluşur.

2.5. Termoiyonik Emisyon Modeliyle Schottky Diyotta Akım İletimi

Bu modele göre elektronlar veya oyuklar termal enerjileri sebebi ile yeterli enerji seviyesine ulaştıklarında yapıda mevcut olan potansiyel engellerin üzerinden atlayarak yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene doğru geçerler (Çetinkaya, 2011). Bu konuda termal buharlaştırma etkisi üzerine, Yılmaz and Gölcür, (2014) yaptıkları polikristal CdInTe ince film üzerindeki çalışmalarında 200 K ile 400 K aralığındaki tüm

sıcaklık değerlerinde akan akım mekanizmasının termoiyonik emisyon olduğunu tespit etmişlerdir.

Metal ile n-tipi yarıiletkenin oluşturduğu kontak yapılarında çoğunluk taşıyıcılar elektron olduğu için potansiyel engeli aşmak için yeterli termal enerjiye sahip elektronlar, metal ile p-tipi yarıiletkenin oluşturduğu kontak yapılarında ise çoğunluk taşıyıcılar oyuk olduğu için potansiyel engeli aşmak için yeterli termal enerjiye sahip oyuklar ile sağlanır. Termoiyonik modeli ilk olarak Bethe tarafından oluşturulmuştur (Göksu, 2013). Bu teoreme göre termal denge durumunda net akımın akması bu ısısal denge durumuna etki etmez. Potansiyel engel yüksekliği (Φ_b) değeri kT enerji değerinden çok büyüktür. Akan akım engel yüksekliğine bağlı olup potansiyel engel yüksekliği biçimi önemli değildir. Tüketim bölgesinde bulunan taşıyıcıların çarpışmaları ihmal edilebilecek kadar düşüktür, engel şekli etkisi ihmal edilir. Bu ihtimaller üzerine bakıldığında Schottky kontaklarda oluşan akım akışı sadece engel yüksekliğine bağlı olup engelin şeklinden etkilenmemektedir. Potansiyel engel yüksekliğini aşabilmek için yeterli enerjiye sahip elektron enerjisi yoğunluğuna bağlı olarak yarıiletkenden metale doğru akan akım yoğunluğu belirlenir.



Şekil 2.17. Doğru besleme altındaki bir Schottky diyotun imaj azalmasına ait enerji-bant diyagramı (Canlı, 2018b)

Şekil 2.17’de bir Schottky kontağın metal tarafına bir V_a voltajının verildiği görülmektedir. Ayrıca metalden yarıiletken ($J_{m \rightarrow s}$) ve yarıiletkenden metale ($J_{s \rightarrow m}$) iki farklı yöne doğru akım yoğunluğu gösterilmiştir. İlgili şekilde görüldüğü üzere ($J_{s \rightarrow m}$) akım yoğunluğu x-yönünde ve metal tarafında oluşan potansiyel engel yüksekliğini aşabilecek enerjiye sahip elektron yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak,

$$J_{s \rightarrow m} = e \int_{E_c}^{\infty} V_x dn \quad (2.17)$$

şeklinde gösterilir. Denklemden E_c , termiyonik emisyon durumunun oluşabilmesi için elektronların sahip olmaları gereken minimum enerjiyi, V_x elektronların kontak yüzeyine dik olarak hareket ederken x-yönünde oluşturduğu hız bileşenini ifade eder. Artan elektron yoğunluğu (dn),

$$dn = g_c(E) f(E) DE \quad (2.18)$$

denklemleriyle verilir. $g_c(E)$, iletkenlik bandı üstündeki durum yoğunluğu gösterir. Gösterilen denklemde Maxwell-Boltzman yaklaşımı uygulanarak, elektron yoğunluğu için,

$$dn = \frac{4\pi(2m_n^*)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \sqrt{E - E_c} e^{\left[\frac{-(E - E_c)}{kT}\right]} dE \quad (2.19)$$

denklemleri yazılabilir. Yukarıdaki denklemde gösterilen k Plank sabitini, m_n^* elektronun etkin kütesini, $(E - E_c)$ enerji farkı ise serbest elektronun kinetik enerjisi olarak tanımlanır. Gerekli işlemler yapılırsa,

$$(E - E_c) = \frac{1}{2} m_n^* V^2 \quad (2.20)$$

$$dE = m_n^* V dV \quad (2.21)$$

$$\sqrt{E - E_c} = V \sqrt{\frac{m_n^*}{2}} \quad (2.22)$$

ifadesi bulunur. Bulunan bu ifade denklem (2.20)’deki ifadesinde düzenlenirse,

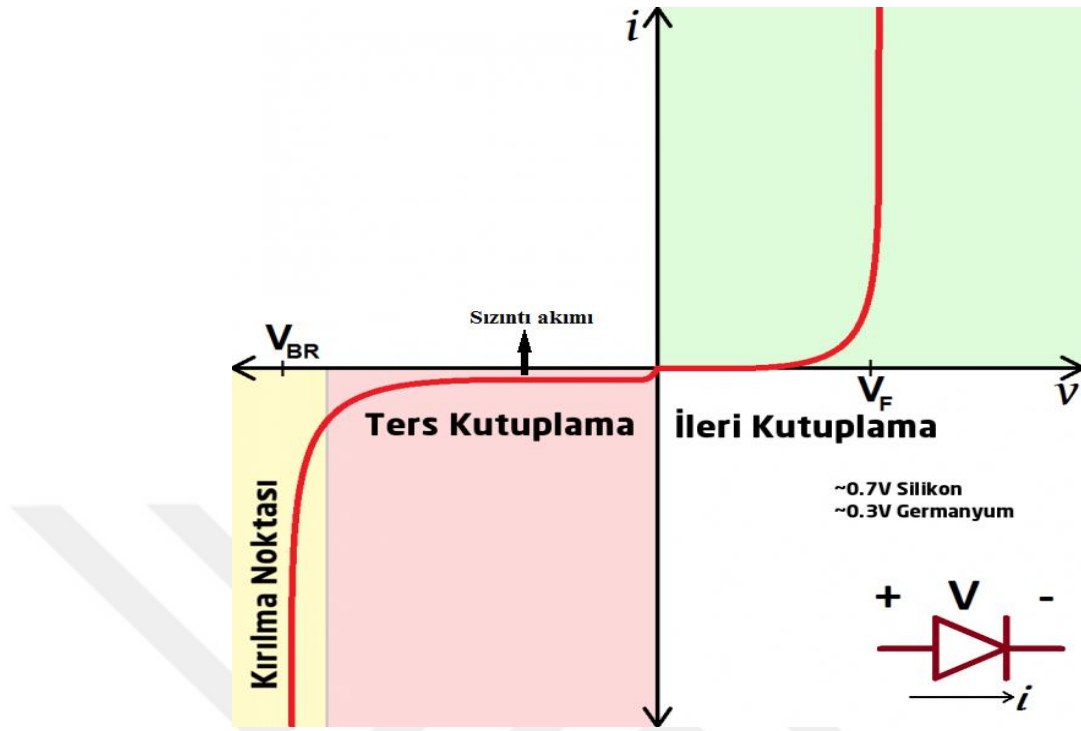
$$dn = 2 \left(\frac{m_n^*}{h} \right)^3 e^{\left(\frac{\phi_b}{h}\right)} e^{\left(\frac{-m_n^* V^2}{2kT}\right)} 4\pi V^2 dV \quad (2.23)$$

elde edilir. Bu denklem V ile $V+dV$ arasında hızları değişen elektron sayısı hakkında bilgi verir.

2.6. Fotodiyot

Schottky diyotlarda akımın meydana gelebilmesi için, yarıiletken kısımdan metal kısma ya da metal kısımdan yarıiletken tarafına doğru bir elektron hareketinin oluşması gerekir. Bu elektron hareketinin oluşabilmesi için elektronların mevcut potansiyel engelini aşacak kadar enerjiye sahip olmaları durumunda bir elektron akışı (net akım) meydana gelir. Bu elektron hareketi ancak dışarıdan uygulanan bir etki ile (sıcaklık, ışık vb.) mümkün olabilmektedir. Bir yarıiletkenin yüzeyine ışık fotonu gönderildiğinde, yarıiletkenin değerlik bandında bulunan elektronlar ile etkileşim (kırılma, yansıma, soğurma vb.) haline girerler. Yarıiletkenin değerlik bandında bulunan bu elektronlar uygulanan foton enerjisi ile değerlik bandından iletim bandına geçebilirler. Elektronların değerlik bandından iletkenlik bandına geçebilmeleri için, değerlik bandı ile iletkenlik bandı arasında kalan yasak enerji aralığının enerjisine eşit veya daha büyük bir enerji kazanmaları ile mümkün olabilmektedir.

Fotodiyotlar (fotodetektör, fotosensör veya ışık detektörü) yüzeylerine gelen ışık enerjisini elektrik enerjisini çevirirler. Metal iletken pozitif bir gerilim, yarıiletken negatife bir gerilim uygulandığı takdirde doğru (ileri) besleme durumunda iken yarıiletken pozitif, metal iletken negatife bir gerilim uygulandığında da ters besleme durumu olarak adlandırılır. Fotodiyotlar ters beslemede çalışabilecek şekilde tasarlanırlar. İleri besleme durumunda engel potansiyeli azalırken, ters (geri) besleme durumunda engel potansiyeli artar ve bunun sonucunda doğrusal olmayan akım-gerilim ilişkisi gözlenir (Şekil 2.18). Fotovoltaik malzemeler fotodiyotların birer çeşididir. Fotodiyotlar ışığa karşı (fotonlara) oldukça duyarlıdırlar. Yüzeylerine düşen foton demetlerini elektrik akımına dönüştürürler.



Şekil 2.18. Yarıiletken diyodun ters polarlama ve doğru polarlama karakteristiği

Bir Schottky diyot, ters besleme yapıldığında çok az bir elektrik akımı elde edilir. Fotodiyotlarda elektrik akımı üretebilmek için, fotodiyotun tüketim bölgesine foton veya ışık enerjisi göndererek yük taşıyıcılarının oluşturulması gerekmektedir. Schottky diyotun yüzeyine bir ışık enerjisi uygulanması durumunda, tüketim bölgesindeki tüm değerlik elektronları enerji kazanır. Fotodiyota verilen ışık enerjisi yarıiletkenin yasak enerji aralığından büyük ise, değerlik bandında bulunan elektronları atomlarından kopartarak serbest hale geçirir. Elektronlar değerlik bandından ayrılınca yerlerinde bir boşluk oluşur. Geride kalan serbest elektron ve oyuklar birer çift meydana getirir. Azınlık taşıyıcılarına tüketim bölgesinden ve dış elektrik alan kısımları nedeniyle bir kuvvet etki eder. Bu durumun sonucu olarak değerlik bandında bulunan serbest elektronlar n bölgesine doğru hareket ederler. n bölgesinde toplanan bu elektronlar, bataryanın pozitif kutbu sebebiyle çekilirler. Benzer biçimde oyuklar da elektronların tersi yönüne doğru hareket ederler.

Günümüzde fotodiyotlar üzerine akademik alanda çok çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Orak *et al.*, (2017) yaptıkları ZnO/n-Si katkılı fotodiyot çalışmasında üretilen diyotun doyum akımını $8,99 \times 10^{-9}$ A, idealite faktörü (n) ve engel yüksekliği

(Φ_B) yi de sırasıyla; 2,49 eV ve 0,77 eV bulmuşlardır. 100 mW/cm² ışık yoğunluğu altında açık devre voltajı 342 mV, kısa devre akımı 34,7 μ A ölçülmüş sırasıyla dolgu faktörü (FF) ve verim %32 ve %0,48 bulunmuştur.

Çavaş (2017) yapmış olduğu fotodiyot çalışmasında, spin coting yöntemini kullanarak Al/p-Si/ZnO/Al diyotunu üretmiştir. Üretmiş olduğu diyotun 100 mW/cm² ışık yoğunluğu altında ters yön akımını 1.8×10^{-3} A bulmuştur. Yaptığı bu çalışmada, Yasak enerji bandını 3,35 eV, idealite faktörünü 4,5 eV, diyot engel yüksekliğini 0,72 eV olarak hesaplamış ve ZnO ara yüzeyinin geçirgenlik oranını %85 bulmuştur. Ayrıca ZnO ince filmin nanofiber olduğunu göstererek, üretilen bu diyotun fotodiyot olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Bu çalışmamda iki farklı yöntem ile arayüzey malzemesi %5 Cu katkılı NiO ve %5Ni katkılı CuO kullanılarak üretilen Schottky diyotların fotodiyot özelliklerinin belirlenmesi için yapılmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kullanılan Malzemeler ve Temizlik Prosedürü

Öz direnç değeri 1 ile 10 Ω -cm arasında olan ve (100) yönelimine sahip p-tipi silisyum (Si) kristali ile cam altlık tabakaların temizlenmesi için, cam altlık ve silisyum altlıklar 1.0x2.0 cm²'lik parçalar halinde kesildikten sonra ayrı ayrı deiyonize su, aseton (CH₃COCH₃) ve izopropil alkol içerisinde 10'ar dakika ultrasonik temizleyicide yıkandılar. Her bir yıkamadan sonra sırasıyla deiyonize su, aseton ve izopropil alkol içerisinde durulandılar. En son olarak 150 °C'de fırın (ISOTEX) içerisinde 5 dakika kurutma işlemi yapılarak p-tipi Silisyum (p-Si) ile altlık cam tabaka temizleme işlemleri sonlandırılmıştır.



Şekil 3.1. p-tipi silisyum (Si) kristali ile cam altlık temizleme ve kurutma işlemleri

Şekil 3.1'de 1.0x2.0 cm²'lik parçalar halinde kesilen cam altlık ve p-Si altlıkların ultrasonik olarak temizlenmesi ile 150 °C'deki fırın içerisinde kurutma işlemleri gösterilmiştir.

3.2. Çözelti Hazırlama İşlemleri

Hazırlanacak çözeltinin molaritesi (M) 0,05 molar alınmış, tüm hesaplamalar buna göre yapılmıştır. %5 Nikel (Ni) Katkılı CuO çözeltisi ve %5 Bakır (Cu) katkı NiO çözeltisi olmak üzere iki farklı çözelti hazırlanmıştır.

3.2.1. %5 Nikel (Ni) katkılı CuO çözeltisinin hazırlanışı

Hazırlanan çözeltide bakır kaynağı olarak bakır nitrat ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), nikel (Ni) kaynağı olarak ise nikel(II) asetat tetrahidrat ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4\text{Ni} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) kullanılmıştır. Çözücü olarak etilen glikol monometil eter ($\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$) seçilmiştir.

Öncelikle 0,302 gr bakır nitrat ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) hassas terazide tartılarak, 15 ml etilen glikol monometil eter içerisinde karıştırılmıştır. Oluşturulan bu çözelti, Şekil 3.2’de gösterildiği gibi manyetik karıştırıcı üzerinde 400 d/dk hızda ve 60 °C sıcaklıkta 3 saat boyunca karıştırılmıştır.



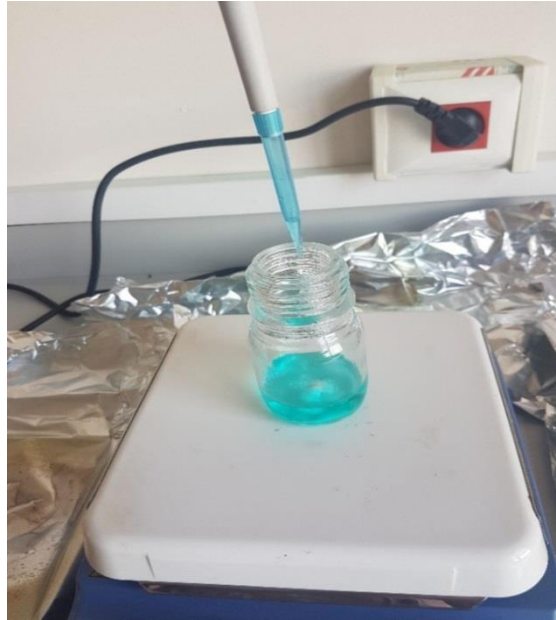
Şekil 3.2. CuO çözelti oluşumu (400 d/dk hızda ve 60 °C sıcaklıkta)

%5 Ni katkısı için 0,017 gr nikel(II) asetat tetrahidrat 5 ml etilen glikol monometil eter içerisinde çözülmüş ve elde edilen bu çözelti Şekil 3.3’te görüldüğü üzere manyetik karıştırıcı üzerinde 400 d/dk hızda ve 60 °C sıcaklıkta 3 saat boyunca karıştırılarak NiO çözeltisi elde edilmiştir.



Şekil 3.3. %5Ni katkısı için NiO çözelti oluşumu (400 d/dk hızda ve 60 °C sıcaklıkta)

Şekil 3.4'te gösterildiği üzere, 0,121 ml (3-4 damla) dietanolamin (DEA), 5 ml etilen glikol monometil eter içerisinde yaklaşık 5 dk boyunca karıştırılarak DEA çözeltisi hazırlanmıştır.



Şekil 3.4. Ni:CuO Çözeltisine damla damla dietanolamin (DEA) damlatılması

Sonuç olarak %5 Ni katkısı için Şekil 3.3'te hazırlanan NiO çözeltisi, Şekil 3.2'de hazırlanan CuO çözeltisi ile karıştırılmış ve bu karışım manyetik karıştırıcı

üzerinde 400 d/dk hızda ve 60 °C sıcaklıkta karıştırılırken, hazırlanan DEA çözeltisi Şekil 3.4'te gösterildiği gibi mikro pipet ile damla damla olacak şekilde oluşan çözeltiye damlatılmıştır.



Şekil 3.5. %5 Ni katkılı CuO çözeltisine DEA damlatıldıktan sonraki son hali

DEA damlatıldıktan sonra çözelti renginin açık maviden koyu maviye döndüğü Şekil 3.5'te gösterilmiştir. En son olarak hazırlanan bu çözelti 400 d/dk hız ve 60 °C sıcaklıkta 12 saat boyunca karıştırılmış ve karıştırma işlemi bittikten sonra oluşan çözelti 6 saat boyunca dinlendirilerek film çözeltisi elde edilmiştir.

3.2.2. %5 Bakır (Cu) katkılı NiO çözeltisinin hazırlanışı

Hazırlanan çözeltide nikel kaynağı olarak nikel(II) asetat tetrahidrat ($C_4H_6O_4Ni \cdot 4H_2O$), bakır kaynağı olarak bakır nitrat ($Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$) ve çözücü olarak ise etilen glikol monometil eter ($CH_3OCH_2CH_2OH$) kullanılmıştır.

Öncelikle 0,311 gr nikel(II) asetat tetrahidrat 15 ml etilen glikol monometil eter içerisinde çözdürülmüş ve bu çözelti manyetik karıştırıcı üzerinde 400 d/dk hızda ve 60 °C sıcaklıkta 3 saat boyunca karıştırılarak NiO çözeltisi elde edilmiştir. %5 Cu katkısı için 0,014 gr bakır nitrat hassas terazide tartılarak, 5 ml etilen glikol monometil eter içerisinde karıştırılmış ve bu karışım manyetik karıştırıcı üzerinde 400 d/dk hızda ve 60 °C sıcaklıkta 3 saat boyunca karıştırılarak CuO çözeltisi elde edilmiştir. Ardından

kararlılık için yine 0,121 ml (3-4 damla) DEA, 5 ml etilen glikol monometil eter içerisinde yaklaşık 5 dk boyunca karıştırılarak DEA çözeltisi oluşturulmuştur.

Sonuç olarak %5 Cu kaynağı için hazırlanan CuO çözeltisi ile daha önce hazırlanan NiO çözeltisi karıştırıldı. Bu karışım manyetik karıştırıcı üzerinde 400 d/dk hızda ve 60 °C sıcaklıkta karıştırılırken, hazırlanan DEA çözeltisi damla damla olacak şekilde mikro pipet aracılığıyla oluşan son çözeltiye damlatıldı. Bu şekilde hazırlanan çözelti 12 saat boyunca karıştırıldı ve oluşan çözelti 6 saat dinlendirilerek film yapmaya hazır hale getirildi.

Literatür çalışmaları incelendiğinde ince film yapımında NiO'ya Cu katkılama üzerine pek fazla çalışma görülmemekle birlikte bu konu üzerinde yapılmış çok fazla çalışma bulunmamaktadır. NiO'ya Cu katkılандığında hem Cu^{2+} 'nin hem de Ni^{2+} 'nin elektro negatifliği ve iyon yarıçapı aynı olduğu için NiO'nun kristal yapısındaki Ni^{2+} iyonları yerine Cu^{2+} iyonları geçebildiği için elektriksel özelliği arttırdığını göstermiştir (Demir, 2018).

3.3. Omik Kontak Yapılışı

Kullandığımız p-Si yarıiletken malzemenin alt tarafına omik kontak yapılabilmesi için termal buharlaştırma cihazı kullanılmıştır. Termal buharlaştırma için kullanılan maske, sırasıyla 5'er dakika olacak şekilde saflaştırılmış su, aseton ve izopropil alkol ile yıkanıp kurutulmuştur. Numuneler termal buharlaştırma cihazı içerisine düzgün bir şekilde yerleştirilip vakuma alınarak vakum 7×10^{-6} torr seviyesine ulaşınca omik kontak için yüksek saflıkta alüminyum metali (%99,95) silisyum (p-Si) kristalinin kontak yapılacak yüzeyine buharlaştırılmıştır. En son olarak tavlama işlemi için 550°C sıcaklığa ayarlanan fırın içerisine konularak 3 dakika boyunca azot ortamında tavlandı ve omik kontak işlemi tamamlanmıştır. Omik kontak yapım işlemi bitirildikten sonra ara yüzey malzemesi olarak hazırlanan %5 Nikel (Ni) katkılı CuO ile %5 Bakır (Cu) NiO çözeltileri ile kaplama işlemine geçildi.

3.4. Filmlerin Altlık Yüzeylerine Büyütülmesi

Laboratuvar ortamında hazırlanan %5 Nikel (Ni) katkılı CuO çözeltisi ile %5 bakır (Cu) katkılı NiO çözeltisi hem döndürmeli kaplama yöntemi hem de püskürtme yöntemi kullanılarak daha önce saf su, aseton ve propanol ile yıkanan cam altlık ve silisyum altlıklar üzerlerine uygulanarak ince filmler yapılmıştır.

3.4.1. Döndürmeli kaplama yöntemi ile ince film yapılması

Öncelikle döndürmeli kaplama cihazı 3000 d/dk hız ve 30 saniyeye ayarlanmış ve çözelti temas etmemesi için silisyum ve cam altlıkların alt kısımları bantlanmıştır. Cam altlıklar ve silisyum altlıklar sırasıyla döndürmeli kaplama cihazı üzerine bırakılmış ve sırasıyla cam altlıklar ve silisyum yüzeylerine hem %5 Ni katkılı CuO hem de %5 Cu katkılı NiO çözeltileri mikro pipet ile damlatılmıştır. Tüm yüzeylere damlatıldıktan sonra Şekil 3.6’da gösterildiği üzere 30 saniye boyunca 3000d/dk hızda döndürülmüştür.



Şekil 3.6. Döndürme kaplama yöntemi ile %5 Ni katkılı CuO ve %5 Cu katkılı NiO ara yüzeyli ince filmlerin yapılması

Döndürme kaplama işleminden sonra Şekil 3.7’de görüldüğü üzere numuneler 150 °C sıcaklıktaki fırına atılarak 5’er dakika kurutulmuştur. Bu şekilde devam edilerek toplam 3 katman filmler elde edilmiştir. En son katman atıldıktan sonra fırında 15 dakika boyunca kurutulmuş ve altlıkların alt kısımlarına yapıştırılan bantlar aseton yardımıyla üst yüzeye zarar vermeden çıkarılmıştır.



Şekil 3.7. Döndürme kaplama yöntemi ile ince filmleri yapılan numunelerin 150 °C sıcaklıktaki fırında kurutulması

3.4.2. Püskürtme yöntemi ile ince film yapılması

Püskürtme işleminden önce ısıtıcı altlığın sıcaklığı 390 °C'ye ayarlanmıştır. Cam altlık ve silisyum altlıklar ısıtıcı altlık üzerine bırakılarak bu şekilde 15 dk ısıtılmış ve hazırlanan %5 Ni katkılı CuO ve %5 Cu katkılı NiO çözeltileri sırasıyla 15'er ml iki parfüm şişesi içerisine ayrı ayrı konularak Şekil 3.8'de gösterildiği gibi spreysel şişesi 30-35 cm uzaklıkta sabit tutularak cam altlık ve silisyum altlıklar üzerine sırasıyla birer saniye aralıklarla 1 dakika boyunca püskürtülüp 1 dakika beklenerek filmler elde edilmiştir. Püskürtme işlemleri bittikten 5 dakika sonra ısıtıcı altlık kapatıldı ve soğuması için 1 saat beklenmiştir.

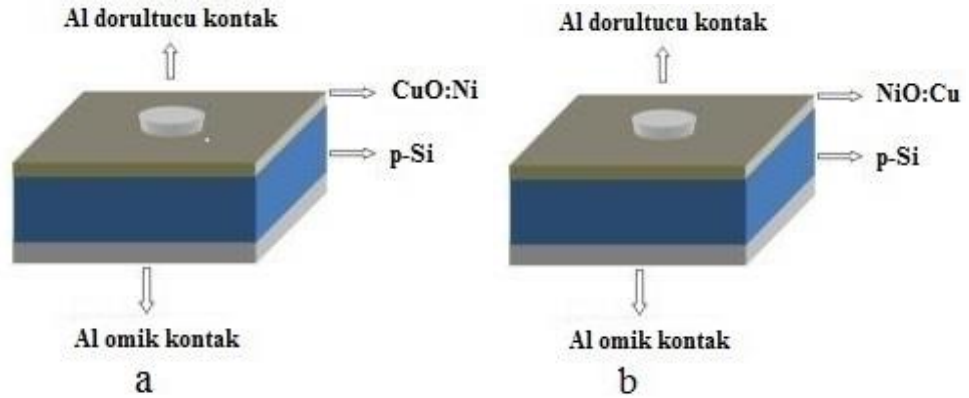


Şekil 3.8. Püskürtme yöntemi ile %5 Ni katkılı CuO ve %5 Cu katkılı NiO ara yüzeyli ince filmlerin yapılışı

Bu şekilde ayrı ayrı olarak Al/p-Si/CuO:Ni ve Al/p-Si/NiO:Cu olmak üzere iki farklı ince film yapısı üretilmiştir. Hem döndürmeli kaplama yöntemiyle hem de püskürtme yöntemiyle elde edilen filmler tavlama fırınında 550 °C sıcaklıkta hava ortamında bir saat tavlansmıştır.

3.5. Schottky Diyotların Elde Edilmesi ve Elektriksel Ölçümlerinin Alınması

Kaplama işlemi ile hazırlanan %5 Ni katkılı CuO ve %5 Cu katkılı NiO ince filmlerin doğrultucu kontak yapım aşamasına geçilmiştir. Doğrultucu kontak yapım işlemine başlamadan önce kullanılacak maske 5' er dakika sırasıyla deiyonize edilmiş su, aseton ve propanol ile yıkama prosedür işleminden geçirilerek maske fiziksel kirlere arındırılmıştır. Hazırlanan Al/p-Si/CuO:Ni yüzeyli birinci numune termal buharlaştırma cihazına yerleştirilip $3,5 \times 10^{-6}$ torr basınçta, 26 V ve 0,3 A'de kızarıklık, 36 V'ta termal buharlaşma gözlemlenerek Al buharlaştırılmıştır. Buharlaştırma işleminden sonra Şekil 3.10'da gösterilen şematik diyagramdaki Al/p-Si/CuO:Ni/Al diyot yapısı elde edilmiştir. Aynı şekilde hazırlanmış olan Al/p-Si/NiO:Cu yüzeyli ikinci numune termal buharlaştırma cihazına yerleştirilip $6,6 \times 10^{-6}$ torr basınçtaki vakum 32 V'da kızarıklık gözlenerek 40 V'da termal buharlaşma gözlemlenmiştir. Al buharlaştırma işleminden sonra Şekil 3.8b'de gösterilen şematik şekildeki Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyot yapısı elde edilmiştir.



Şekil 3.9. a) Al/p-Si/CuO:Ni/Al diyot b) Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyotun şematik gösterimleri

3.6. Karakterizasyon Yöntemler

3.6.1. X Işını Kırınımı (XRD)

Bu yöntem ile numunelerin fiziksel özellikleri, kimyasal kompozisyonları ve kristal yapıları elde edilebilir. Numuneye zarar vermeden ölçüm yapılabilmesi bu yöntemin en önemli özelliğidir. Kırınımaya uğrayan X ışınlarının yoğunluğunun gözetlenmesinde bu yöntem kullanılır. Polarizasyon, kırınım açısı, enerji değişkenleri veya dalga boyu kullanılarak bu gözlemler yapılır (Orak, 2013). Bu yöntem ile nitel ve nicel incelemeler için Rikagu SmartLab X-ışını difraktometresi cihazı kullanılmıştır. Cam üzerine elde edilen Si altlıklarla beraber elde edilen %5 Ni katkılı CuO ve %5 Cu katkılı NiO ince filmlerinin kristal yapıları test edilmiştir.

3.6.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

İnsan gözünün göremediği küçüklükteki görüntüleri ayrıntılı olarak daha net görebilmek için bazı cihazlar geliştirilmiştir. Günümüz teknolojisinde kullanılan bu cihazlardan biri de taramalı elektron mikroskobu (SEM) dur. İlk olarak SEM cihazı, 1935 yılında Max Knoll tarafından yapılan ilk gözlemden bu zamana kadar çok uzun bir tarihe sahip olup, 1965 yılında Cambridge Scientific Instrument Company tarafından ticari amaçlı olarak geliştirilmiştir. Yarıiletken karakterizasyon araçları içerisinde en yaygın olarak kullanılan cihazlardan biridir. Teknolojik gelişmelere bağlı olarak zamanla farklı özellikler kazanmıştır. SEM, yüksek gerilimde numune yüzeyinin hızlandırılmış elektronlar ile taranması metodu ile çalışır. Birincil elektronlar numune yüzeyine çarparak enerjilerini esnek bir biçimde diğer elektronlara transfer ederler.

Rastgele saçılma yöntemi ile numune yüzeyinden ayrılan bazı elektronlar bir detektör tarafından kaydedilirler. Genellikle birkaç angströmden küçük olan ve derinliklerden gelen elektronlar bu detektör tarafından kaydedilir. SEM’de görüntüleri elde edebilmek için elektron demeti uyartımı ile numune yüzeyindeki atomlardan yayılan ikincil elektronlardan (SEI) ve geri yansıyan elektron görüntülerden (BSE) yararlanılır. Elektron demetlerinin yüzeye gelme açısı ve yüzey morfolojisine bağlı olarak numune yüzeyinin farklı noktalarında kopan ikincil elektron sayısı değişim gösterir. Uygun yüzey morfolojisi, ışık (katon ışını), X ışınları, ikincil elektron ile geri olarak saçılan elektronlar (BSE), aktarılan elektronlar ve numune akımı ile sinyaller elde edilerek analizler yapılır. %5 Ni katkılı CuO ve %5 Cu katkılı NiO numunelerinin yüzeylerinin morfolojik incelenmesi için bu çalışmamda Jeol Jsm-6510 marka SEM cihazı kullanılmıştır.

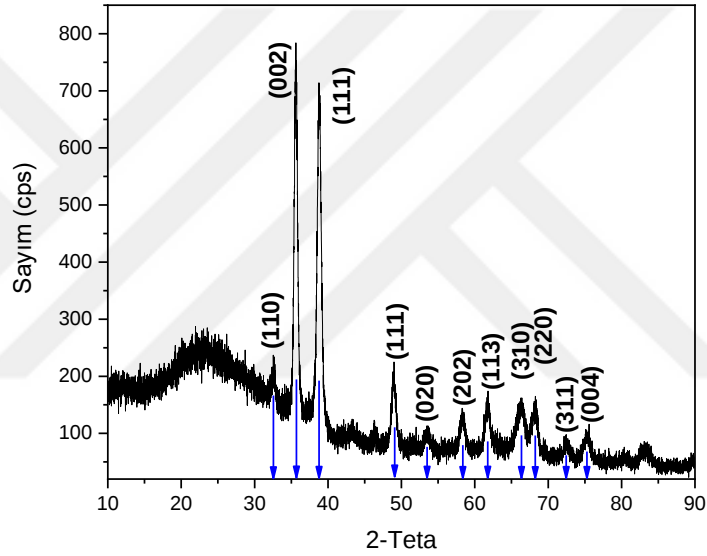
3.6.3. Elektriksel Ölçümler

Hazırlanmış olan diyotların I-V değerleri için Keithley 2400 güç kaynağı ve güneş simülatörü kullanılmış tüm diyotlar için karanlık ortam ve 30 mW/cm², 40 mW/cm², 60 mW/cm², 100 mW/cm² ışık şiddetleri altında I-V ölçümleri alınmıştır. Labview programı kontrolünde güç kaynağı ile uygulanan gerilim ve akım kontrol edilmiştir. Sıcaklık kontrol ünitesi ve kriyostat cihazı ile her iki diyotun I-V ölçümleri 60K-320K sıcaklık değerleri arasında sıcaklığa bağlı değişimleri belirlenmiştir. Ayrıca, 1 kHz-5000 kHz aralığında kapasitans-voltaj (C-V) ve kondüktans-voltaj (G-V) ölçümleri için, HP 4192 A LF empedans Analizör ölçüm cihazı kullanılmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. XRD Ölçümleri ve Analizler

Elde edilen Al/p-Si/CuO:Ni/Al ve Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyotların %5 Ni katkılı CuO ve %5 Cu katkılı NiO ara yüzey tabakalarının kristal yapılarını test etmek için, öncelikle cam altlıklara büyütülen %5 Ni katkılı CuO ve %5 Cu katkılı NiO XRD cihazıyla 10-90 derece tarama aralığında analiz edilmiştir. Şekil 4.1’de CuO:Ni Şekil 4.2’de NiO:Cu filmlerinin XRD grafikleri verilmiştir. Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de elde edilen her iki film yapısına piklere karşılık gelen açılar verilmiştir.

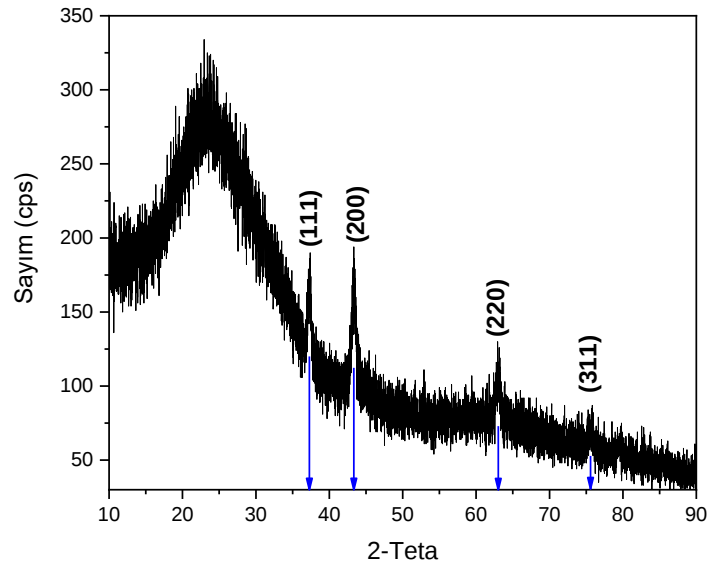


Şekil 4.1. 550°C’de tavllanmış CuO:Ni filmlerin XRD ölçümleri

CuO filminin XRD sonuçları incelendiğinde $2\theta = 35,70^\circ$ değerinde en şiddetli pik değerini aldığı ve oluşan pikin (002) yöneliminde olduğu görülmüştür. Verilen pik şiddetlerine karşılık gelen dereceler Çizelge (4.1)’ de gösterilmiştir. CuO ara yüzeyli ince filmler ile yapılan çalışmalar incelendiğinde pik değerleri ve açı değerlerinin hemen hemen literatürde CuO için belirlenen aynı değerlere denk geldiği görülmüştür (Akgul *et al.*, 2017; Bellal *et al.*, 2019; Dixit *et al.*, 2019). Bu sebeple XRD sonuçlarına göre elde edilen piklerden film yapısının oldukça kristal bir yapıya sahip olduğu ve Ni katkılı CuO filmlerinin başarıyla elde edildiği görülmektedir. Burada başka bir bileşiğe ait piklere rastlanmamıştır.

Çizelge 4.1. p-Si/CuO:Ni Schottky diyot için farklı pik değerlerine karşı gelen açı değerleri

Pik Değerleri	2θ Değerleri
(110)	32,56
(002)	35,70
(111)	38,80
(111)	48,92
(020)	53,52
(202)	58,39
(113)	61,76
(310)	66,36
(220)	68,26
(311)	72,47
(004)	75,28



Şekil 4.2. 550°C’de tavlanmış NiO:Cu filmlerin XRD ölçümleri

NiO filminin XRD sonuçları incelendiğinde $2\theta = 43,34^\circ$ değerinde en şiddetli pik değerini aldığı ve pikin (002) yöneliminde olduğu görülmüş ve verilen yönelimlere karşılık gelen dereceler Çizelge (4.2)’de gösterilmiştir. NiO ince filmi için elde edilen

XRD piklerinin literatür çalışmaları incelendiğinde pik değerlerine karşılık gelen açılar değerlerinin literatüre çok yakın değerler aldığı görülmektedir. (Das *et al.*, 2018; Aljuboory, M., S., H., 2018; Soylu *et al.*, 2018). Bu sebeple üretimi yapılan NiO:Cu film yapısının kristal bir yapıya sahip olduğu söylenebilir. Ayrıca burada NiO dışından malzemenin veya Cu'nun diğer bileşiklerine ait herhangi bir pik görülmemiştir. Buradan Cu katkılı NiO filmlerinin başarıyla elde edildiği söylenebilir.

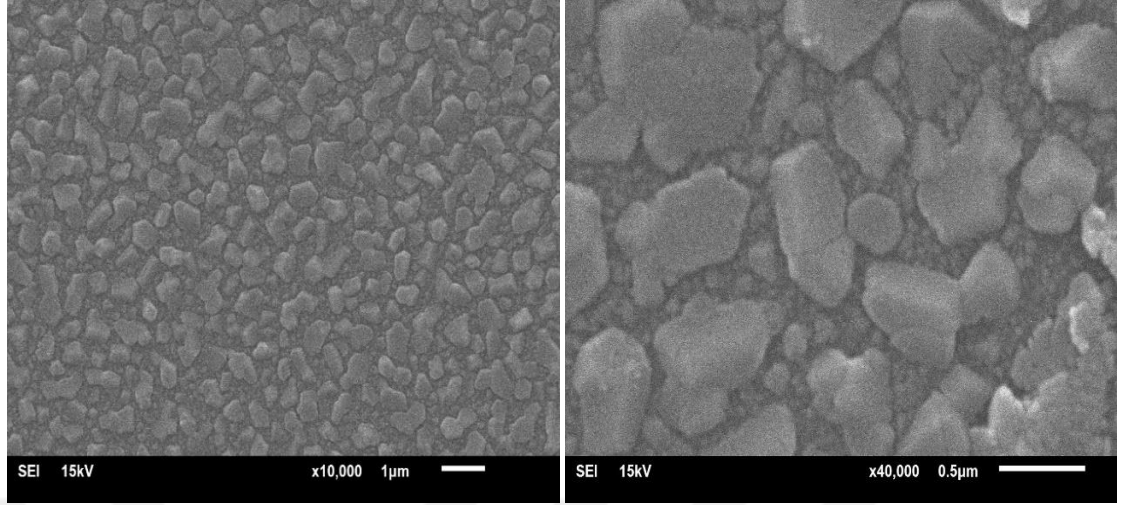
Çizelge 4.2. p-Si/NiO:Cu Schottky diyot için farklı pik değerlerine karşı gelen açılar değerleri

Pik Değerleri	2 θ Değerleri
(111)	37,29
(200)	43,34
(220)	63,02
(311)	75,60

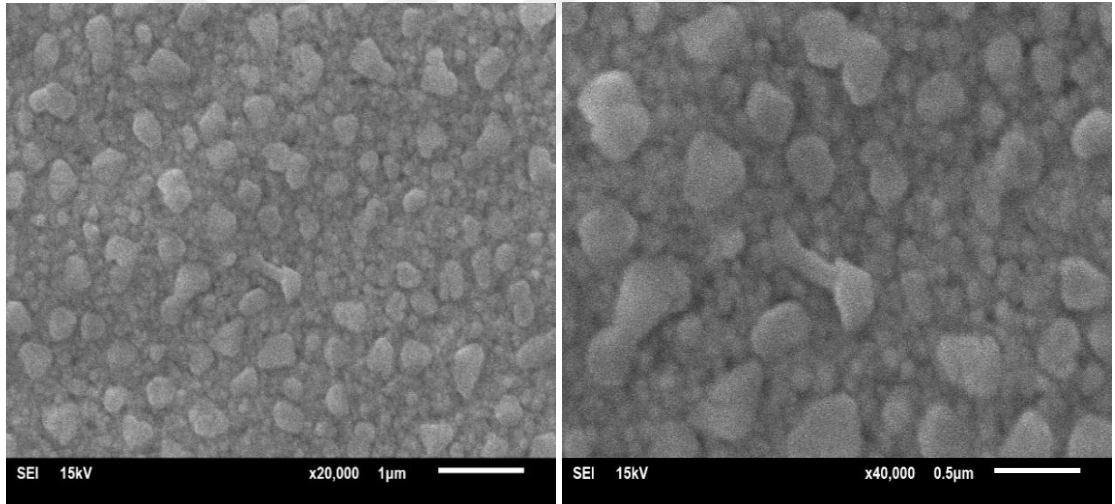
4.2. SEM Görüntüleri

4.2.1. %5 Ni katkılı CuO ile hazırlanan ince filmlerin SEM görüntüleri

Sırasıyla Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te cam yüzeylere sırasıyla döndürmeli kaplama ve püskürtme yöntemleri ile %5 Ni katkılı CuO kaplanarak hazırlanan ince filmlerin SEM görüntüleri verilmiştir. Elde edilen yüzey görüntülerinden filmlerin homojen bir yapıda olduğu ve görüntülerdeki tanecik yapıları arasında yer yer boşlukların bulunduğu görülmektedir. Şekil 4,3'te x10,000 büyütme oranına bakıldığında çakıl taşına benzer bir homojen dağılım görülürken daha yakınlştırılmış x40,000 büyütme oranındaki görüntüde değişik boyutlara sahip tanecikli yapılar (granüller) görülmektedir. Şekil 4.4'te yine püskürtmeli kaplama yönteminde homojen bir dağılım görülmekle birlikte x20,000 ve x40,000 büyütme şekilleri birlikte incelenecek olursa yoğun bir granül yapısı görülmektedir. Genel olarak küçük taneciklerin yoğunluğu fazla olmakla birlikte daha az yoğunlukta farklı şekil ve büyüklükte tanecik yapıları gözlenmektedir. Bu farklı büyüklükteki tanecikler ve boşluklar oluşan numunenin ısısal ve elektriksel iletkenliğini olumsuz etkileyebilmektedir (Yazıcı, 2007).



Şekil 4.3. Döndürmeli kaplama yöntemiyle elde edilen CuO:Ni filmlerinin çeşitli büyütme oranlarında SEM görüntüleri

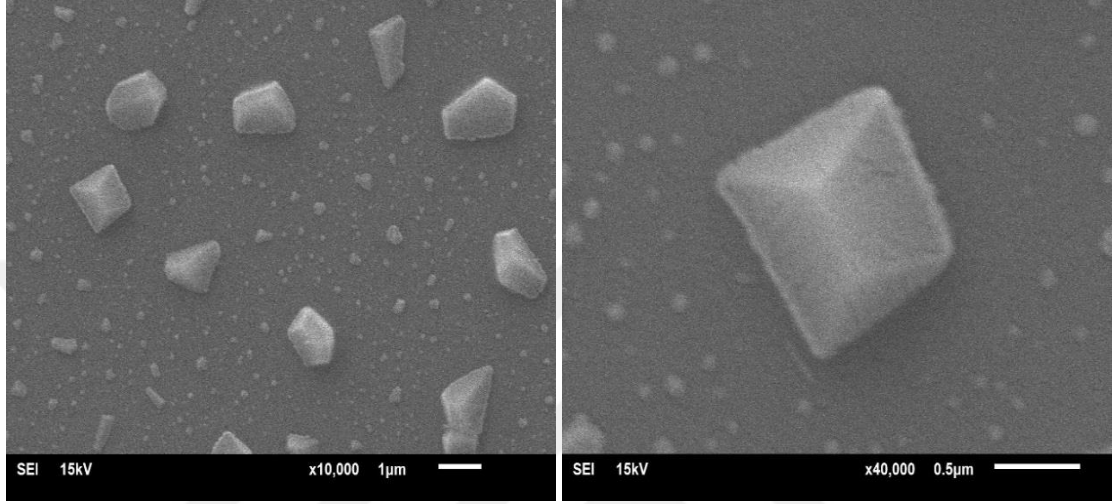


Şekil 4.4. Püskürtme yöntemiyle elde edilen CuO:Ni filmlerinin çeşitli büyütme oranlarında SEM görüntüleri

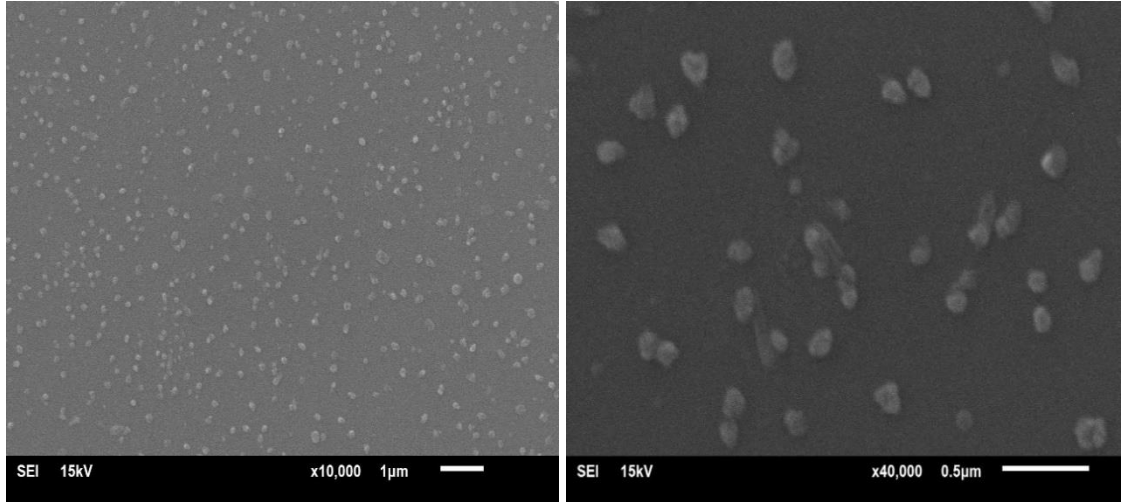
4.2.2. %5 Cu katkıli NiO ile hazırlanan ince filmlerin SEM görüntüleri

Sırasıyla Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da cam yüzeylere döndürmeli kaplama ve püskürtme yöntemleri ile NiO:Cu kaplanarak hazırlanan ince filmlerin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.5’te döndürme kaplama yöntemi kullanılarak oluşturulan numunede nano boyutunda farklı büyüklükte ve prizma şeklinde tanecikler görülmektedir. Şekil 4.6’da ise püskürtme yöntemi kullanılarak oluşturulan numunede nano boyutundaki taneciklerin daha düzgün bir yapıda dağıldıkları görülmektedir. Bu yapının SEM

görüntüleri incelenecek olursa genel olarak taneciklerin yaklaşık aynı büyüklük ve şekillerde oldukları görülmektedir. Yaklaşık aynı şekil ve büyüklükte olan nano boyutundaki bu tanecikli yapıların kompakt bir şekilde oldukları görülmektedir (Xi, *et al*, 2008).



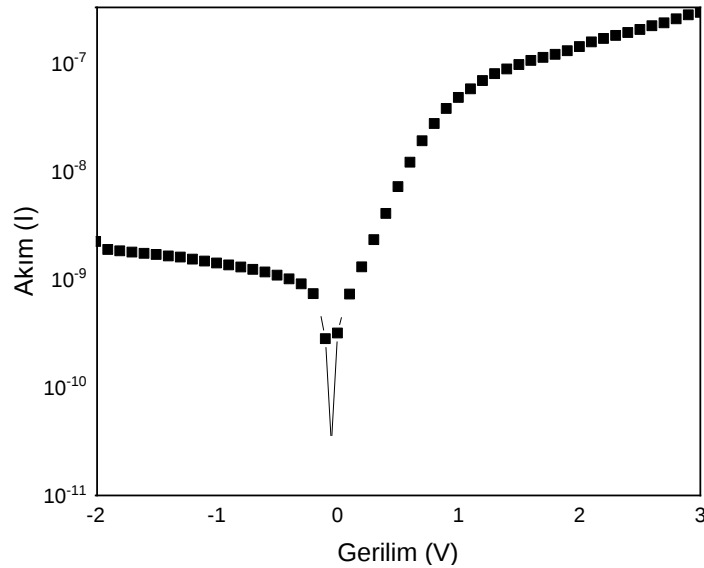
Şekil 4.5. Döndürmeli kaplama yöntemiyle elde edilen NiO:Cu filmlerinin çeşitli büyütme oranlarında SEM görüntüleri



Şekil 4.6. Püskürtme yöntemiyle elde edilen NiO:Cu filmlerinin çeşitli büyütme oranlarında SEM görüntüleri

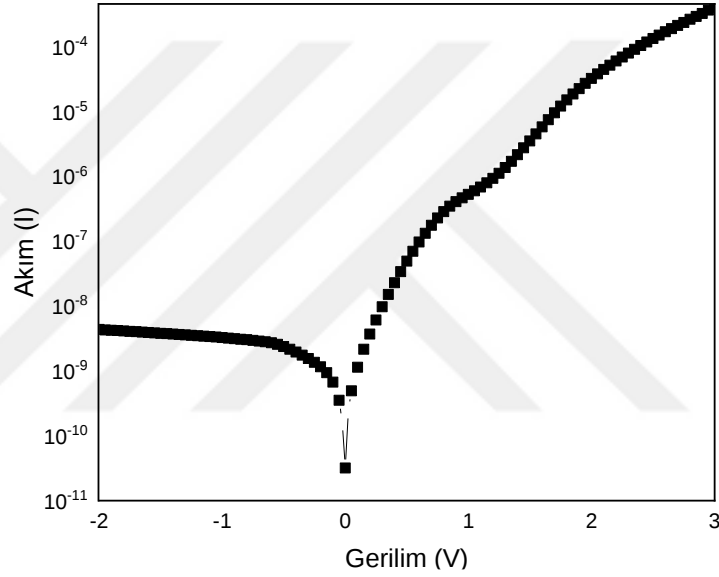
4.3. Üretilen Schottky Diyotların Akım-Gerilim Grafikleri ve Diyot Parametrelerinin Hesaplanması

Aşağıda Şekil 4.7’de döndürme kaplama yöntemi ile ince filmi yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky diyotun oda sıcaklığında ve karanlık ortamdaki I-V grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde ters besleme durumunda akımın kesime gittiği, düz besleme durumunda akımın iletimde olduğu ve iletimin çok az olduğu görülmektedir. İleri besleme yönünde ilk kırılmanın başladığı andan itibaren gerilim artışı ile akım artışı arasında lineer (doğrusal) bir değişim olup bu durumun çok kısa sürdüğü görülmektedir. Doğrusal yapının bükülmeye başladığı andan itibaren artan gerilim değerine bağlı olarak doğrusallığın bozulduğu ve artan gerilime oranla akımın çok az arttığı görülmektedir. Gerilim artış oranına karşın akım artış oranının çok az olması, artan gerilim ile direnç artışının tetiklendiğini göstermektedir. Seri direnç varlığının doğrusal bölgeye göre daha erken başlaması doğrusallığın çok kısa sürmesine sebep olmaktadır (Çetinkaya, 2011). Elde edilen diyot yapısının iyi bir doğrultma özelliğine sahip olduğu söylenebilir. Burada diyotun 1V’taki doğrultma oranı için bakılacak olursa ters besleme yönünde (-1V’de) $I=1,49 \times 10^{-9}$ A, ileri besleme yönünde (1V’de) $I=5,08 \times 10^{-8}$ A hesaplanmıştır. Bulunan bu değerler yerine yazılarak diyotun 1V’taki doğrultma oranı (RR) 35,9 bulunmuştur.



Şekil 4.7. Döndürme kaplama yöntemi ile ince filmi yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky diyot yapısının oda sıcaklığında ve karanlık ortamdaki I-V grafiği

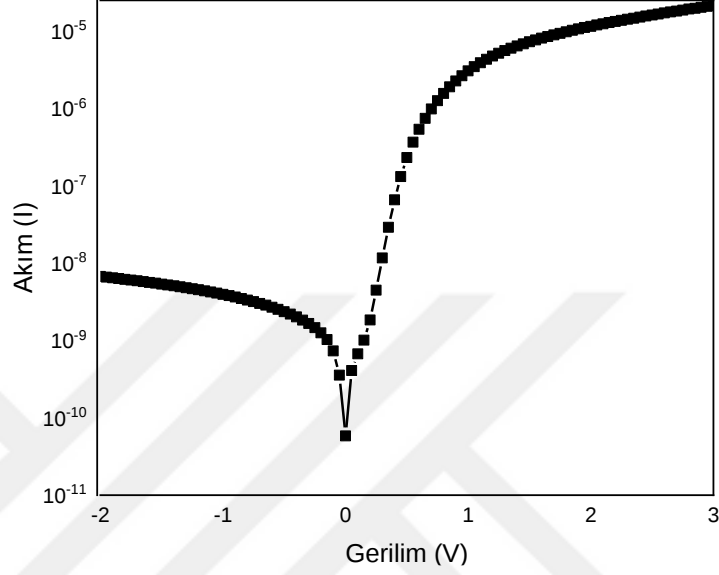
Şekil 4.8’de püskürtme yöntemi ile ince filmi yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky diyotun oda sıcaklığında ve karanlık ortamdaki I-V grafiği verilmiştir. Belirtilen I-V grafiği -2 ile +3 gerilim aralığında çizilmiştir. İlgili şekil incelendiğinde ters besleme yönünde akımın kesime gittiği, düz besleme yönünde ise iletimde olduğu görülmektedir. Döndürme yöntemiyle elde edilen Al/p-Si/CuO:Ni/Al diyot kadar iyi bir doğrultma göstermediği ve klasik ideal diyottan uzak bir görünümde olduğu söylenebilir. Bu durumun nedeni ara yüzey durumları ve homojen olmayan ara yüzeye bağlanabilir (Akgül, 2015).



Şekil 4.8. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky diyot yapısının oda sıcaklığında ve karanlık ortamdaki I-V grafiği

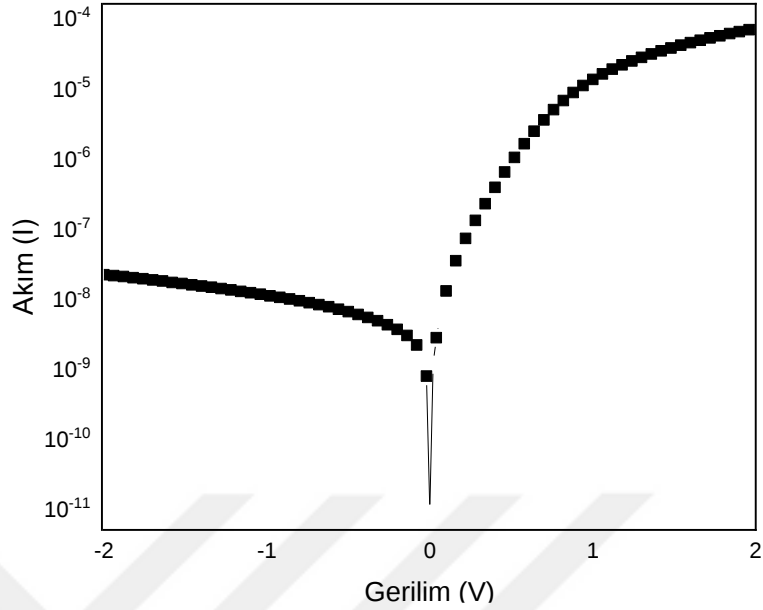
Şekil 4.9’da döndürme kaplama yöntemi ile ince filmi yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapısının oda sıcaklığında ve karanlık ortamda I-V grafiği verilmiştir. Burada akımın ters beslemede kesime gittiği, düz beslemede iletimde olduğu görülmektedir. Düz besleme tarafında artan gerilime bağlı olarak akımın ilk anda iyi bir doğrultma gösterdiği ve kırılma anından itibaren kısa süreli lineer (doğrusal) yapıda olduğu görülmektedir. Sonrasında artan gerilim oranının akım artışı oranından çok fazla olması, gerilim artışının direnç artışına sebebiyet verdiğini göstermektedir. Bu direnç seri direnç olup, seri direnç varlığının daha erken etkisini göstermesi sebebiyle doğrusallığın daha kısa sürmesine neden olduğu söylenebilir. I-V grafiği incelendiğinde üretilen Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyot yapısının klasik Schottky diyot

benzeri davrandığı söylenebilir. Diyotun 1V'taki doğrultma oranı (RR) 813,90 bulunmuştur.



Şekil 4.9. Döndürme kaplama yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapısının oda sıcaklığında ve karanlık ortamdaki I-V grafiği

Şekil 4.10'da püskürtme yöntemi ile ince filmi yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapısının oda sıcaklığında ve karanlık ortamdaki I-V grafiği verilmiştir. Burada akım ters beslemede kesimde düz beslemede iletimdedir. Düz besleme tarafında gerilim artışına bağlı olarak akımın ilk kırılmaya uğradığı ana kadar iyi bir doğrultma gösterdiği görülmektedir. Akımın ilk kırılmaya başladığı andan itibaren akım ile gerilim arasında kısa süresi bir doğrusal durum oluşmaktadır. Oluşan doğrusallığın kısa sürmesi seri direnç varlığının etkisini daha erken göstermesine dayandırılabilir. I-V grafiği incelendiğinde üretilen Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyot yapısının klasik Schottky diyot benzeri davrandığı söylenebilir. Diyotun 1V'taki doğrultma oranı (RR) $1,23 \times 10^3$ bulunmuştur.



Şekil 4.10. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapısının oda sıcaklığında ve karanlık ortamdaki I-V grafiği

Hazırlanmış olan Al/p-Si/CuO:Ni/Al ve Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyot yapılarının önce I-V karakteristik ölçümleri alınarak grafikleri çizildikten sonra engel yüksekliği ve idealite faktörü gibi parametreler hesaplanmıştır. lnI-V grafiğinin düz besleme tarafında kırılmanın başladığı ve kısa sürdüğü bu doğrusal yapının eğiminden idealite faktörü, bu eğimin y eksenini kestiği noktadan da engel yüksekliği değeri elde edilir. Diyotun ideal durumdan ne kadar saptığını gösteren parametreye idealite faktörü denir ve bu değer ideal Schottky diyot için 1'e eşittir. İdeallik faktörünün hesabı için akım denklemi olan Denklem (2.14) kullanıldı.

Düz besleme durumunda $eV \gg kT$ 'dir. Bu yüzden Denklem (2.14)'de 1 terimi ihmal edilip denklem düzenlendiğinde akım denklemi;

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

biçiminde verilir. Bu denklemde her iki tarafın logaritmasını alıp, V'ye göre türevleri alındığında idealite faktörü (n);

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d \ln(I)} \quad (4.2)$$

olarak bulunur. Çizilen I-V yarı logaritmik grafiğin düz besleme yönünde kırılma noktasından itibaren en uygun noktalar arasında bir doğrunun fit edilmesi ile ortaya çıkan doğrunun eğimi $dv/d(\ln I)$ bulunur. Burada fit edilen doğrunun $V=0$ 'da y eksenini kestiği nokta I_0 doyma akımıdır. Denklem (4.1)'de verilen I_0 doyma akımı;

$$I_0 = AA^* T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT}\right) \quad (4.3)$$

denklemleriyle bulunur. Bu denklemde eşitliğin her iki tarafındaki ifadelerin logaritması alınıp Φ_B 'ye göre düzenlenirse;

$$\Phi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^* T^2}{I_0}\right) \quad (4.4)$$

denklemleriyle engel yüksekliği ifadesi bulunmuş olur. Bu denklemde k Boltzman sabitini ($8,625 \times 10^{-5}$ eV/K), A^* Richardson sabitini (p-tipi Si için $32 \text{ A/K}^2 \text{ cm}^2$), A diyotun etkin alanını ($7,85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$), T ise kelvin cinsinden sıcaklığı göstermektedir. Engel yüksekliği ve idealite faktörünün bu denklemlerle bulunması yöntemine termoionik emisyon yöntemi denir.

Hem Döndürme kaplama yöntemi hem de püskürtme yöntemiyle ince filmleri yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al ve Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapılarının idealite faktörleri ve engel yükseklik değerleri Denklem (4.2) ve Denklem (4.4)'teki ifadelerle göre elde edilmiş ve Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Sze(1981), ideal diyotlarda idealite faktörünün 1'e eşit olacağını söylemiştir. Yani idealite faktörü 1'e ne kadar yakın ise diyot o kadar ideale yakındır yorumu yapılabilir. Bu bilgiye dayanarak püskürtme yöntemi ile üretimleri yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al ve Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyot yapılarının döndürme yöntemi ile üretimi yapılan diyotlardan daha iyi sonuçlar verdiği söylenebilir. İdealite faktörleri ve engel yükseklikleri göz önünde bulundurularak üretimi yapılan diyotlar incelendiğinde, püskürtme yöntemi kullanılarak üretilen Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyot yapısının üretilen diyotlar içerisinde ideale en yakın diyot yapısı olduğu görülmektedir. Bu diyot yapısına kıyasla döndürme yöntemi ile üretimi yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al diyot yapısının idealite faktörünün çok büyük olduğu, dolayısıyla ideallikten çok fazla uzaklaştığı görülmektedir.

Çizelge 4.3. Al/p-Si/CuO:Ni/Al ve Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapılarının üretim yöntemi, idealite faktörü ve engel yükseklik değerleri

Diyot adı	Üretim Yöntemi	İdeallik faktörü (n)	Engel yüksekliği (eV) TE'den	Rs Norde'dan	Engel yüksekliği (eV) Norde'dan
Al/p-Si/CuO:Ni/Al	döndürme	5,65	0,82	16,77 MΩ	0,80
Al/p-Si/CuO:Ni/Al	püskürtme	2,14	0,77	94,44 kΩ	0,80
Al/p-Si/NiO:Cu/Al	döndürme	2,28	0,84	139,50 kΩ	0,94
Al/p-Si/NiO:Cu/Al	püskürtme	1,86	0,78	265,20 kΩ	0,80

Başka bir yöntem olan Norde denklemlerini kullanarak engel yüksekliği ve Seri direnç (R_s) hesaplanabilmektedir (Kocyigit *et al.*, 2017). Norde fonksiyonu Denklem (4.5)'e göre aşağıdaki denklem ile verilir.

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (4.5)$$

Bu denklemde γ değeri, idealite faktörü değerinden büyük en küçük tam sayı değeri olarak alınır. İdealite faktörü değeri, daha önce Denklem (4.2)'ye göre termoiyonik emisyon yöntemi ile bulunan değerdir. Denklem (4.5) yardımıyla Φ_B ve R_s değerleri yeniden düzenlenirse;

$$\Phi_B = F(V_0) + \left[\frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \right] \quad (4.6)$$

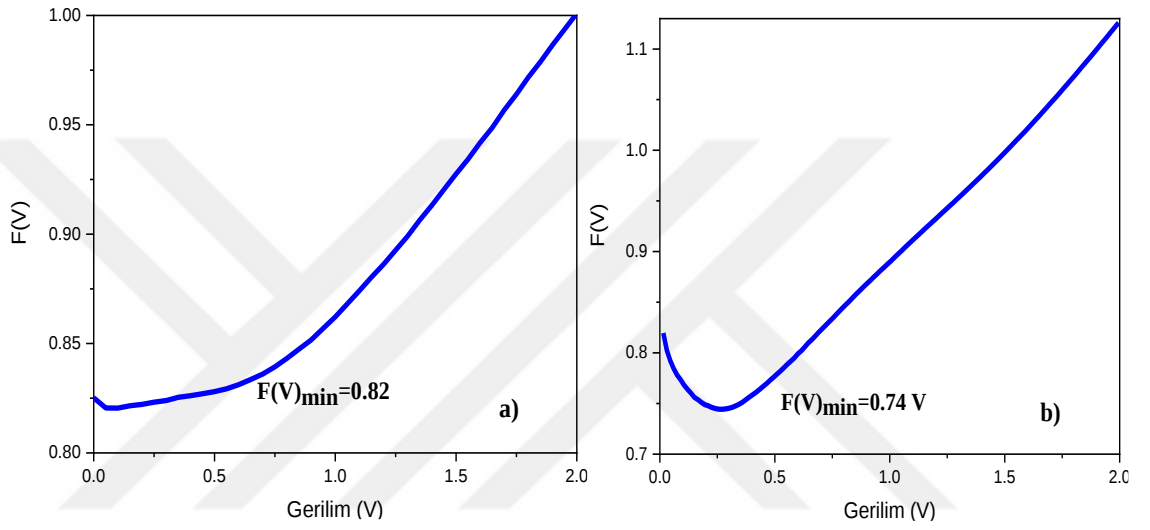
burada V_0 değeri, $F(V)$ - V grafiğinde en küçük $F(V)$ değerine karşılık gelen V değeridir. $F(V_0)$ değeri ise $F(V)$ - V grafiğinde minimum noktaya karşılık gelen $F(V)$ değeridir.

Norde yöntemine göre seri direnç (R_s);

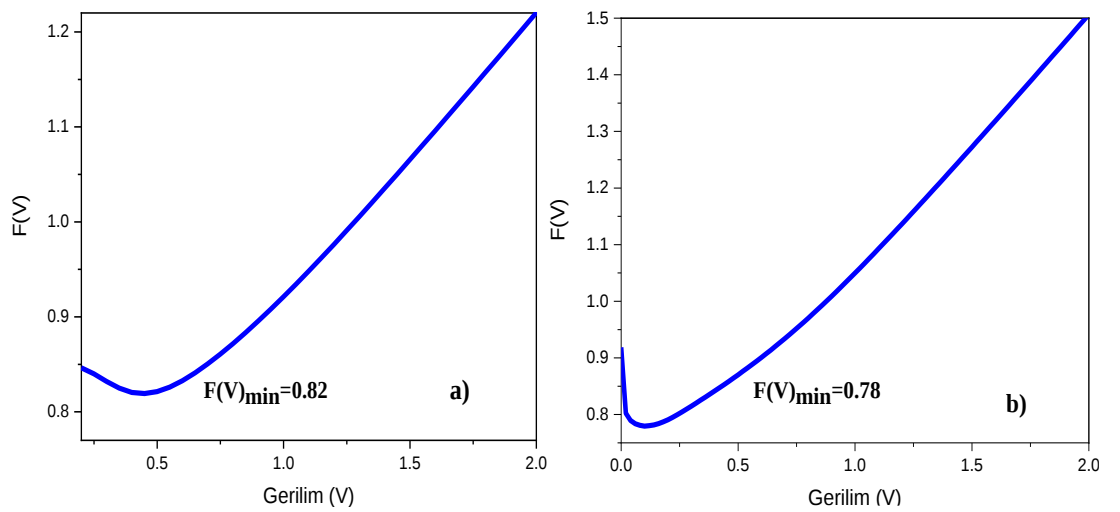
$$R_s = \frac{\gamma - n}{I_{min}} \frac{kT}{q} \quad (4.7)$$

denklemiyle bulunur. Denklem (4.7)'deki I_{min} değeri, $F(V)$ - V grafiğinde en küçük $F(V)$ değerine karşılık gelen V değerinin I-V ölçümlerindeki V değerine karşılık gelen en I değeridir.

Şekil 4.11a ve 4.11b’de sırasıyla döndürme kaplama ve püskürtme yöntemleri ile ince filmleri yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al diyotlarının, Şekil 4.12a ve 4.12b’de ise Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyotların ayrı ayrı $F(V)$ - V grafikleri verilmiştir. Elde edilen grafiklerin Norde fonksiyon grafiklerine oldukça uygun olduğu görülmektedir (Karabat ve Arsel, 2015b).



Şekil 4.11. Farklı yöntemler ile ince filmleri yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al diyotun $F(V)$ - V grafiği **a)** Döndürme kaplama yöntemi ile **b)** Püskürtme yöntemi ile



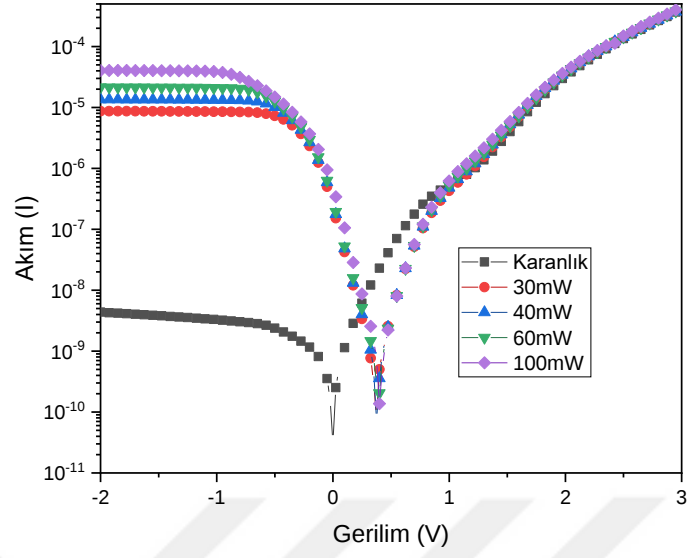
Şekil 4.12. Farklı yöntemler ile ince filmleri yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyotun $F(V)$ - V grafiği **a)** Döndürme kaplama yöntemi ile **b)** Püskürtme yöntemi ile

Yapılan hesaplamalar sonucunda döndürme kaplama yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al diyotun $F(V_0)$, V_0 değerleri sırasıyla 0,82 V ve 0,10 V iken püskürtme yöntemiyle ince filmi yapıldığında $F(V_0)$, V_0 değerleri sırasıyla 0,74 V ve 0,28 V bulunmuştur. Döndürme kaplama yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyotu için $F(V_0)$, V_0 değerleri sırasıyla 0,82 V ve 0,45 V bulunurken, püskürtme yöntemiyle ince filmi yapıldığında $F(V_0)$ ile V_0 değerleri sırasıyla 0,78 V ve 0,10 V bulunmuştur.

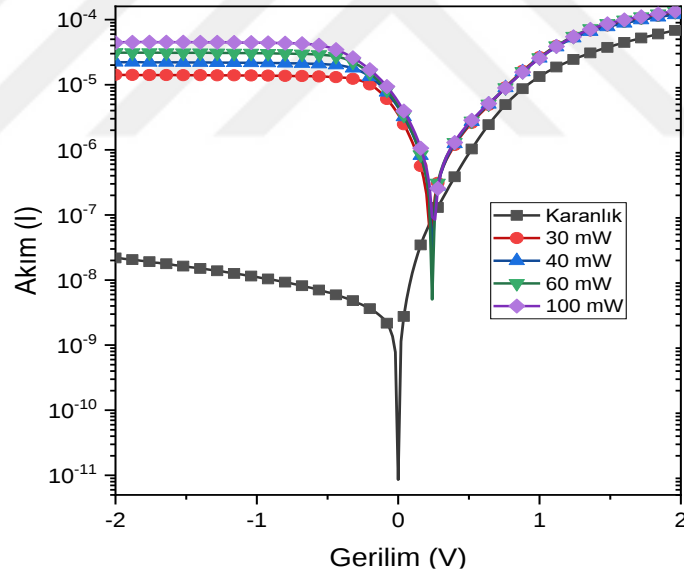
Döndürme kaplama ve püskürtme yöntemiyle ile ince filmleri hazırlanan Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky diyot yapıları ile Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapılarının idealite faktörü değerleri ile engel yüksekliği değerleri hesaplanmış ve çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Engel yüksekliği değerleri, hem termoiyonik emisyon yöntemi hem de Norde yöntemi ile bulunmuştur. Ayrıca Norde yöntemiyle Denklem (4.7)'de R_s direnç değerleri de verilmiştir. Sze (1981), ideal diyotlarda idealite faktörünün 1 değerine eşit olacağını söylemiştir. Bu bilgi doğrultusunda idealite faktörü değeri 1'e ne kadar yakın olursa diyot o kadar ideale yakın olur. Üretimleri yapılan diyotların idealite faktör değerlerinin 1'den büyük değerler aldığı görülmektedir. Bu konu hakkında (Tung, 1991), yapmış olduğu çalışmada metal-yarıiletken arasında oluşan doğal oksit tabakasının varlığına bağlamıştır. Metal-yarıiletken arasında bulunan doğal oksit tabakası varlığından dolayı idealite faktörü değerinin 1'den büyük olmasına sebep olmaktadır (Dağdelen and Özer, 2015). Al/p-Si/CuO:Ni/Al diyot yapısının idealite faktörünün Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyotunun idealite faktöründen daha büyük olduğu görülmektedir. Bu sonuçlara dayanarak Al/p-Si/CuO:Ni/Al diyot yapısındaki metal-yarıiletken arasına doğal oksit tabakasına ek yapay olarak metal yarıiletken arasına büyütülen CuO ve NiO tabakasının varlığına bağlanabilir. Ayrıca Çizelge 4.3'te görüldüğü üzere püskürtme yöntemi ile üretimini yapılan diyotların idealite faktörü değerlerinin ideale daha yakın değerler aldığı görülmektedir. Bu durum, SEM görüntülerinden de görüldüğü üzere püskürtme yöntemiyle yapılan ince filmlerin tanecik yapılarının yüzeye daha düzgün ve homojen dağılmasından kaynaklandığı sonucuna varılabilir (Sharma *et al.*, 2014).

4.3.1. Fotovoltaik ölçümler

Fotovoltaik numunelerin yüzeyine gelen ışık şiddeti arttıkça, aygıtın ara yüzey bölgesinde oluşan akım miktarı da buna bağlı olarak artar (Bhattacharya,1997). Aşağıda Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’ de sırasıyla püskürtme yöntemiyle elde edilen Al/p-Si/CuO:Ni/Al ve Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyotlarının karanlık ve aydınlık ortam 30-100 mW/cm² aralığındaki I-V grafikleri verilmiştir. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’te karanlık ortam ile ışık şiddeti 30-100 mW/cm² aralığında artırıldığında Al/p-Si/CuO:Ni/Al ve Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapılarının ters besleme yönünde akımlarının arttığı görülmektedir. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’te I-V grafikleri gösterilen Al/p-Si/CuO:Ni/Al ve Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyot yapılarına en büyük ışık şiddeti olarak 100 mW/cm² uygulanmıştır. Uygulanan en büyük ışık şiddeti altındaki ters besleme akımlarının karanlık ortama göre yaklaşık 10⁴ katına çıktığı görülmektedir. Bu durum ışığın absorbe edilmesi ile oyuk ile elektronların oluştuğunu ve üretilen akıma katkı sağladığını gösterir (Dere, 2018). Al/p-Si/CuO:Ni/Al ve Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyot yapıları için 100 mW/cm² ışık şiddeti altında -2V’de sırasıyla 4,45 x 10⁻² mA ve 5,04 x 10⁻² mA değerlerini aldıkları görülmektedir. Işık şiddetinin artışına bağlı olarak ters besleme akımının artması, üretilen Schottky diyot yapılarının fotodiyot özellikte olduğunu göstermektedir. Işık şiddeti arttıkça ters besleme yönündeki akımın artması üretilen diyotun fotodiyot özellikte olduğu yorumunu göstermektedir. Bu konuda elde edilen değerler, (Karabat ve Arsel, 2015; Kocyigit, *et al.*, 2017)’nin yapmış olduğu çalışmalarla uyumludur. Bu nedenle üretimini yapılan diyotların farklı uygulamalardaki optoelektronik devrelerde kullanılabilirler.



Şekil 4.13. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky diyot yapısının karanlık ortam ve değişik ışık şiddetleri altındaki I-V grafiği



Şekil 4.14. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapısının karanlık ortam ve değişik ışık şiddetleri altındaki I-V grafiği

Bu diyetlerin güneş enerjisine uyumluluğunu test etmek maksadıyla dolgu faktörü (FF) ve güneş pili verimliliği (η_p) aşağıdaki şekilde hesaplanır (Orak *et al.*, 2017):

$$FF = \frac{J_m V_m}{J_{sc} V_{oc}} \quad (4.8)$$

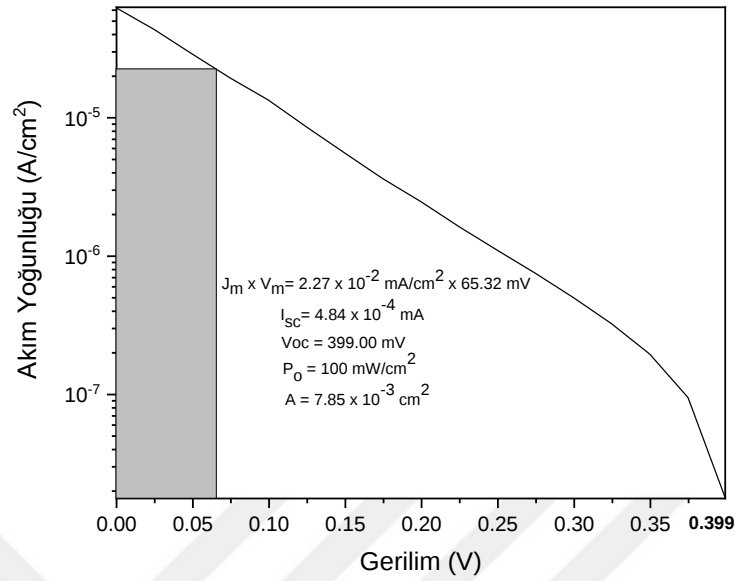
$$\eta_p = \frac{J_m V_m}{P_o} \quad (4.9)$$

Burada $J_m V_m$, J-V (akım yoğunluğu – gerilim) grafiğinde maksimum güç noktası değerini, P_o giriş ışık gücünü, J_{sc} kısa devre akım yoğunluğunu, V_{oc} açık devre voltajını gösterir. Burada çıkan verim hesabı çok hassas bir değerdir.

Çizelge 4.4 ve çizelge 4.5’te sırasıyla Al/p-Si/CuO:Ni/Al ve Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapılarının 30-100mW/cm² ışık şiddeti aralığındaki akım-gerilim ölçümlerinden kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre voltajı (V_{oc}), maksimum güç noktasındaki akım (I_{max}), maksimum güç noktasındaki gerilim (V_{max}), güneş pili verimi (η_p) ve dolgu faktörü (FF) değerleri verilmiştir. Çizelge 4.4’te görüldüğü üzere Al/p-Si/CuO:Ni/Al için 30 mW/cm² ışık şiddetinde I_{sc} akımı $2,28 \times 10^{-4}$ mA iken 100 mW/cm² ışık şiddetinde yaklaşık iki katına çıkarak $4,84 \times 10^{-4}$ mA değerine yükselmiştir. I_{max} değeri 30 mW/cm²’de $9,66 \times 10^{-5}$ mA iken 100 mW/cm² ışık şiddetinde $1,78 \times 10^{-4}$ mA değerine yükselmiş, V_{max} değeri aynı ışık şiddetlerinde 53,01 mV’tan 65,32 mV’ta yükselmiştir. Al/p-Si/CuO:Ni/Al için ışık şiddeti 30 mW/cm²’den 100 mW/cm²’ye çıkarıldığında güneş pili verimi $6,52 \times 10^{-4}$ ’ten %127,15 artarak $1,48 \times 10^{-3}$ ’e yükseldiği Çizelge 4.4’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky diyot yapısının 30-100 mW/cm² ışık şiddeti aralığında I-V grafiğinden çıkarılan I_{sc} , I_{max} , V_{oc} , V_{max} , ışığa karşı duyarlılık (η_p) ve dolgu faktörü (FF) değerleri

Işık Şiddeti (mW/cm ²)	I_{sc} (mA)	I_{max} (mA)	V_{oc} (mV)	V_{max} (mV)	Güneş pili verimi (%) (η_p)	Dolgu faktörü (%) (FF)
30	$2,28 \times 10^{-4}$	$9,66 \times 10^{-5}$	374,60	53,01	$6,52 \times 10^{-4}$	6,08
40	$2,63 \times 10^{-4}$	$1,07 \times 10^{-4}$	374,60	55,40	$7,48 \times 10^{-4}$	6,03
60	$2,90 \times 10^{-4}$	$1,01 \times 10^{-4}$	399,00	62,56	$8,13 \times 10^{-4}$	5,49
100	$4,84 \times 10^{-4}$	$1,78 \times 10^{-4}$	399,00	65,32	$1,48 \times 10^{-3}$	6,03



Şekil 4.15. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky diyot yapısının 100 mW ışık şiddeti altındaki J-V grafiği

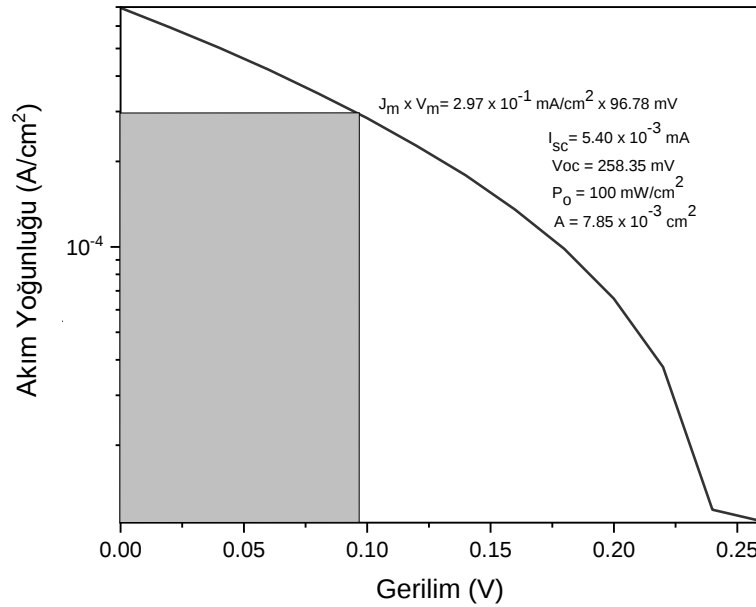
Şekil 4.15 grafiği incelendiğinde üretilen Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky diyot yapısının 100 mW ışık şiddeti altındaki kısa devre akımı $4,84 \times 10^{-4}$ mA, açık devre gerilimi 399 mV, dolgu faktörü (FF) % 6,01, Maksimum güç (P_{max}) noktasındaki akım yoğunluğu (J_{max}) değeri değeri $2,27 \times 10^{-2}$ mA, V_{max} değeri 65,32 mV olarak hesaplanmış olup Denklem (4.9)'da yerine yazılarak güneş pili verimi (η_p) $1,48 \times 10^{-3}$ olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.5'te Al/p-Si/NiO:Cu/Al için 30 mW/cm² ışık şiddetinde I_{sc} akımı $3,51 \times 10^{-3}$ mA iken 100 mW/cm² ışık şiddetinde $5,40 \times 10^{-3}$ mA değerine yükselmiştir. I_{max} değeri 30 mW/cm²'de $1,46 \times 10^{-3}$ mA iken 100 mW/cm² ışık şiddetinde $2,33 \times 10^{-3}$ mA değerine yükselmiş, V_{max} değeri aynı ışık şiddetlerinde 95,75 mV'tan 96,78 mV'ta yükseldiği görülmektedir. I_{max} ve V_{max} artışı üretilen maksimum gücün (P_{max}) artmasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla Işık şiddetinin artışına bağlı olarak üretilen P_{max} değeri artar. Denklem (4.9)'da değerler yerine yazılarak hesap yapıldığında ışık şiddetinin artışına bağlı olarak güneş pili verimi (η_p)'nin artacağı söylenebilir. Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyotu için ışık şiddeti 30 mW/cm²'den 100 mW/cm²'ye çıkarıldığında güneş pili verimi %52,63 artarak 0,019'dan 0,029'a yükseldiği Çizelge 4.5'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.5. Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapısının 30-100 mW/cm² ışık şiddeti aralığında I-V grafiğinden çıkarılan I_{sc} , I_{max} , V_{oc} , V_{max} , ışığa karşı duyarlılık (η_p) ve dolgu faktörü (FF) değerleri

Işık Ş iddeti (mW/cm ²)	I_{sc} (mA)	I_{max} (mA)	V_{oc} (mV)	V_{max} (mV)	Güneş pili verimi (%) (η_p)	Dolgu faktörü (%) (FF)
30	$3,51 \times 10^{-3}$	$1,46 \times 10^{-3}$	237,46	95,75	0,019	16,83
40	$4,48 \times 10^{-3}$	$1,99 \times 10^{-3}$	239,97	95,75	0,024	17,79
60	$4,76 \times 10^{-3}$	$2,08 \times 10^{-3}$	239,97	95,75	0,025	17,49
100	$5,40 \times 10^{-3}$	$2,33 \times 10^{-3}$	258,35	96,78	0,029	16,43

Çizelge 4.5 incelendiğinde üretimi yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapısının 30-100 mW/cm² ışık şiddeti aralığında, ışık şiddeti artırıldıkça kısa devre akımı (I_{sc}), maksimum güçteki akım değeri (I_m), ışığa karşı duyarlılık ya da veriminin (η_p) arttığı görülmektedir.

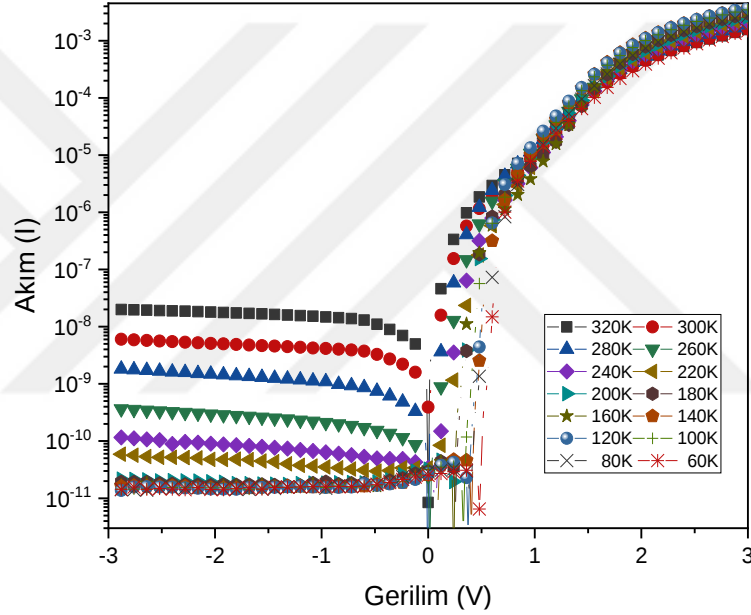


Şekil 4.16. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapısının 100 mW ışık şiddeti altındaki J-V grafiği

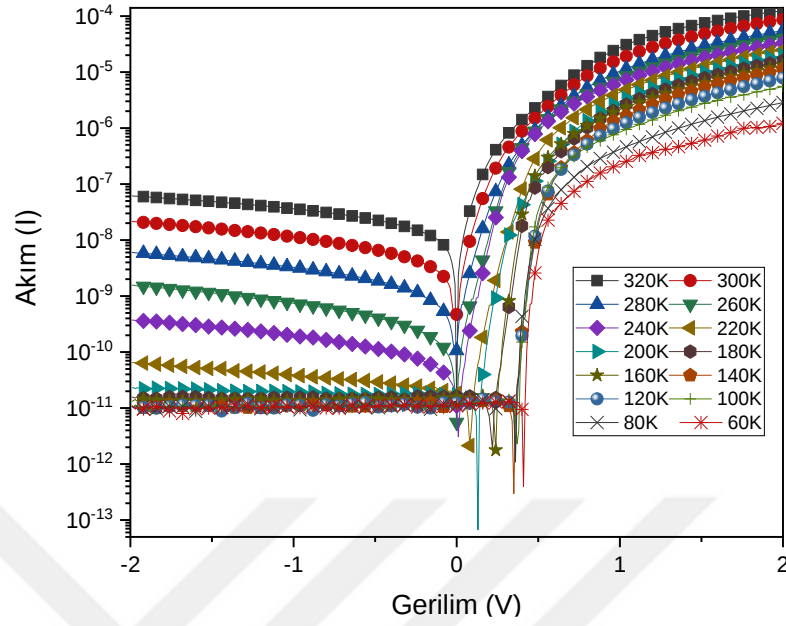
Şekil 4.16 grafiği incelendiğinde üretimi yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapısının 100 mW ışık şiddeti altındaki kısa devre akımı $5,40 \times 10^{-3}$ mA, açık devre gerilimi 258,35 mV, dolgu faktörü (FF) %16,43 Maksimum güçteki gerilim değeri 96,78 mV, güneş pili verimi (η_p) %0,029 olarak bulunmuştur.

4.3.2. Sıcaklığa bağlı değişimler

Fabrikasyonu yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al ve Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapılarının karanlık ortamda 60 K ile 320 K sıcaklık değerleri arasındaki farklı sıcaklıklarda I-V değişimleri aşağıda Şekil 4.17 ve şekil 4.18’de gösterilmiştir.



Şekil 4.17. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky diyot yapısının karanlık ortamda 60 K-320 K sıcaklık aralığındaki I-V grafiği



Şekil 4.18. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapısının karanlık ortamda 60 K-320 K sıcaklık aralığındaki I-V grafiği

Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'deki grafiklerde görüldüğü üzere fabrikasyonu yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al ve Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapılarının 60 K ile 320 K sıcaklık aralığında sıcaklık artırıldıkça ters besleme akımlarının arttığı görülmektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde sıcaklık artışına bağlı olarak ters besleme akımının artması literatür çalışmalarına uygundur. (El-Nahass *et al.*, 2011; Orak,*et al.*, 2015).

Al/p-Si/CuO:Ni/Al ve Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapılarının 60 K-320 K sıcaklık değerleri arasındaki farklı sıcaklık değerlerine karşılık gelen idealite faktörleri ve engel yükseklik değerleri Denklem (4.2) ve Denklem (4.4)'te ki ifadelerle göre hesaplanarak bulunmuş, sırasıyla Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky diyot yapısının farklı sıcaklık değerlerindeki idealite faktörü, engel yüksekliği ve doyma akımı değerleri

Numune Sıcaklığı (K)	İdealite faktörü (n)	Engel yüksekliği (Φ_b)	Doyma akımı (I_o)
60	2,50	0,63	$2,52 \times 10^{-8}$
80	2,46	0,68	$4,47 \times 10^{-9}$
100	2,40	0,69	$6,81 \times 10^{-9}$
120	2,39	0,69	$9,36 \times 10^{-9}$
140	2,39	0,70	$7,75 \times 10^{-9}$
160	2,36	0,72	$3,92 \times 10^{-9}$
180	2,33	0,73	$3,32 \times 10^{-9}$
200	2,30	0,74	$2,87 \times 10^{-9}$
220	2,29	0,79	$5,38 \times 10^{-10}$
240	2,27	0,80	$4,97 \times 10^{-10}$
260	2,25	0,81	$2,22 \times 10^{-10}$
280	2,21	0,80	$7,28 \times 10^{-10}$
300	2,14	0,77	$2,06 \times 10^{-9}$
320	2,07	0,76	$4,72 \times 10^{-9}$

Çizelge 4.7. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapısının farklı sıcaklık değerlerindeki idealite faktörü, engel yüksekliği ve doyma akımı değerleri

Numune Sıcaklığı (K)	İdeallik faktörü (n)	Engel yüksekliği (Φ_b)	Doyma akımı (I_o)
60	2,24	0,70	$1,33 \times 10^{-9}$
80	2,21	0,72	$9,26 \times 10^{-10}$
100	2,14	0,72	$1,83 \times 10^{-9}$
120	2,13	0,73	$1,46 \times 10^{-9}$
140	2,11	0,74	$1,36 \times 10^{-9}$
160	2,11	0,74	$1,90 \times 10^{-9}$
180	2,09	0,76	$1,03 \times 10^{-9}$
200	2,07	0,78	$5,96 \times 10^{-10}$
220	2,04	0,80	$3,47 \times 10^{-10}$
240	1,98	0,80	$3,77 \times 10^{-10}$
260	1,93	0,81	$3,45 \times 10^{-10}$
280	1,89	0,80	$5,81 \times 10^{-10}$
300	1,86	0,78	$1,85 \times 10^{-9}$
320	1,82	0,76	$4,81 \times 10^{-9}$

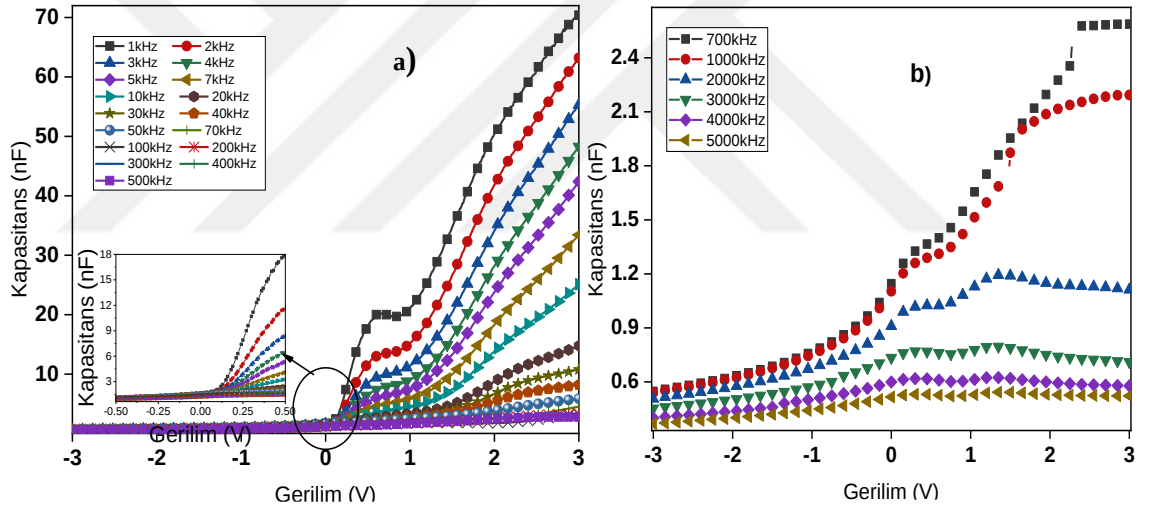
Genel olarak sıcaklığa bağlı I-V grafiklerinden idealite faktörü, engel yüksekliği, doyma akımı gibi değerler elde edilebilmektedir. Buna bağlı olarak sıcaklığa bağlı diyot değişimleri ve karakteristikleri belirlenmiştir. Termoyonik emisyon (TE) modeli sıcaklığa bağlı bir model olup bu modelde çoğunluk taşıyıcıları yeterli enerjiye sahip olarak Schottky engelini aşacak duruma gelmesiyle oluşur (Çatır, 2018). TE modeli incelendiğinde I-V değişim ve karakteristiklerinin sıcaklığa bağlı olduğu Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de Al/p-Si/CuO:Ni/Al ve Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyotları için gösterilmiştir.

İdeallik faktörü değeri 1 olması diyotun ideal diyot olduğunu gösterir, fakat çeşitli faktörler sebebiyle sapmalar gözlemlenebilir. İncelenen diyotlar üzerinde idealite faktörü değerinin 1’den büyük olmasının sebebi, metal-yarıiletken arasında bulunan ara

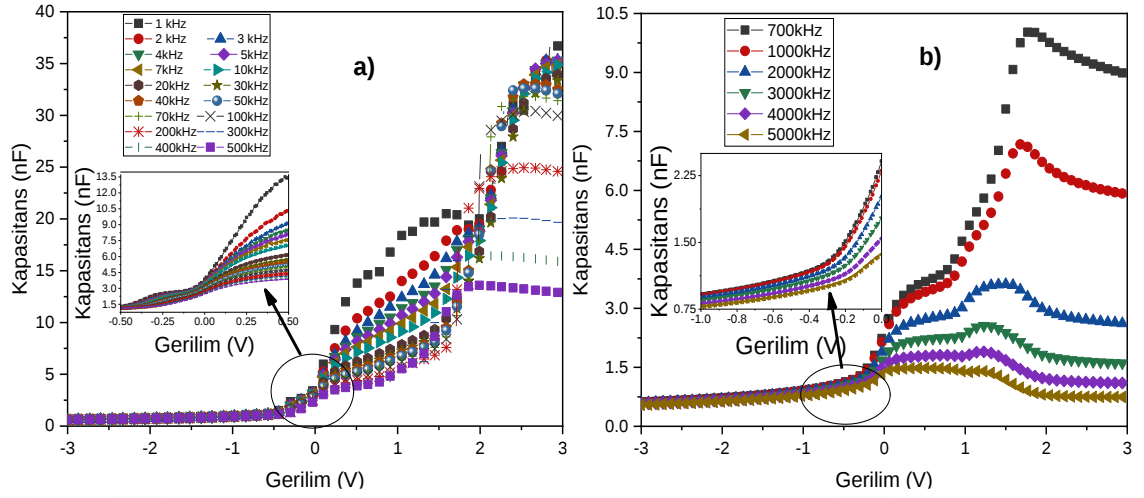
yüzey oksit tabakasının varlığının sonucudur (Orak, 2013). İdeallik faktörü değeri 1 değerinden ne kadar uzaklaşırsa diyot ideallikten o kadar uzaklaştığı söylenebilir. Çizelge 4.6 ile Çizelge 4.7’de ki veriler incelendiğinde idealite faktörü değerinin genel olarak sıcaklık artışına bağlı olarak azaldığı görülmektedir. Bu sebeple sıcaklık arttıkça diyotun ideallığa daha çok yaklaştığı söylenebilir.

4.3.3. Frekansa bağlı kapasite-gerilim (C-V) değişimleri

Al/p-Si/CuO:Ni/Al ve Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyot yapılarının oda sıcaklığında -3V ile +3V gerilim aralığında olacak şekilde 1 kHz-5000 kHz geniş bir frekans aralığındaki kapasitans (C)-gerilim (V) değişim grafikleri sırasıyla Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere kapasitans değerlerinin önemli ölçüde voltaj ve frekans değerine bağlı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.19. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky diyot yapısının oda sıcaklığı ve karanlık ortamda frekansa bağlı C-V grafiği **a)** 1kHz-500kHz frekans aralığında **b)** 700 kHz-5000 kHz frekans aralığında



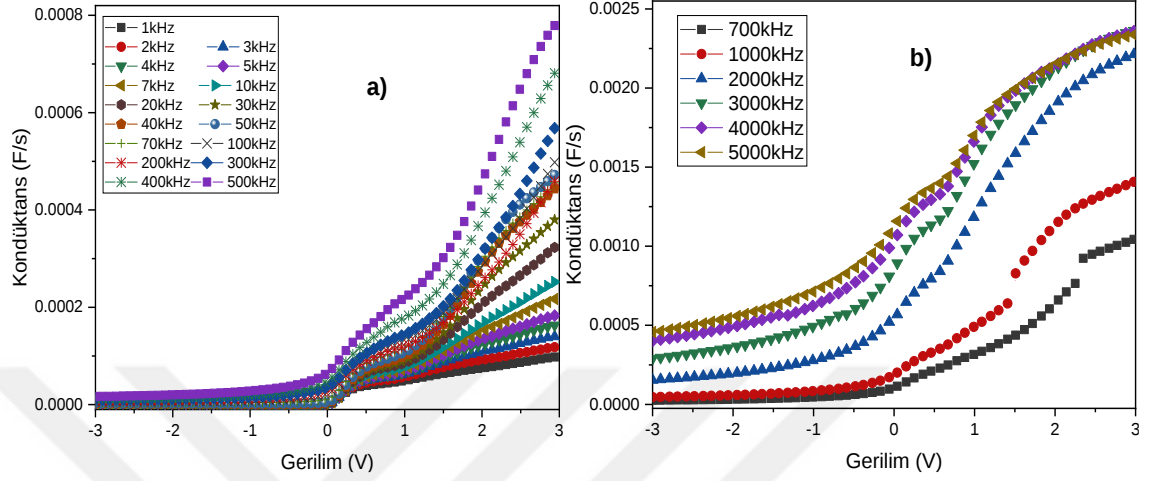
Şekil 4.20 Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapısının oda sıcaklığı ve karanlık ortamda frekansa bağlı C-V grafiği **a)** 10kHz-500kHz frekans aralığında **b)** 700 kHz-5000 kHz frekans aralığında

Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'deki grafikler incelendiğinde her bir grafikte tüketim, yığılma ve terslenim bölgeleri olduğu ve frekans değeri değiştiğinde C-V grafiklerinde özellikle yığılma ve tüketim bölgelerinde değişimlerin olduğu görülmektedir. Frekans değeri arttıkça tüketim bölgesi ile yığılma bölgesinde kapasite değerinin azaldığı ve sabit frekans değerindeki bir eğride kuvvetli yığılma bölgesinden kuvvetli terslenim bölgesine doğru gidildikçe kapasite değerinin azaldığı görülmektedir. Gerilim arttıkça kapasite değerinin belli bir noktaya kadar arttığı ve frekans değeri büyüdükçe kapasite değerinin daha küçük değerler aldığı görülmektedir. Tüketim bölgesi ve yığılma bölgelerinde meydana gelen değişimler ara yüzey durumları (N_{ss}) ve seri direnç (R_s) etkisine dayandırılabilir (Kınacı, 2017). Yüksek frekans bölgelerindeki C-V eğrilerinde ara yüzey durumları sebebiyle kapasitansa ihmal edilecek kadar az bir katkı gelir. Bu durum, yüksek frekans değerlerinde ara yüzey durumlarının alternatif akım sinyalini takip edememesi şeklinde açıklanabilir (Aras, 2015).

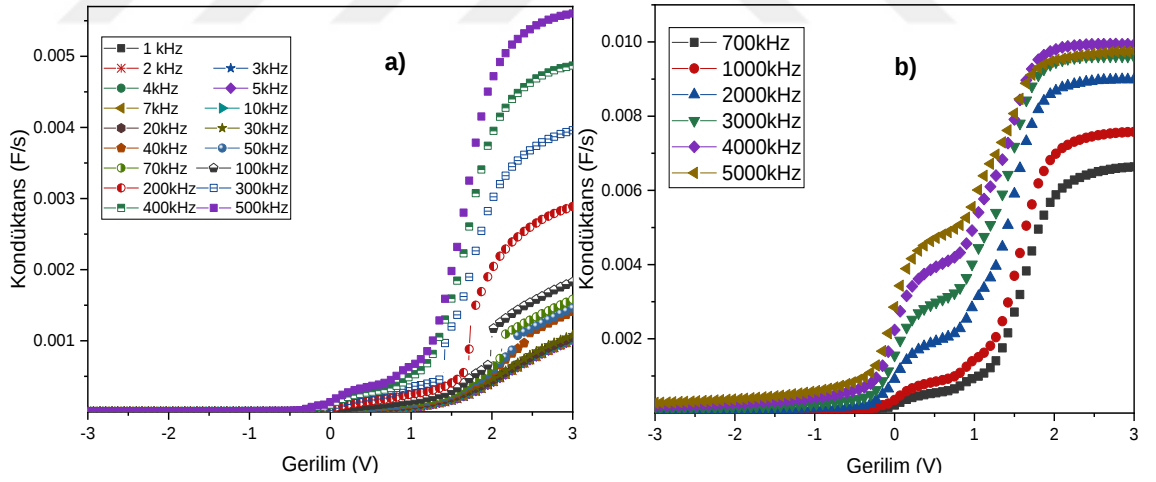
4.3.4. Frekansa bağlı kondüktans-gerilim (G-V) değişimleri

Elde edilen diyotların elektriksel özellikleri hakkında daha fazla bilgi edinebilmek amacıyla Al/p-Si/CuO:Ni/Al ve Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyot yapılarının kondüktans (iletkenlik)-voltaj değişimleri için -3V ile +3V arasında, 1 kHz-5000 kHz

geniş bir frekans aralığındaki G-V grafikleri sırasıyla Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



Şekil 4.21. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky diyet yapısının oda sıcaklığı ve karanlık ortamda frekansa bağlı G-V grafiği a) 1kHz-500kHz frekans aralığında b) 700 kHz-5000 kHz frekans aralığında



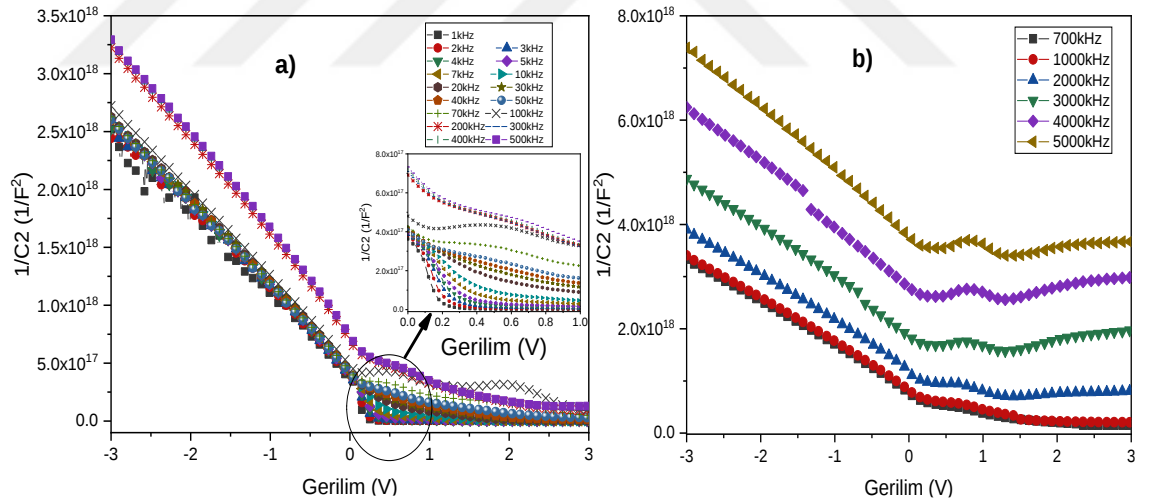
Şekil 4.22. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyet yapısının oda sıcaklığı ve karanlık ortamda frekansa bağlı G-V grafiği a) 1kHz-500kHz frekans aralığında b) 700 kHz-5000 kHz frekans aralığında

Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’deki grafikler incelendiğinde -3V ile +3V gerilim aralığında 1 kHz’den 5000 kHz’e frekans değiştirildiğinde gerilim değerinin artışına bağlı olarak iletkenliğin arttığı ve yüksek frekans değerlerinde iletkenliğin daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. Grafikler incelendiğinde negatif gerilimler ile çok küçük

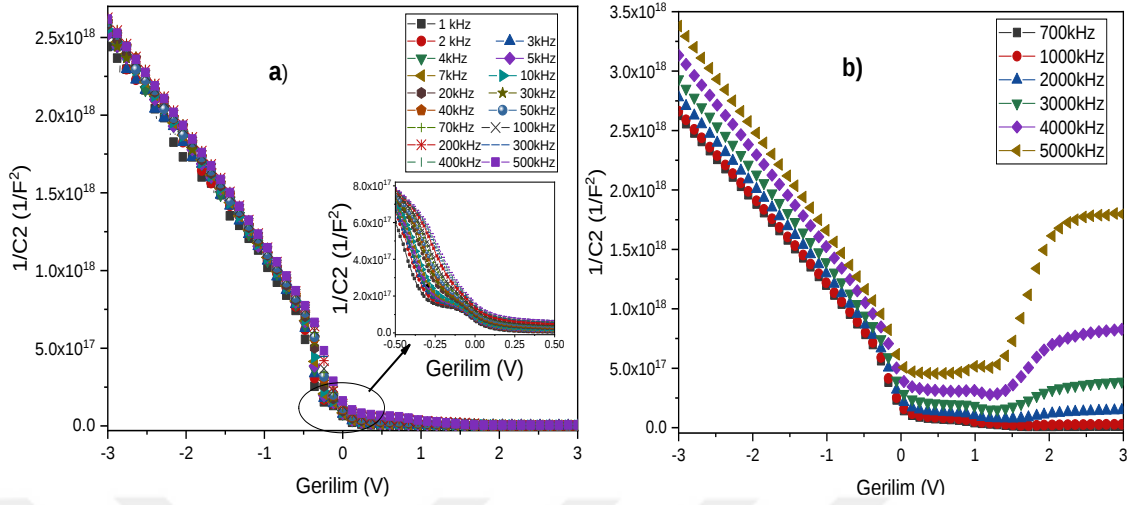
pozitif gerilim değerlerinde gerilim arttıkça iletkenlik artış değişiminin çok fazla olmadığı görülmektedir. Düşük gerilim değerlerinde daha yüksek frekanslarda iletkenliğin daha büyük değerler aldığı ancak iletkenliğin artış miktarının çok fazla olmadığı görülmektedir. Elde edilen grafiklerden görüldüğü üzere kondüktans değerinin frekansa bağlı olarak değiştiği görülmektedir (Çetinkaya *et al.*, 2019). C-V ve G-V grafiklerinde C değerinin yığılma bölgesinde en tepe noktasından itibaren azaldığı buna karşın G değerinin arttığı görülmektedir. Yığılma bölgesindeki bu tür C ve G değişimi seri direnç varlığı ve ara yüzey durumlarına atfedilebilir (Demirezen *et al.*, 2011). Düşük frekans değerlerinde N_{ss} değeri ac sinyali kolayca takip eder ölçüm değerlerinde ek bir kapasitans ve iletkenlik kazandırır.

4.3.5. Frekansa bağlı $1/C^2$ - V değişimleri

Püskürtme yöntemiyle üretilen yapıları Al/p-Si/CuO:Ni/Al ve Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyot yapılarının karanlık ortamda 1 kHz-5000 kHz frekans aralığında değişik frekans değerlerinde $1/C^2$ -V grafikleri çizdirilmiştir.



Şekil 4.23. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky diyot yapısının oda sıcaklığı ve karanlık ortamda frekansa bağlı $1/C^2$ -V grafiği **a)** 1kHz-500kHz frekans aralığında **b)** 700 kHz-5000 kHz frekans aralığında



Şekil 4.24. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapısının oda sıcaklığı ve karanlık ortamda frekansa bağlı $1/C^2$ -V grafiği **a)** 1kHz-500kHz frekans aralığında **b)** 700 kHz-5000 kHz frekans aralığında

Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'deki grafiklerde görüldüğü üzere negatif gerilim değerlerinde yaklaşık olarak lineer bir davranış göstermektedir. $1/C^2$ -V grafiği, 1 kHz-5000 kHz aralığındaki farklı frekans değerlerinde incelendiğinde frekansa bağlı değiştiği görülmektedir. -3V ile +3V arasındaki gerilim değerlerinde bakıldığında $1/C^2$ değeri frekans arttıkça daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. Hem Al/p-Si/CuO:Ni/Al hem de Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyot yapılarının $1/C^2$ -V grafiklerinden yararlanarak 1 kHz-5000 kHz frekans aralığında farklı frekans değerlerindeki V_d değerleri, N_A değerleri ve buna bağlı olarak W_d ve E_F değerleri hesaplanarak Çizelge 4.8 ile Çizelge 4.9'da ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.8. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky diyot yapısının 700kHz-5000kHz frekans aralığında C-V ölçümlerinden elde edilen bazı deneysel parametreler

f (kHz)	$N_{ss}(eV^{-1}cm^{-2})$	$N_A(cm^{-3})$	$W_d(cm)$	$E_F(eV)$	$\Phi_b(eV)$	$R_s(\Omega)$
1	$3,14 \times 10^{11}$	$2,74 \times 10^{17}$	$6,72 \times 10^{-6}$	0,046	0,92	481,03
2	$1,68 \times 10^{11}$	$2,72 \times 10^{17}$	$6,76 \times 10^{-6}$	0,046	0,93	181,41
3	$1,17 \times 10^{11}$	$2,70 \times 10^{17}$	$6,93 \times 10^{-6}$	0,046	0,97	127,33
4	$9,51 \times 10^{10}$	$2,68 \times 10^{17}$	$6,95 \times 10^{-6}$	0,046	0,97	109,21
5	$8,06 \times 10^{10}$	$2,65 \times 10^{17}$	$6,97 \times 10^{-6}$	0,046	0,97	102,74
7	$6,13 \times 10^{10}$	$2,64 \times 10^{17}$	$7,01 \times 10^{-6}$	0,046	0,98	99,63
10	$4,47 \times 10^{10}$	$2,65 \times 10^{17}$	$7,03 \times 10^{-6}$	0,047	0,98	100,57
20	$3,11 \times 10^{10}$	$2,63 \times 10^{17}$	$7,03 \times 10^{-6}$	0,047	0,98	93,90
30	$2,50 \times 10^{10}$	$2,64 \times 10^{17}$	$7,04 \times 10^{-6}$	0,046	0,99	92,12
40	$2,51 \times 10^{10}$	$2,62 \times 10^{17}$	$7,03 \times 10^{-6}$	0,046	0,99	101,39
50	$3,14 \times 10^{10}$	$2,64 \times 10^{17}$	$7,02 \times 10^{-6}$	0,046	0,99	131,90
70	$4,60 \times 10^{10}$	$2,58 \times 10^{17}$	$7,05 \times 10^{-6}$	0,046	0,99	111,46
100	$7,19 \times 10^{10}$	$2,63 \times 10^{17}$	$7,27 \times 10^{-6}$	0,047	1,03	120,16
200	$4,25 \times 10^{10}$	$2,61 \times 10^{17}$	$8,41 \times 10^{-6}$	0,050	1,25	26,59
300	$3,61 \times 10^{10}$	$2,63 \times 10^{17}$	$8,48 \times 10^{-6}$	0,050	1,26	15,22
400	$3,74 \times 10^{10}$	$2,64 \times 10^{17}$	$8,55 \times 10^{-6}$	0,050	1,27	11,97
500	$3,33 \times 10^{10}$	$2,64 \times 10^{17}$	$8,59 \times 10^{-6}$	0,050	1,28	1,02
700	$4,33 \times 10^{10}$	$2,64 \times 10^{17}$	$8,75 \times 10^{-6}$	0,050	1,33	8,00
1000	$5,68 \times 10^{10}$	$2,62 \times 10^{17}$	$8,86 \times 10^{-6}$	0,051	1,34	7,36
2000	$1,04 \times 10^{11}$	$2,54 \times 10^{17}$	$8,52 \times 10^{-6}$	0,051	1,21	9,66
3000	$9,51 \times 10^{10}$	$2,45 \times 10^{17}$	$7,69 \times 10^{-6}$	0,053	0,93	10,19
4000	$7,70 \times 10^{10}$	$2,34 \times 10^{17}$	$8,18 \times 10^{-6}$	0,055	0,99	9,55
5000	$6,37 \times 10^{10}$	$2,19 \times 10^{17}$	$7,74 \times 10^{-6}$	0,059	0,75	7,85

Çizelge 4.9. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapısının 700 kHz-5000 kHz frekans aralığında C-V ölçümlerinden elde edilen bazı deneysel parametreler

f (kHz)	$N_{ss}(eV^{-1}cm^{-2})$	$N_A(cm^{-3})$	$W_d(cm)$	$E_F(eV)$	$\Phi_b(eV)$	$R_s(\Omega)$
1	$6,40 \times 10^{11}$	$2,73 \times 10^{17}$	$6,48 \times 10^{-6}$	0,046	0,86	939,73
2	$3,68 \times 10^{11}$	$2,72 \times 10^{17}$	$6,66 \times 10^{-6}$	0,046	0,90	825,30
3	$2,46 \times 10^{11}$	$2,70 \times 10^{17}$	$6,72 \times 10^{-6}$	0,046	0,91	684,35
4	$1,84 \times 10^{11}$	$2,68 \times 10^{17}$	$6,74 \times 10^{-6}$	0,046	0,91	555,92
5	$1,98 \times 10^{11}$	$2,67 \times 10^{17}$	$6,70 \times 10^{-6}$	0,047	0,90	448,70
7	$1,18 \times 10^{11}$	$2,67 \times 10^{17}$	$6,72 \times 10^{-6}$	0,047	0,90	297,78
10	$1,05 \times 10^{11}$	$2,65 \times 10^{17}$	$6,71 \times 10^{-6}$	0,047	0,90	175,10
20	$8,06 \times 10^{10}$	$2,65 \times 10^{17}$	$6,77 \times 10^{-6}$	0,047	0,91	54,20
30	$7,57 \times 10^{10}$	$2,67 \times 10^{17}$	$6,79 \times 10^{-6}$	0,047	0,92	26,52
40	$7,21 \times 10^{10}$	$2,68 \times 10^{17}$	$6,82 \times 10^{-6}$	0,047	0,92	19,78
50	$6,59 \times 10^{10}$	$2,69 \times 10^{17}$	$6,80 \times 10^{-6}$	0,047	0,92	13,63
70	$6,49 \times 10^{10}$	$2,67 \times 10^{17}$	$6,87 \times 10^{-6}$	0,047	0,92	7,96
100	$6,05 \times 10^{10}$	$2,61 \times 10^{17}$	$6,84 \times 10^{-6}$	0,047	0,93	4,99
200	$5,78 \times 10^{10}$	$2,34 \times 10^{17}$	$6,94 \times 10^{-6}$	0,047	0,95	2,87
300	$6,25 \times 10^{10}$	$2,32 \times 10^{17}$	$6,92 \times 10^{-6}$	0,047	0,95	2,72
400	$6,69 \times 10^{10}$	$2,30 \times 10^{17}$	$6,97 \times 10^{-6}$	0,047	0,96	2,75
500	$7,11 \times 10^{10}$	$2,29 \times 10^{17}$	$6,98 \times 10^{-6}$	0,047	0,96	2,97
700	$8,03 \times 10^{10}$	$2,30 \times 10^{17}$	$7,01 \times 10^{-6}$	0,047	0,97	3,34
1000	$9,40 \times 10^{10}$	$2,26 \times 10^{17}$	$7,08 \times 10^{-6}$	0,047	0,98	3,61
2000	$1,32 \times 10^{11}$	$2,20 \times 10^{17}$	$7,36 \times 10^{-6}$	0,048	1,04	4,20
3000	$1,43 \times 10^{11}$	$2,08 \times 10^{17}$	$7,56 \times 10^{-6}$	0,049	1,06	3,97
4000	$1,49 \times 10^{11}$	$1,94 \times 10^{17}$	$6,93 \times 10^{-6}$	0,050	0,85	4,14
5000	$1,49 \times 10^{11}$	$1,62 \times 10^{17}$	$7,34 \times 10^{-6}$	0,052	0,89	4,39

Çizelge 4.8 ve çizelge 4.9’da sırasıyla püskürtme yöntemiyle fabrikasyonu yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al ve Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapılarının 1 kHz-5000 kHz frekans aralığındaki farklı frekans değerlerindeki N_{ss} değerleri, R_s değerleri, Φ_b değerleri, N_A ve buna bağlı olarak W_d ve E_F değerleri hesaplanarak verilmiştir.

Burada; N_{ss} arayüzey durum yoğunluğunu, R_s seri direnci, N_A alıcı katkı atomlarının yoğunluğunu, Φ_b engel potansiyel yüksekliği, W_d tüketim bölgesi kalınlığını, E_F fermi enerji seviyesi değerini göstermektedir.

Bu çalışmada N_{ss} değeri, Hill-Coleman tekniği kullanılarak hesaplanmıştır (Orak *et al.*, 2017). Bu tekniğe göre N_{ss} değeri:

$$N_{ss} = \frac{2}{qA} \frac{(G_m/\omega)_{max}}{((G_m/\omega)_{max}/C_{ox})^2 + (1 - C_m/C_i)^2} \quad (4.10)$$

denklemleri ile hesaplanmıştır. Burada ω açısal frekans ($=2\pi f$), A kapasitör alanı, C_m kapasite-gerilim (C-V) grafiğinde $V=0$ 'daki kapasitans değeri, G_m kondüktans-gerilim (G-V) grafiğinde $V=0$ 'daki kondüktans değeridir.

Gösterilen C_i değeri ise aşağıdaki denklem (4.11)'de elde edilen ara yüz yalıtkan tabakasının kapasitans değeridir ve (Orak *et al.*, 2017):

$$C_i = C_{ma} \left[1 + \frac{G_{ma}^2}{(\omega C_{ma})^2} \right] \quad (4.11)$$

denklemleri ile hesaplanır. Çizelge 4.8 ve çizelge 4.9'da görüldüğü üzere N_{ss} değeri frekansa bağlı olarak frekans arttıkça genel olarak azalış göstermektedir. Bu durum, düşük frekanslarda ara yüzey durum yoğunluklarının özel bir dağılımına, bu durumların yeniden yapılanması ve düzenlenmesine, yüzey ve dipol polarizasyonuna atfedilebilir.

V_d difüzyon potansiyeli olmak üzere V_0 ile V_d arasındaki ilişki ve fermi enerji seviyesi E_F değerleri ve farklı frekans değerleri Φ_b için (Tecimer, H., 2018);

$$V_0 = V_d - \frac{kT}{q} \quad (4.12)$$

$$F_E = \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{N_v}{N_A} \right) \quad (4.13)$$

$$\Phi_b = V_d + F_E - \Delta\Phi_b \quad (4.14)$$

Bu ifadelerdeki değerler Denklem (4.12)'de yerlerine yazılarak V_d değerleri bulunmuştur. V_0 değeri, $1/C^2$ -V grafiğindeki doğruların yatay eksenini kestiği noktadaki gerilim değerleridir. Denklem (4.13)'te E_F değerleri bulunup Denklem (4.14)'te yerine yazılarak farklı frekans değerlerindeki Φ_b değerleri bulunmuştur. Çizelge 4.8 ve Çizelge

4.9’da görüldüğü üzere Φ_b değeri, V_d ve E_F değerlerine bağlı olarak frekans değeri arttıkça genel olarak artmakla birlikte yüksek frekans değerlerinde azaldığı görülmektedir. Bu davranış, oluşan elektron-oyuk çiftleri ile ara yüzey yüklerinin yeniden düzenlenip yapılanmasına bağlanılabilir. Burada $\Delta\Phi_b$ değeri hayali engel düşme kuvveti olup çok küçük değerler aldığı için ihmal edilmiştir. Denklem (4.13) kullanılarak frekans ve voltaja bağlı değişen fermi enerjisi seviyeleri bulunmuş, frekans arttıkça bu değer arttığı Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9’da gösterilmiştir. Burada N_A değeri alıcı katkı atomlarının yoğunluğunu, N_V değeri iletim bandındaki izinli durumların yoğunluğunu göstermek üzere;

$$N_V = 4,82 \times 10^{15} T^{3/2} (m_e/m_0)^{3/2} \text{ ve } (m_e/m_0) = 0,16 \quad (4.14)$$

denklemleriyle bulunmuştur. Bu denklemde m_e elektron etkin kütle, m_0 elektron serbest kütle, T sıcaklık değerini göstermektedir.

Schottky diyot yapısının incelenmesi için çeşitli yöntemler önerilmiştir. Bu çalışmada Nicolian ve Brews metodu kullanılmıştır. Gerilime bağlı direnç (R_i) değerlerini belirlemek için Nicolian ve Brews yöntemine göre tüm voltaj aralığındaki R_i değerleri belirlenir ve böylece güçlü birikim bölgelerindeki ölçülen kapasitans (C_m) ve kondüktans (G_m) değerleri denklemde yerine yazılarak gerçek seri direnç (R_s) değerleri hesaplanır (Kınacı, 2017).

R_s değerlerinin tespiti için metal-yarıiletken yapılarda R_s değeri yüksek frekans değerlerinde ($f > 500$ kHz) ölçülen G_m ve C_m değerleri kullanılarak aşağıdaki eşitlik ile elde edilebilir (Orak *et al.*, 2017; Demirezen, 2017).

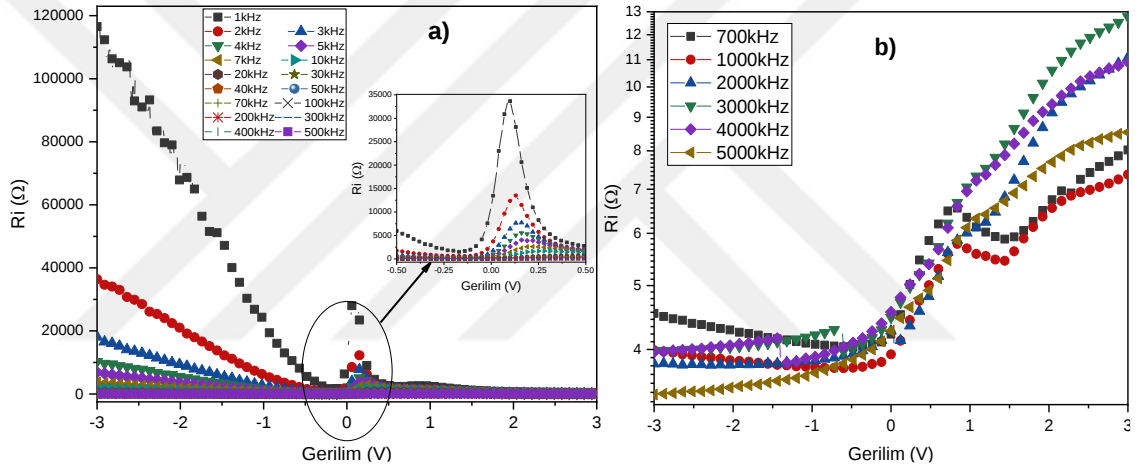
$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + (\omega C_m)^2} \quad (4.15)$$

Burada; $\omega = (2\pi f)$ açısal frekansı, güçlü yığılma bölgesinde ölçülen C_{ma} kapasitans değeri, G_{ma} kondüktans değeridir. Her iki diyot yapısı için -3V ile +3V gerilim aralığında 1 kHz-5000 kHz arasındaki farklı frekans değerlerinde hesaplanarak C-V ve G-V grafikleri çizilmiş olup, şekil 4.19, şekil 4.20, şekil 4.21 ve şekil 4.22’de gösterilmiştir. Bu grafiklerden C_{ma} C-V grafiklerindeki maksimum nokta, G_{ma} ise G-V grafiklerindeki maksimum noktalar alınarak denklem (4.15)’te yerine yazılmış ve

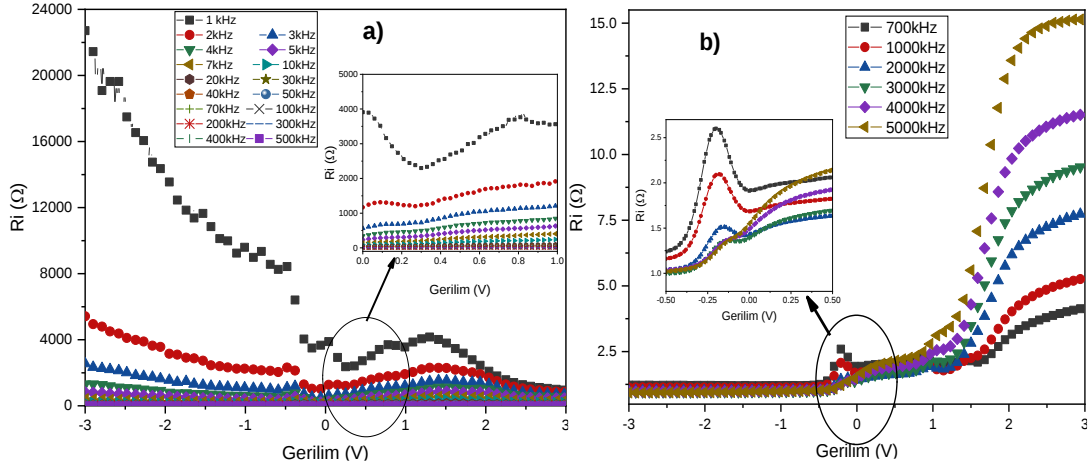
belirtilen tüm frekans değerlerindeki R_s değerleri bulunmuştur. Belirtilen tüm frekans değerlerindeki R_s değerleri hesaplanarak Çizelge 4.8 ile çizelge 4.9’da ayrıntılı olarak gösterilmiştir. C-V ve G-V grafiklerindeki maksimum C ve G noktaları alınarak R_s değerleri hesaplanırken, R_i değerleri için ise C-V ve G-V grafiklerinde tüm datalar alınarak gerilime bağlı R_i değerleri bulunmuştur.

4.3.6. Frekansa bağlı direnç-voltaj (R_i -V) değişimleri

Denklem (4.15) kullanılarak 1 kHz-5000 kHz frekans aralığında gerilime bağlı R_i değerleri hesaplanmış olup her iki diyot için R_i -V grafikleri şekil 4.27 ve şekil.4.28’de verilmiştir.



Şekil 4.25. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al Schottky diyot yapısının oda sıcaklığı ve karanlık ortamda frekansa bağlı R_i -V grafiği **a)** 1kHz-500kHz frekans aralığında **b)** 700 kHz-5000 kHz frekans aralığında



Şekil 4.26. Püskürtme yöntemiyle ince filmi yapılan Al/p-Si/NiO:Cu/Al Schottky diyot yapısının oda sıcaklığı ve karanlık ortamda frekansa bağlı R_i -V grafiği **a)** 1kHz-500kHz frekans aralığında **b)** 700 kHz-5000 kHz frekans aralığında

Şekil 4.25 ile Şekil 4.26'daki R_i -V grafikleri incelendiğinde frekans arttıkça gerilime bağlı R_i değerlerinin daha düşük değerler aldığı görülmektedir. -3V ile +3V aralığındaki düşük frekanslarda 2 farklı pik durumu olduğu ve bu pik değerlerinin düşük frekans değerlerinde daha büyük değerler aldıkları görülürken frekans arttıkça pik değerlerinin azaldığı ve yüksek frekanslarda bir adet pikin kaybolduğu görülmektedir. Düşük frekans değerlerindeki bu çeşit pik davranışı N_{ss} 'nin özel bir dağılımına ve yüzey-dipol polarizasyonuna bağlı olabilir. Şekil 4.25 ve şekil 4.26'da R_i -V grafikleri incelendiğinde yüksek frekans değerlerinde 1 tane pikin olduğu görülmektedir. Yüksek frekans değerlerinde N_{ss} ac sinyali takip edemez bu durum terslenim bölgesinde ikinci pikin kaybolmasına sebep olur ve yüksek besleme gerilimlerinde R_i değeri, R_s değerinin gerçek değerine karşılık gelir (Demirezen, 2017).

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Sonuç olarak bu çalışmada öz direnç değeri 1 ile 10 Ω -cm arasında olan ve (100) yönelimine sahip p-tipi silisyum yarıiletken kristali kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında Al/p-Si/NiO:Cu/Al ve Al/p-Si/CuO:Ni/Al diyotları ayrı ayrı olarak hem döndürme kaplama (sol-jel) metodu hem de püskürtme metodu kullanılarak 4 farklı Schottky diyot üretilmiştir. Üretilen diyotlardan hiçbir elektriksel ölçüm alınmadan XRD değerleri alınıp analiz edilmiş ve SEM cihazı kullanılarak yüzey morfolojisi görüntüleri incelenmiştir. Üretilen tüm diyot yapılarının akım-gerim (I-V) grafikleri, Norde fonksiyonu-gerilim (F(V)-V) grafikleri yorumlanıp, idealite faktörü ve engel yükseklik değerleri hesaplanmıştır. Püskürtme yöntemiyle üretimi yapılan her iki diyot yapısının ışık şiddetine bağlı olarak akım-gerilim, akım yoğunluğu-gerilim (J-V) grafikleri çizilerek değişik ışık şiddetleri altındaki verim ve dolgu faktör değerleri hesaplanmıştır. 60K-320K aralığında farklı sıcaklık değerlerindeki akım-gerilim grafikleri çizilerek yorumlanmış ve farklı sıcaklık değerlerine karşı gelen idealite faktörü ile engel yükseklik değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca 1 kHz-5000 kHz aralığındaki farklı frekans değerlerine bağlı olarak iletkenlik-gerilim (G/w-V), kapasitans-voltaj (C-V), direnç-voltaj (R_i -V) ve $1/C^2$ -V grafikleri çıkarılarak yorumlanmıştır.

Hem döndürme kaplama hem de püskürtme yöntemleriyle oluşturulan Al/p-Si/CuO:Ni/Al ve Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyotların I-V grafikleri ile hesaplanan idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri incelendiğinde püskürtme yöntemiyle oluşturulan diyotların daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Püskürtme yöntemiyle üretimi yapılan Al/p-Si/CuO:Ni/Al ve Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyotların oda sıcaklığı ve karanlık ortamdaki termoiyonik emisyon yöntemiyle hesaplanan engel yüksekliği ve idealite faktörü değerleri sırasıyla 0,77 eV, 2,14 ve 0,78 eV, 1,86 bulunmuştur. Norde fonksiyonuyla da engel yükseklik değerleri hesaplanmış iki diyot için de 0,80 eV elde edilmiştir. 30 mW/cm^2 – 100 mW/cm^2 aralığında farklı ışık şiddetleri altında I-V, J-V grafikleri çizilerek verim (η_p) ve dolgu faktörleri (FF) değerleri hesaplanmıştır. Her iki diyot yapısı içinde ışık şiddetinin artışına bağlı olarak verimin arttığı gözlemlenmiştir. 100 mW/cm^2 ışık şiddeti altında Al/p-Si/CuO:Ni/Al diyot yapısı için verim (η_p) ve dolgu faktörü (FF) sırasıyla $1,48 \times 10^{-3}$ ve 6,03 değerleri bulunurken Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyot

yapısı için bu değerler sırasıyla 0,029 ve 16,43 bulunmuştur. Her iki diyot yapısı için ışık şiddeti arttıkça verimin arttığı görülmüştür. Al/p-Si/CuO:Ni/Al ve Al/p-Si/NiO:Cu/Al diyotlarının 60K-320K aralığında farklı sıcaklık değerlerindeki I-V grafikleri çizilmiş ve farklı sıcaklık değerlerindeki engel yüksekliği ile idealite faktörü değerleri hesaplanmıştır. Her iki diyot yapısı için sıcaklık değeri yükseldikçe idealite faktörünün sıcaklığa bağlı olarak azaldığı görüldü. Aynı şekilde sıcaklık arttıkça her iki diyot yapısı için engel yükseklik değerinin sıcaklığa bağlı olarak arttığı 260K sıcaklıkta maksimum değeri aldığı ve bu değerden sonra azalmaya başladığı görülmüştür.

1 kHz-5000 kHz aralığında farklı frekans değerlerindeki grafikleri incelendiğinde frekans değeri yükseldikçe G-V ve $1/C^2$ -V grafiklerinde aynı gerilim değerlerine karşılık gelen G (iletkenlik) ve $1/C^2$ değerlerinin daha büyük değerler aldığı tespit edilmiştir. Aynı şekilde farklı frekans değerlerindeki grafikler incelendiğinde frekans değeri büyüdükçe C-V ve R_i -V grafiklerinde aynı gerilim değerlerine karşı gelen C (kapasitans) ve R_i (direnç) değerlerinin daha küçük değerler aldığı görülmüştür. Her iki diyot yapısı için 1 kHz-5000 kHz aralığında N_{ss} , R_s , W_d , V_d , F_E , gibi farklı frekans değerlerindeki değerleri hesaplandı ve frekansa bağlı olarak değişkenlik gösterdikleri görüldü. Her iki diyot yapısı için 1 kHz-5000 kHz aralığında farklı frekans değerlerindeki sonuçlar analiz edildiğinde N_{ss} ve R_s değerleri frekans değeri yükseldikçe genel olarak azaldıkları, diğer hesaplanan parametrelerin genel olarak arttıkları sonucuna varıldı. Bu çalışmada püskürtme yöntemiyle oluşturulan filmlerin döndürme kaplamaya göre daha iyi sonuçlar verdiği görüldü. Çıkan sonuçlar analiz edildiğinde NiO:Cu ara yüzeyi olarak kullanıldığında CuO:Ni'den daha iyi sonuçlar verdiği görüldü.

Sonuç olarak bu çalışmada Al/p-S/NiO:Cu/Al diyot yapısının en iyi fotodiyot, diyot ve PV özellikleri gösterdiği görüldü. Bakır katkı oranını değiştirerek, daha ince bir p-Si/NiO:Cu film yapısı oluşturarak, çözelti molaritesini ve deney sırasındaki tavlama sıcaklığını değiştirerek farklı elektrik karakteristiğine sahip diyot yapıları üretilebilir. Aynı şekilde Al kontaklar yerine iş fonksiyonu daha uygun kontaklar kullanarak, kullanılan silisyum altlıkların farklı yönelim ve kalıntılarını dikkate alarak, püskürtme yöntemi yapılırken parfüm şişesi yerine belirli sürede homojen ve olabildiğince küçük tanecikli yapılarda püskürtme yapan profesyonel bir cihaz kullanarak, daha temiz ve dış

Çevreden tamamen izole edilmiş profesyonel bir laboratuvar ortamında üretildiğinde daha iyi diyot ve fotodiyotlar üretilebilir.



KAYNAKLAR

- Ahmed, A. A., Devarajan., Raypah, M. E., Afzal, N., 2018. Growth and characterization of NiO films on aluminum substrate as thermal interface material for LED application *Surface & Coatings Technology*, 350, 462-468.
- Akgül, K., B., 2015. *Aynı Şartlar Altında Üretilen Özdeş Au/n-Si(100) Schottky Diyotlarda Karakteristik Parametrelerin Belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara. 91.
- Akgul, U., Yildiz, K., Atici, Y., 2017. Influence of annealing time on the physical properties of reactively sputtered CuO thin film. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28, 4758–4762.
- Aljuboori, M., S., H., 2018. Study of Optical and Structural Properties of NiO Thin Films Prepared by Chemical Spray Pyrolysis (CSP) Method. *Jordan Journal of Physics*, 11(3), 147-152.
- Alshahrie, A., Yahia, I., S., Alghamdi, A., Al Hassan, P., Z., 2016. Morphological, structural and optical dispersion parameters of Cd-doped NiO nanostructure thin film. *Elsevier Optik* 127, 5105-5109.
- Aras, G., A., 2015. *Al/POLY(METHYL METHACRYLATE)/p-Si Organik Schottky Diyotların Üretimi, Elektrik ve Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi*. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum. 73.
- Aydoğan, Ş., 2011. *Katıhal Fizik*. Nobel Bilim yayın dağıtım, Türkiye. 616.
- Ayhan, S., 2012. *n-Si/Metal Kompleksi/Au Yapıların Aygıtsal Özellikleri ve Panaf Metal Kompleksinin Optiksel Özelliğinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır. 71.
- Ay, İ., 2006. *Amorf Silisyum ve Alaşımları Heteroeklemlerin Elektronik ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi*. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara. 151.

- Baturay, Ş., Tombak, A., Batibay, D., Ocak, Y., S., n-Type conductivity of CuO thin films by metal doping. *Applied surface science*, 477, 91-95.
- Bellal, Y., Bouhank, A., Serrar, H., Tuken, T., Sığircık, G. 2019. A Copper Oxide (CuO) Thin Films Deposited by Spray Pyrolysis Method. *MATEC Web of Conferences*, 253, 03002.
- Bhattacharya, P., 1997. Semiconductor Optoelectronic Devices. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Boy, F., (2013). **Organik Arayüzeyli GaAs Schottky Diodların Elektriksel Karakterizasyonu**. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya. 47.
- Chtouki, T., Taboukhat, S., Kavak, H., Zawadzka, A., Erguing, H., Elidrissi, B., Sahraoui, B., 2019. Characterization and third harmonic generation calculations of undoped and doped spin-coated multilayered CuO thin films. *Journal of Physics and chemistry of solids*, 124, 60-66.
- Colinge, J., P. and Colinge, C., 2011. *Physics of Semiconductor Devices*. Kluwer Academic Publishers, California State University, New York. 441.
- Cowley, A. M., Sze, S. M. (1965). Surface States and Barrier Height of Metal-Semiconductor Systems. *Journal of Applied Physics*, 36(10), 3212–3220.
- Çatır, F., E., C., 2018. Cu/n-InP/In Schottky Diyotların Sıcaklığa Bağlı Akım-Voltaj ve Kapasite-Voltaj Ölçümlerinden Elde Edilen Karakteristik Parametrelerinin İncelenmesi. *Erzincan Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(3), 381-393.
- Çavaş, M., 2017. Al/P-Si/Zno/Al Foto Diyotun Üretimi ve Elektriksel Karakterizasyonu *Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi*, 29(1), 325-330.
- Çetinkaya, S., 2011. *Al/ZnO/p-Si ve Au/CuO/p-Si Schottky Yapıların Farklı Metotlarla Elde Edilmesi ve Karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Antakya/Hatay. 93.
- Çetinkara, H. A., 2002. *Doğal oksitli yarıiletkenlerden yapılan Schottky diyotların farklı metotlarla incelenmesi ve karakteristik parametrelerinin belirlenmesi*.

- Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale. 115.
- Çetinkaya, H., G., Sevgili, Ö., Altındal, Ş., 2019. The fabrication of Al/p-Si (MS) type photodiode with (%2 ZnO-doped CuO) interfacial layer by sol gel method and their electrical characteristics. **Physica B: Condensed Matter**, 560, 91-96.
- Dağdelen, F., Özer, M., 2015. Yüksek Sıcaklıklarda Ag/n-GaP Schottky Diyotun Elektronik Parametrelerinin İncelenmesi. **Politeknik Dergisi**, 18(2), 93-97.
- Daoudi, O., Qachaou, Y., Raidou, A., Nouneh, K., Lharch, M., Fahoume, M., 2019. Study of the physical properties of CuO thin films grown by modified SILAR method for solar cells applications. **Superlattices and Microstructures**, 197, 93-99.
- Das, M., R., Mukherjee, A., Mitra, P., 2018. Influence of Cu incorporation on ionic conductivity and dielectric relaxation mechanism in NiO thin films synthesized by CBD. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, 29, 1216–1231.
- Demir, K., Ç., 2018. Elektrokimyasal büyütme tekniğiyle büyütülen geçirgen NiO ince filmlerin hazırlanması ve karakterizasyonu. **Pamukkale Üniv. Müh. Bilim Derg.**, 24(7), 1315-1324.
- S. Demirezen, Ş. Altındal, S. Özçelik, E. Özbay, 2011. On the profile of frequency and voltage dependent interface states and series resistance in (Ni/Au)/Al_{0.22}Ga_{0.78}N/AlN/GaN heterostructures by using current-voltage (I-V) and admittance spectroscopy methods. **Microelectronics Reliability**, 51, 2153-2162.
- Demirezen, S., 2017. Au/(PrBaCoO nanofiber)/n-Si Yapılarda Seri Direnç ve Arayüzey Durumlarının Frekans ve Gerilime Bağlı Dağılım Profillerinin Farklı Metotlarla elde edilmesi. **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, 5(3), 167-176.
- Dere, A., 2018. Güneş Takip Sistemleri için Al/p-Si/Zn:CuO/Al Fotodiyotları. **Physical Sciences (NWSAPS)**, 13(4), 64-75.

- Dixit, T., Tripathi, A., Ganapathi, K. L., Palani, I. A., Ramachandra, R., Singh, V., 2019. Solution-Processed Transparent CuO Thin Films for Solar-Blind Photodetection. **IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS**, 40(2), 255-258.
- El-Nahass, M., Metwally H., El-Sayed, H., Hassanien, A., 2011. Electrical and photovoltaic properties of FeTPPCL/p-Si heterojunction. **Synthetic Metals** 161, 2253–2258.
- Ganesh, V., Shkir, M., Anis, M., Alfaify, S., 2019. Structural, morphological and opto-nonlinear studies of Cu:NiO: glass thin films facilely designed by spin coater for electro-optics. **Materials Research Express**, 6(8), 086439.
- Göksu, T., 2013. **Schottky Metal Kalınlığına Bağlı Olarak Hazırlanan Ti/-GaAs Schottky Kontakların Sıcaklık Bağımlı Karakteristiklerinin Belirlenmesi**. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta. 99.
- Göktaş, Ö.F., 2018. **Al Katkılı N-Zno/P-Si Heterojonksiyon Foto Diyodun Işığa Duyarlılık Performansının İncelenmesi**. Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara. 55.
- Henisch, H. K., 1984, **Semiconductor Contacts**, Clarendon Press, Minnesota University, Minnesota, 377.
- Jayakrishnan, R., Kurian, A., S., G.Nair, V., Joseph, M., R., 2016. Effect of vacuum annealing on the photoconductivity of CuO thin films grown using sequential ionic layer adsorption reaction. **Materials Chemistry and Physics**, 180, 149-155.
- Karabat, M.F., Arsel, İ. (2015). Al/CuO/p-Si/Al Diyot Yapısının Elektriksel Özellikleri. Makale, Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Entstitüsü, Batman. **Yaşam Bilimleri Dergisi**, 5(1), 51-52.
- Kınacı, B., 2017. Effecton the Electrical Characterizations of Temperature and Frequency Depending on Series Resistance and Interface States in MS Structure. **Journal of Polytechnic**, 20(2), 313-318.

- Kittel, C., 1986. *Katılal fizikine giriş (Çev.Önengüt, G. ve Önengüt, D., 2014)*. Palme Yayınevi No: 8, Türkiye, 680.
- Kocyigit, A., Orak, I., Çaldıran, Z., Turut, A., 2017. Current–voltage characteristics of Au/ZnO/n-Si device in a wide range temperature. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28, 17177–17184.
- Milnes, A. G., Feucht, D. L., 1972. *Heterojunctionsand Metal-Semiconductor Jonction*. Academic Press Inc., New York, 418.
- Mott, N. F., 1938, Note on the Contact Between a Metal and an Insulator or Semiconductor. *Projeedings of the Cambdridge Philosophical Society*, 34(04), 568-572.
- Moumen, A., Hartiti, B., Comini, E., El khalidi, Z., Arachchige, M., Fadili, S., Thevenin, P., Preparation and characterization of nanostructured CuO thin films using spray pyrolysis technique. *Superlattices and Microstructures*, 127, 2-10.
- Neaman, D. A., 2003, *Semiconductor Physics and Devices*, The McGraw-Hill Companies, Universty of New Mexico, New York, 758.
- Orak, İ., (2013). *Sıçratma Yöntemiyle elde edilen Co/n-GaP Schottky Diyotların Tavlama ve Numune Sıcaklığına Bağlı Elektriksel Karakterizasyonu*. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum. 101.
- Orak, I., Koçyiğit, A., Turut, A., 2017. The surface morphology properties and respond illumination impact of ZnO/n-Si photodiode by prepared atomic layer deposition Technique. *Journal of Alloys and Compounds*, 691, 873-879.
- Orak, I., Ejderha, K., Turut, A., 2015. The electrical characterizations and illumination response of Co/N-type GaP junction device. *Current Applied Physics*, 15, 1054-1061.
- Orak, I., Kocyigit, A., Alındal, Ş., 2017. Electrical and dielectric characterization of Au/ZnO/n Si device depending frequency and voltage. *Chinese Physics B*, 26(2), 028102/1-028102/7

- Pakma, O., (2008). ***Metal/TiO₂/c-Si/Metal Yapılarında Yüzey Şartlarında Elektriksel Belirtgenler Üzerindeki Etkisi.*** Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara. 89.
- Polat, E.G., (2009). ***Sol-Jel Yöntemi ile Bakır ve Kalay Katkılı ZnO İnce Filmlerin Üretilmesi, Optik ve Mikroyapısal Karakterizasyonu*** Yüksek lisans tezi, Gebze Yüksek teknoloji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.64.
- Rhoderick, E. H., Williams, R. H., 1988. ***Metal-Semiconductor Contacts.*** Clarandon Press, Oxford University Press. New York. 233-247.
- Sarı, H., 2008. Yarıiletkenler Fiziği: Elektronik ve Optik Özellikler. <https://docplayer.biz.tr/33740583-Yariiletken-fizigi-elektronik-ve-optik-ozellikler-hsari-1.html> (28.05.2019).
- Seçuk, M. N., 2011. ***Au/PANI/p-Si/Al Organik/İnorganik Yarıiletken Diyotların Akım-Voltaj Karakteristikleri.*** Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van. 70.
- Sharma, R., Acharya, A., D., Shrivastava, S., B., Shripathi, T., Ganesan, V., 2014. Preparation and characterization of transparent NiO thin films deposited by spray pyrolysis technique. ***Contents lists available at Science Direct***, 125, 6751-6756.
- Soylu, M., Dere, A., G. Al-Sehemi, A., A. Al-Ghamdi, A., Yakuphanoglu, F., 2018. Effect of calcination and carbon in Corporation on NiO nanowires for photodiode performance. ***Contents lists available at Science Direct Microelectronic Engineering***, 202, 52-59.
- Soylu, M, 2006., ***Atmalı Katodik Vakum Ark Depolama Sistemle Üretilen ZnO'nun Elektriksel İletkenliği ve Isıl İşlemle Değişimi*** Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana. 115.
- Streetman, B. And Banerjee, S., 2014. ***Solid State Electronic Devices.*** Pearson; 7 Education, ABD. 624.

- Sze, S. M., 1981. ***Metal-Semiconductor Contacts. Physics of Semiconductor Devices***, 2nd Ed., JohnWiley, New York. 134-196.
- Tecimer H., 2018. Al/PVA (Zn-katkılı)/p-Si (MPS) Yapılarda Organik Arayüzey Tabaka Kalınlığının ve Seri Direncin C-G/ ω -V Karakteristikleri Üzerine Etkisi. ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi***, 6(3), 680-690.
- Tung, R. T., 1991. Electron-Transport of Inhomogeneous Schottky Barriers. ***Applied Physics Letters***, 58 (24), 2821-2823.
- Uzun, Ş., 2012. ***Sol-Gel Yöntemiyle Büyütülen İndiyum Katkılı Çinko Oksit Filmlerin Elektriksel ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi***. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara. 72.
- Yazıcı, D., 2007. ***Fosfin Metal Komplekslerinin Fiziksel Özellikleri***. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana. 55.
- Yıldırım, N., Durumlu, E., (2017). Ag/Azure A /n-Si Schottky Diyodun Elektriksel ve Fotovoltaik Özelliklerinin Araştırılması. ***Türk Doğa ve Fen Dergisi***, 6(1), 5.
- Yılmaz, K., Gölcür, D., 2014. Investigations on Structural, Electrical and Optical Properties of Polycrystalline CdInTe Thin Films Grown by Thermal Evaporation. ***SDU Journal of Science (E-Journal)***, 9(1), 150-162.
- Ziel, A.V., 1968. Solid State Physical Electronics. Prentice Hall, Inc., New Jersey. 245.
- Xi, Y., Y., Hsu, Y., F., Djuricic, A., B., Ng, A., M., C., Chan, W., K., Tam, H., L., Cheah , K., W., 2008. NiO/ZnO light emitting diodes by solution-based growth. ***Applied Physics Letters***, 92, 113505.

ÖZGEÇMİŞ

15.09.1987 yılında Van ilinin Erciş ilçesinde dünyaya geldi. İlk ve Ortaöğretimi Erciş İbn-i Sina İlköğretim okulunda tamamladı. 2007 yılında Erzincan Nevzat Ayaz Fen Lisesinden Mezun Oldu. 2011 yılında Pamukkale Üniversitesi-Elektrik Elektronik Mühendisliğinden mezun oldu. 2011 yılından beri Iğdır Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı biriminde Elektrik Elektronik Mühendisi olarak görev yapmaktadır. 2018 yılında Yüksek Lisans eğitimine başladı, evli ve bir erkek çocuğu babasıdır.