

**T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Si TABANLI Ru(II) KOMPLEKS YAPISINA Alq₃ ORGANİK
BİLEŞİĞİNİN ELEKTRİKSEL VE FOTOVOLTAİK
ÖZELLİKLERİNİ ARTTIRMADAKİ ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MEHMET AKİF ŞAHİNKAYA**

FİZİK ANABİLİM DALI

**TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Nezir YILDIRIM**

BİNGÖL-2020



T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**Si TABANLI Ru(II) KOMPLEKS YAPISINA Alq₃ ORGANİK BİLEŞİĞİNİN
ELEKTRİKSEL VE FOTOVOLTAİK ÖZELLİKLERİNİ ARTTIRMADAKİ
ETKİSİ**

Prof. Dr. Nezir YILDIRIM danışmanlığında, Mehmet Akif ŞAHİNKAYA tarafından hazırlanan bu çalışma 07/01/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Nezir YILDIRIM

İmza :

Üye : Doç. Dr. İkrım ORAK

İmza :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Abdullah ÖZKARTAL

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun// tarih ve/
nolu kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Zafer ŞİAR
Enstitü Müdürü

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

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma, Bingöl Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Öğretim Üyesi, Tez danışmanım Prof. Dr. Nezir YILDIRIM yönetiminde yapılmıştır. Yüksek lisans eğitimim süresince bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Nezir YILDIRIM'a teşekkürlerimi arz ederim.

Çalışmamın her aşamasında, teorik, pratik ve deneysel yardımları ile bilgi birikimlerini istifademe sunan, Sayın Doç. Dr. İkrâm ORAK'a, sayın Öğr. Gör. Ömer SEVGİLİ'e teşekkür ve şükranlarımı sunarım. Laboratur çalışmalarında motivasyonu ile desteklerini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Abdulkerim KARABULUT'a teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim süresince teorik ve pratik eğitimlerini aldığım tüm Fizikçi hocalarıma teşekkürlerimi sunarım. Laboratuvar çalışmalarımda teknik imkan ve desteğini esirgemeyen Bingöl Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı mensuplarına teşekkür ederim.

Hayatımın her sürecinde, destek ve fedakârlığını esirgemeyen aileme de sonsuz şükranlarımı sunarım.

Mehmet Akif ŞAHİNKAYA

Bingöl 2020

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Yarıiletken Bant Yapısı	5
1.2. Metal-Yarıiletken (M/S) Kontaklar	7
1.3. Metal / p-Tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontak	10
1.4. Metal / p-Tipi Yarıiletken Omik Kontak	12
1.5. Metal Yarıiletken (MS) Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları	14
1.6. Termiyonik Emisyon ve Difüzyon Teorisi	15
1.6.1. Termiyonik Emisyon Teorisi	15
1.6.2. Difüzyon Teorisi	20
1.7. Schottky Diyotlarda Akım-Gerilim özelliklerinin İncelenmesi	22
1.7.1. Norde Fonksiyonlarıyla İncelenmesi.....	22
1.7.2. Cheung ve Cheung Fonksiyonlarıyla İncelenmesi.....	24
1.8. Kapasitans-Gerilim Özelliklerinin İncelenmesi	25
1.9. Arayüzey Tabakalı Metal-Yarıiletken Kontaklar	27
1.10. İdeal Bir Metal-Arayüzey Tabakalı-Yarıiletken Kontaklar.....	28
1.11. Arayüzeyli Yapılarında İdeal Durumdan Sapmalar	31
2. KAYNAK ÖZETLERİ	32

3. METERYAL VE YÖNTEM.....	35
3.1. Tri-(8-hydroxyquinoline) Alüminyum Molekülü.....	35
3.2. Tris-(2,2'-bipyridine) Ruthenium(II) Hexafluorophosphate Molekülü	36
3.3. Kontak Arayüzeyinde Kullanılacak Çözeltilerin Hazırlanması	36
3.4. P-Tipi-Si Kristalinin Temizlenmesi.....	38
3.5. Omik Kontakın Oluşturulması.....	39
3.6. Spin Coating Yöntemi ile p-Si Üzerine Arayüzey Malzeme Büyütülmesi ...	39
3.7. Kristal Analiz Yöntemleri.....	41
3.7.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	41
3.7.2. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)	42
3.8. Doğrultucu-Schottky Kontak.....	43
3.9. Işık Şiddetine Bağlı Ölçümler	44
3.10. Sıcaklığa Bağlı Ölçümler.....	44
3.11. Frekansa Bağlı Ölçümler	45
4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR	46
4.1. UV – Görünür Bölge Absorbsiyon Spektrumları	46
4.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntüleri	47
4.3. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Görüntüleri.....	49
4.4. Akım-Gerilim Diyot Karakteristikleri	50
4.4.1. Fotovoltaik Ölçümlerin Elde Edilmesi.....	50
4.4.2. Sıcaklığa Bağlı Ölçümlerin Elde Edilmesi.....	57
4.5. Frekansa Bağlı Diyot Karakteristikleri.....	63
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	70
KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ	79

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Diyotun Kontak Alanı
A*	: Richardson Sabiti
AC	: Alternatif Akım
DC	: Doğru Akım
e⁻	: Elelctron Yüğü
eV	: Elektron Volt
ε₀	: Boşluğun Dielektrik Sabiti
FF	: Doldurma Faktörü (%)
g_(E)	: İletkenlik Bandındaki Hal Yoğunluğu
h⁺	: Boşluk/Hol
k	: Boltzman Sabiti
K	: Kelvin
I	: Akım (A)
I₀	: Ters Doyma Akımı (A)
I_{sc}	: Kısa Devre Akımı (A)
J	: Akım Yoğunluğu (A/cm ²)
J₀	: Ters Beslem Akım Yoğunluğu (A/cm ²)
m	: Serbest Elektron Kütlesi
m_n[*]	: Elektron Etkin Kütlesi
μ	: Mobilite (cm ² / V.s)
n	: İdealite Faktörü
η	: Güneş Enerji Verimliliğı (%)
N_D	: Donör/Verici Konsantrasyonu
N_A	: Akseptör/Alıcı Konsantrasyonu
P	: Güç (Watt)
G/w	: Kondüktans/İletkenlik
χ_s	: Yarıiletkenin Elektron İlgisi

T	: Mutlak Sıcaklık (K)
v	: Elektron Hızı
V_{oc}	: Açık Devre Voltajı (V)
V_d	: Difüzyon Potansiyeli
W_D	: Tükenim Bölgesi
Alq₃	: Tris-(8-hydroxyquinoline) Alüminyum
Ru(II)	: Tris-(2,2'-bipyridine) Ruthenium (II) Hexafluorophosphate
AFM	: Atomik Kuvvet Mikroskopi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopi
UV	: Ultraviole Absorpsiyon Spektroskopi
MS	: Metal/Yarıiletken
MIS	: Metal/Yalıtkan/Yarıiletken
MPS	: Metal/Polimer/Yarıiletken
TE	: Termiyonin Emisyon
MOS	: Metal Oksit Yarıiletken
MESFET	: Metal Yarıiletken Alan Etkili Transistör
OLED	: Organik Işık Yayan Diyot
OFET	: Organik Alan Etkili Transistör
HOMO	: En Yüksek Enerjili Dolu Moleküler Orbital
LUMO	: En Düşük Enerjili Boş Moleküler Orbital

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Termal denge durumunda p-tipi bir yarıiletkenin enerji seviyeleri.....	5
Şekil 1.2.	Bir metal (M) ile yarıiletkenin (S) kontakta önceki enerji seviyeleri.....	7
Şekil 1.3.	Düz beslem (dc) akım-gerilim'in lineer grafikleri a) Doğrultucu kontak b) Omik kontak	9
Şekil 1.4.	Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontakta enerji bant diyagramı a) Kontakta önce b) Kontakta sonra ve Termal denge dengede c) $V \neq 0$ durumu.....	11
Şekil 1.5.	$\Phi_m > \Phi_s$ durumu için metal/p-tipi yarıiletken kontakta, a) Kontakta önce b) Kontakta sonra, oluşan enerji-bant diyagramları.....	12
Şekil 1.6.	Metal/p-tipi yarıiletken omik kontakta ait enerji bant diyagramı ($V > 0$) Doğru beslem altında ($V < 0$) Ters beslem altında.....	13
Şekil 1.7.	Metal-n tipi Schottky engel diyot için akım-iletim mekanizması (a) Termiyonik emisyon (b) Kuantum mekaniksek tünelleme (c) Uzak yükü bölgesinde taşıyıcıların rekombinasyonu (d) Azınlık taşıyıcı enjeksiyonu (Metalden yarıiletkenine hol enjeksiyonu).....	14
Şekil 1.8.	Engel üzerinden Termiyonik Emisyonu gösteren enerji bant diyagramı	16
Şekil 1.9.	Bir MIS/MPS yapının şematik gösterimi.....	28
Şekil 1.10.	MIS/MPS Kapasitansının eşdeğer devresi.....	29
Şekil 1.11.	$V \neq 0$ durumunda ideal MPS Schottky diyotun enerji-bant diyagramı a) Yığılma (b) Tüketim (c) Terslenim, durumları.....	30
Şekil 1.12.	İdeal olmayan bir diyotta arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması.....	31
Şekil 3.1.	Kompleks olarak sentezlenmiş Tris-(8-hydroxyquinoline)-Alüminyum /Alq ₃ 'ün moleküler yapış.....	35

Şekil 3.2.	Tris-(2,2'-bipyridine) Ruthenium(II) Hexafluorophosphate / Ru(II) organik arayüzey malzemesinin moleküler yapısı.....	36
Şekil 3.3.	a) Değişen oranlarda Kompleks Ru(II) + Alq ₃ boyar maddeleri b) İdeal UV değerlerine göre çözücü ve seyreltinin eklenmiş solisyon görünümü.....	37
Şekil 3.4.	UV-3600 UV-VIS-NIR Spektrofotometre cihazı.....	37
Şekil 3.5.	Ultrasonik Temizleyici, Elmasonic S60 H.....	38
Şekil 3.6.	İnce Film Kaplama Sistemi, NANOVAK NVTS-400.....	39
Şekil 3.7.	Döndürmeli Kaplayıcı - VTC-100 Vacuum Spin Coater.....	40
Şekil 3.8.	Spin Coating (Döndürme) yöntemi ile film kaplama şematik gösterimi.....	40
Şekil 3.9.	Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) JEOL JSM 6510.....	41
Şekil 3.10.	SEM çalışma şeması.....	42
Şekil 3.11.	Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Park Systems XE-100E ve 2D Temsili Görseli.....	42
Şekil 3.12.	Doğrultucu-schottky kontak maske.....	43
Şekil 3.13.	Doğrultucu kontak sonucu oluşan (a) Referans – Al/p-Si/Al (b) Değişen Oranlarda Arayüzeyli; Al / Ru(II)+Alq ₃ /p-tipi Si/ Al, numunelerinin 3D görünümü.....	44
Şekil 3.14.	Akım-Gerilim Solar Simülatörü / Probe Station.....	44
Şekil 3.15.	Kryostat cihazı – Turbo Vakum Pompası, Keithley 2400 güç kaynağı ve Sıcaklık Kontrol Ünitesi.....	45
Şekil 3.16.	Empedans Analiz Cihazı 4192A Model YHP Marka LF 5 Hz - 13 MHz.....	45
Şekil 4.1.	Ru(II) ve Alq ₃ karışımı ile oluşan solisyonların UV-görünür bölge spektrumları.....	46
Şekil 4.2.	Solisyon bekleme sürelerine göre yüzey SEM görüntüleri a) 1 saat bekletilmiş solisyon b) 24 saat bekletilmiş solisyon.....	47
Şekil 4.3.	Ru(II) ve Alq ₃ kompleks solisyonların taramalı electron mikroskobu SEM görüntüleri (a) (1/2)Ru(II)+Alq ₃ (b) (1/5)Ru(II)+Alq ₃ (c) (1/7)Ru(II)+Alq ₃	48
Şekil 4.4.	(1/2)Ru(II)+Alq ₃ AFM yüzey morfolojisi a) 20 µm ² yüzey kesiti b) 40 µm ² 3D yüzey kesiti.....	49

Şekil 4.5.	(1/5)Ru(II)+Alq ₃ AFM yüzey morfolojisi a) 20 µm ² yüzey kesiti b) 40 µm ² 3D yüzey kesiti.....	49
Şekil 4.6.	(1/7)Ru(II)+Alq ₃ AFM yüzey morfolojisi a) 20 µm ² yüzey kesiti b) 40 µm ² 3D yüzey kesiti.....	49
Şekil 4.7.	Bir güneş piline ait akım-gerilim grafiği.....	52
Şekil 4.8.	Referans numunesinin (Al/p-Si/Al) karanlık ve 100 mWcm ² ışık şiddeti altında lnI-V grafiği ve güneş enerjisi verimliliği çıkarımı.....	53
Şekil 4.9.	Al/(1/2)Ru(II)+Alq ₃ /p-Si/Al diyot yapısının karanlık ve 30-100 mWcm ² ışık şiddeti altında lnI-V grafiği.....	54
Şekil 4.10.	Al/(1/5)Ru(II)+Alq ₃ /p-Si/Al diyot yapısının karanlık ve 30-100 mWcm ² ışık şiddeti altında lnI-V grafiği.....	55
Şekil 4.11.	Al/(1/7)Ru(II)+Alq ₃ /p-Si/Al diyot yapısının karanlık ve 30-100 mWcm ² ışık şiddeti altında lnI-V grafiği.....	56
Şekil 4.12.	Al/(1/5)Ru(II)+Alq ₃ /p-Si/Al diyot yapısının 60-320 K sıcaklık altında ve karanlık ortamda alınan lnI-V grafiği.....	57
Şekil 4.13.	TE'den Al/(1/5)Ru(II)+Alq ₃ /p-Si/Al schottky diyotun farklı Sıcaklıklarda (K) Bariyer Yüksekliği (Φ _b) ve İdealite Faktörü (n) grafikleri.....	58
Şekil 4.14.	Al/(1/5)Ru(II)+Alq ₃ /p-Si/Al schottky diyotun deneysel ve teorik idealite faktörü (n), nkT – kT grafiği.....	59
Şekil 4.15.	Norde fonksiyonu ile Al/(1/5)Ru(II)+Alq ₃ /p-Si/Al schottky diyotun 60-320 K sıcaklık aralığındaki F(V)-V grafiği.....	59
Şekil 4.16.	Cheung fonksiyonu ile (1/5)Ru(II)+Alq ₃ /p-Si/Al schottky diyotun 60-320 K sıcaklık aralığındaki dV/dII-I eğrileri.....	60
Şekil 4.17.	Cheung fonksiyonu ile (1/5)Ru(II)+Alq ₃ /p-Si/Al schottky diyotun 60-320 K sıcaklık aralığındaki H(I)-I eğrileri.....	61
Şekil 4.18.	Schottky kontakların (-3,+3) volt ve (100-2000) kHz frekans aralığında elde edilen C-V grafiği a) Referans Al/p-Si/Al numunesi b) (1/2)Ru(II)+Alq ₃ numunesi c) (1/5)Ru(II)+Alq ₃ numunesi d) (1/7)Ru(II)+Alq ₃ numunesi.....	64

- Şekil 4.19. Schottky kontakların (-3,+3) volt ve (100-2000) kHz frekans aralığında elde edilen C^{-2} -V grafiği a) Referans Al/p-Si/Al numunesi b) $(1/2)\text{Ru(II)+Alq}_3$ numunesi c) $(1/5)\text{Ru(II)+Alq}_3$ numunesi d) $(1/7)\text{Ru(II)+Alq}_3$ numunesi..... 65
- Şekil 4.20. Schottky kontakların (-3,+3) volt ve (100-2000) kHz frekans aralığında elde edilen G/w-V grafiği a) Referans Al/p-Si/Al numunesi b) $(1/2)\text{Ru(II)+Alq}_3$ numunesi c) $(1/5)\text{Ru(II)+Alq}_3$ numunesi d) $(1/7)\text{Ru(II)+Alq}_3$ numunesi..... 66
- Şekil 4.21. Schottky kontakların (-3,+3) volt ve (100-2000) kHz frekans aralığında elde edilen R_i -V grafiği a) Referans Al/p-Si/Al numunesi b) $(1/2)\text{Ru(II)+Alq}_3$ numunesi c) $(1/5)\text{Ru(II)+Alq}_3$ numunesi d) $(1/7)\text{Ru(II)+Alq}_3$ numunesi..... 67

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1.	MS kontaklarda doğrultucu ve omik kontak oluşumu için metal ve yarıiletken iş fonksiyonları.....	8
Tablo 1.2.	Bazı elementlerin elektron ilgisi.....	8
Tablo 1.3.	Bazı elementlerin iş fonksiyonu değerleri.....	9
Tablo 4.1.	Oda sıcaklığında karanlık ortamda alınan I-V ölçümlerinin TE ile yorumlanması.....	51
Tablo 4.2.	Al/(1/2)Ru(II)+Alq ₃ /p-Si/Al diyot yapısının karanlık ve 30-100 mWcm ² ışık şiddeti altında.....	54
Tablo 4.3.	Al/(1/5)Ru(II)+Alq ₃ /p-Si/Al diyot yapısının karanlık ve 30-100 mWcm ² ışık şiddeti altında lnI-V grafiğinden elde edilen diyot parametreleri.....	55
Tablo 4.4.	Al/(1/7)Ru(II)+Alq ₃ /p-Si/Al diyot yapısının karanlık ve 30-100 mWcm ² ışık şiddeti altında lnI-V grafiğinden elde edilen diyot parametreleri.....	56
Tablo 4.5.	Al/(1/5)Ru+Alq ₃ /p-Si/Al MPS Schottky diyotun değişen sıcaklık değerlerinde, doygunluk I ₀ , idealite n, bariyer yüksekliği Φ _b ve seri direnç R _s değerlerinin incelenmesi.....	62
Tablo 4.6.	Al/p-Si/Al Schottky diyotun Frekans – İletkenlik – Gerilim ölçümlerinden elde edilen diyot parametreleri.....	68
Tablo 4.7.	Al/(1/2)Ru(II)+Alq ₃ /p-Si/Al Schottky diyotun Frekans – İletkenlik – Gerilim ölçümlerinden elde edilen diyot parametreleri.....	68
Tablo 4.8.	Al/(1/5)Ru(II)+Alq ₃ /p-Si/Al Schottky diyotun Frekans – İletkenlik – Gerilim ölçümlerinden elde edilen diyot parametreleri.....	69
Tablo 4.9.	Al/(1/7)Ru(II)+Alq ₃ /p-Si/Al Schottky diyotun Frekans – İletkenlik – Gerilim ölçümlerinden elde edilen diyot parametreleri.....	69

Si TABANLI Ru(II) KOMPLEKS YAPISINA Alq₃ ORGANİK BİLEŞİĞİNİN ELEKTRİKSEL VE FOTOVOLTAİK ÖZELLİKLERİNİ ARTTIRMADAKİ ETKİSİ

ÖZET

Kompleks yapıların diyot üzerinde karakterizasyonlarını anlayabilmek amacıyla Ru(II) ve Alq₃ kompleks-organik molekülleri döndürerek kaplama/spin coating ve termal buharlaştırma teknikleri kullanılarak yarıiletken malzeme olan p-tipi-Si alttaş üzerine shottky diyot fabrikasyonu yapıldı. Kompleks moleküllerin diyot akım iletimine etkisi incelenirken bir adet referans olarak arayüzey-siz Al/p-Si/Al üç adet arayüzey madde miktarları değişen Al/Ru(II)+Alq₃/p-Si/Al shottky diyot fabrikasyonu gerçekleştirildi. Arayüzey solisyonlarının optik özellikleri UV-Absorbasyon'da analiz edilerek bant aralığı 2.23 eV, 2.31 eV, 2.33 eV olarak hesaplandı. Spin coating cihazı ile p-Si parlak yüzeyine komplekslerimiz ince film şeklinde kaplandı. SEM ve AFM cihazları kullanılarak yüzey morfolojisi incelendi. Fotovoltaik performansını anlayabilmek için karanlık ve güneş simülatörü altında 30-100 mW/cm² arasında farklı ışık şiddetleri altında açık devre voltajı V_{oc}, kısa devre akımı I_{sc}, doluluk faktörü FF, güneş enerji verimliliği η gibi fotovoltaik parametreleri incelendi. Organik arayüzeye sahip fotodiyotların, arayüzey-siz referans diyota nazaran ışık şiddetinin artması ile ters beslem bölgesinde akımın nisbeten daha fazla arttığı gözlemlendi. Karanlık ortamda alınan ölçümlerin TE teorisi ile referans ve organik madde miktarındaki artan oranlarla engel yüksekliği 0,78 eV/ 0,79 eV/ 0,76 eV/ 0,79 eV ve idealite faktörleri 1,82 / 4,73 / 3,65 / 4,29 olarak hesaplandı. Bir diğer diyot karakteristiği analiz yöntemi olarak sıcaklığa bağlı diyot parametreleri incelendi. 60-320 K aralığında sıcaklık değişiminde yapılan ölçümlerde yarı logaritmik akım-gerilim eğrileri TE, Norde ve Cheung fonksiyonları yardımıyla I₀ sızıntı akımı, n idealite, Φ_b bariyer yüksekliği ve R_s seri direnç diyot parametreleri hesaplandı. Frekansa bağlı diyot parametrelerini incelemek üzere 100-2000 kHz aralığında kapasite, iletkenlik, seri direnç diyot parametreleri incelendi.

Anahtar Kelimeler: Kompleks yapılar, Ru(II), Alq₃, organik yapılar, spin kaplama, termal buharlaştırma, idealite faktörü, engel yüksekliği, seri direnç, fotodiyot, kristal analizi.

THE EFFECT OF THE Alq_3 ORGANIC COMPOUND ON INCREASING THE ELECTRICAL AND PHOTOVOLTAIC PROPERTIES OF THE Si BASED Ru (II) COMPLEX STRUCTURE

ABSTRACT

In order to understand the characterization of complex structures on the diode, the shottky diode fabrication was performed on p-type-Si substrates, semiconductor material, by using Ru (II) and Alq_3 complex-organic molecules by using spin coating and thermal evaporation techniques. While the effect of complex molecules on diode current conduction was examined, Al / Ru (II) + Alq_3 / p-Si / Al shottky diode fabrication was performed as a reference. The optical properties of the interfacial solutions were analyzed by UV-Absorption and the band gap was calculated as 2.23 eV, 2.31 eV, 2.33 eV. Our complexes were coated with thin coating on the p-Si wafer surface with spin coating device. Surface morphology was examined using SEM and AFM instruments. In order to understand photovoltaic performance, photovoltaic parameters such as open circuit voltage V_{oc} , short circuit current I_{sc} , fill factor FF, solar energy efficiency η , under dark and solar simulator under different light intensities between 30-100 mW/cm² were examined. It was observed that the photodiodes with organic interface increased the current in the reverse feed region relatively with the increase in light intensity compared to the reference diode without interface. Barrier height 0.78 eV / 0.79 eV / 0.76 eV / 0.79 eV and ideality factors 1.82 / 4.73 / 3.65 / 4.29. Temperature-dependent diode parameters were analyzed as another diode characteristic analysis method. In the measurements carried out in the temperature range of 60-320 K, semi-logarithmic current-voltage curves were calculated by using TE, Norde and Cheung functions, I_0 leakage current, n ideality, Φ_b barrier height and R_s series resistance diode parameters. In order to examine frequency dependent diode parameters, capacitance, conductivity, series resistance diode parameters in 100-2000 kHz range were examined.

Keywords: Complex structures, Ru (II), Alq_3 , organic structures, spin coating, thermal evaporation, ideality factor, barrier height, series resistance, photodiode, crystal analysis.

1. GİRİŞ

Tarih boyunca bilim insanları benzer özellik gösteren maddeleri gruplar haline ayırarak çeşitli sınıflandırmalar yapmışlardır. Bu sınıflandırmalardan Fizik kapsamına bakıldığında en popüler olanlarından biri belkide malzemelerin elektriksel karakteristiklerinin incelenmesidir. Geçmişten günümüze elektrik devre elemanları gelişmişliğin temel yapı taşları olarak görev yapmaktadır.

Maddeleri iletkenliklerine göre sınıflandırırken 19. Yüzyılın başlarında yarıiletkenler henüz sınıflandırmaya dahil edilmemişti. Elektriksel iletkenliğe göre malzemeler iletken ve yalıtkan olarak ikiye ayrılıyordu. 1833 yılında Michael Faraday, gümüş sulfat numuneleri üzerinde gerçekleştirdiği deneyler doğrultusunda yarıiletkenleri tanımlayarak literatürdeki yerini kazandırdı. Faraday sıcaklığa bağlı direnç ölçümlerinde gümüş sülfat (Ag_2SO_4)'ın direncinin iletken olan metallerin direncine ters olarak artan sıcaklıkla azaldığını gözlemlemiş ve doğada benzer malzemelerinde va roldüğü inancını arttırmıştır (Laeri et al. 2003). 20. Yüzyıla girildiğinde malzemelerin elektriksel iletkenlikleri değişen şartlar altında incelendiğinde, 1911 yılında H.K.Onnes yaptığı çalışmalarda belirli şartlar altında helyum gazını sıvılaştırarak düşük sıcaklıkta bir çalışma ortamı sağlamış ve bu ortamda cıvanın düşük elektriksel direncinin ölçülemeyecek kadar düşük bir değere düştüğünü gözlemlemiştir. Onnes bu yeni olayı süperiletken olarak adlandırmıştır (Onnes, 1911). 19. Yüzyılın son çeyreğine girildiğinde Karl Ferdinand Braun, metal oksitlerde iletkenlik ve doğrultma özelliğini gözlemledi. Braun yaptığı bu çalışmada, yarıiletken kristalleri üzerine bakır (Cu) ve demir (Fe) gibi metal kontakların doğrultucu etkisini keşfetmesiyle, metal-yarıiletken (MS) yapılar üzerine ilk çalışmayı gerçekleştirmiş oldu (Braun 1875). 1884 yılına girildiğinde Charles Fritts, metal plaka ve çok ince altın tabaka ile kaplanmış ince selenyumdan oluşan ilk güneş pilini oluşturmuştur (Perlin 2002). 1907 yılına gelindiğinde Henry Joseph Round, yaptığı çalışmalarda karborandum kristaline bir gerilim uygulayarak sarımsı bir renk yaydığını gözlemlemesiyle ilk ışık yayan diyotu (LED) elde etmiş oldu (Round 1907). 1931 yılında Schottky, Störner ve Waibel yaptıkları

çalışmalarda, potansiyel değişimlerin meydana getirdiği akım iletimi yardımıyla birkaç çeşit potansiyel engelinin varolduğunu belirlemişlerdi (Rhoderick et al. 1988). Bu gelişmeler sırasında kuantum mekaniği tam olarak kurulmuş ve A.H. Wilson, potansiyel engeli boyunca elektronun kuantum mekaniksel tünelleme teorisini geliştirmiştir. Wilson, katıların bant teorisine dayanan yarıiletkenlerin akım iletim teorisini ilk defa formülide ederek ilerleyen zamanlarda bu teori MS kontaklara uygulanmıştır (Wilson 1931). 1938 yılında Walter H. Schottky ve Nevil Mott, MS kontakların doğrultma özelliklerinin araştırılması üzerine ilk ciddi adımı birbirlerinden bağımsız olarak gerçekleştirmişlerdir. Schottky ve Mott'a göre elektronlar gözlenen doğrultma yönünde, potansiyel engeli üzerinden difüzyon ve sürüklenme yoluyla geçmektedirler. Mott'un yaklaşımına göre; Metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki fark bir potansiyel engeli ortaya çıkmaktadır. Mott, MS arayüzeyde elektrik alanın sabit olduğunu ve kirlilik atomlarının olmadığını kabul etmiştir. Schottky ise; kontak arayüzeyinde sabit kirlilik atomlarının bulunduğunu ve elektrik alanın gauss kanununa göre tükenim bölgesinden olan uzaklıkla lineer olarak arttığını tesbitinde bulunmuştur. Mott'a göre elektrostatik potansiyel metale olan uzaklıkla lineer olarak değişmekte, schottky'e göre elektrostatik potansiyel metal sınırına kadar Poisson Denklemi ile uyumlu olarak kuadratik değişmektedir (Sze 1981a). 1940'lı yıllarda Bethe termiyonik emisyon (TE) teorisini, schottky ise difüzyon teorisini geliştirmişlerdir (Rideout 1978). Richardson, metal vakum sistemleri için TE teorisini bulmasından sonra, bu yapının MS yapılarına uygulanabilirliği 1942 yılında Bethe tarafından açıklanmıştır (Tan 2018). 1947 yılında Barden, germanyum transistörlerini yaparak nokta kontak germanyum diyotlarında taşıyıcı enjeksiyonunu bulmuştur. Arayüzey hallerindeki net elektrik yükü ve zıt işaretli uzay yükünden dolayı yarıiletkenin serbest yüzeyde çift bir tabakanın (dipol tabaka) oluşacağını öngörmüştür (Barden 1947). 1959 yıllarında birbirlerinden ayrı çalışmalar yürüten J.L. Moll ile W.G. Pfann ve G.B. Garret metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapıları üzerinde çalışmış ve voltaj ayarlı kondansatör üreterek literatüre bir ilki kazandırmışlardır (Moll 1959). Bu yapının MIS ilk kez schottky diyotu olarak literatürde yer alması ise L. M. Terman ile K. Lehovec ve A. Slobodskoy'un yaptıkları çalışmalar ile gerçekleşmiştir (Terman 1962 ; Lehovec and Slobodskoy 1963). J.L.Moll yaptığı çalışmalarda termal olarak oksitlenmiş bir silisyum yarıiletken kristalinin üzerine aliminyum metal elektrot oluşturmuş ve metal ile yarıiletken arasında yapay veya doğal olarak oluşmuş bir oksit tabakasının varlığını gözlemleyerek metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapılarının tanımını yapmıştır (Moll 1959).

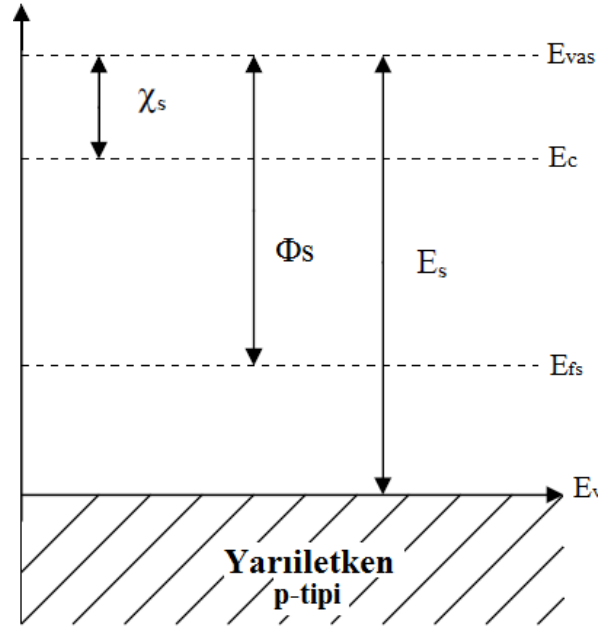
Daha sonra L.M. Terman, MOS kapasitörün oksit-silisyum arayüzeyinde bağ durumlarının özelliklerini araştırmış ve kapasitöre uyguladığı doğru akım gerilim ile kapasitansın frekansla değişimini gözlemlemiştir (Terman 1962). 1964'de Baird, schottky engelini silisyum transistörlerle birleştirerek schottky engel kapılı MS alan etkili transistörü (MESFET) üretmiştir (Rhoderick 1988). MS üzerine yapılan çalışmalar doğrultusunda 1966 yılında Crowel ve Sze. Bethe'nin termiyonik emisyon ve Schottky'nin difüzyon modelini birleştirerek schottky diyotlarında akım-iletim olayında önemli bir yer alan Termiyonik Emisyon-Difüzyon teorisini ortaya koymuşlardır (Cowell et al. 1966). 1971 yılında Card ve Rhoderick, doğru beslem beslem durumunda akım-gerilim (I-V) grafiklerin eğiminden bulunan ve temel diyot parametresi olan idealite faktörünün değerini dikkate alarak, arayüzey durumlarını incelemişler ve arayüzey durumlarıyla ilgili teorik ve deneysel açıklamalarda bulunmuşlar (Card and Rhoderick 1971). 1979 yılında Barret ve Vapaille MS diyotların doğru beslem ölçümlerinden, arayüzey hallerinin yoğunluk dağılımını ve doğrulama zamanını belirlemişlerdir (Barret et al. 1979). 1979 yılında Norde, Schottky diyotun akım-gerilim ölçümlerinden faydalananarak engel yüksekliği, seri direnç gibi diyotun bazı temel parametrelerinin hesaplanabileceği fonksiyonlar önermiştir (Norde 1979). 1981'li yıllarda Sze yaptığı çalışmalarda, p-n eklemeleri için birçok metot geliştirmiştir ve yaptığı çalışmalar doğrultusunda MS kontakların bu eklem yapılarında akım iletiminde omik kontak olarak değerlendirilmesi gerektiğini belirtti (Sze 1981a). MS kontakların birleştirilmesi ile oluşturulan schottky diyotlar, yapı itibarıyla bir p-n ekleminden farklıdır. Akım p-n eklemesinde azınlık yük taşıyıcıları ile sağlanırken, Schottky diyotlarında çoğunluk yük taşıyıcılarıyla sağlanmaktadır. Schottky kontak diyotlar düşük gerilim, yüksek akım doğrultucuları olarak çalışırken, p-n eklemeleri yüksek gerilim, düşük akım doğrultucuları olarak çalışmaktadır.

1983 yılına gelindiğinde Willson, MS diyotlar için kuantum mekaniksel tünelleme teorisi geliştirdi ve doğrulama teorisi için ters polariteyi açıkladı (Wilson 1983). 1986 yılında Cheung ve Cheung, akım-gerilim ölçümlerinden Schottky diyotun bazı temel parametrelerinden; seri direnç, engel yüksekliği ve idealite faktörünün hesaplanabileceği fonksiyonlar geliştirmişlerdir (Cheung and Cheung 1986). Arayüzey tabakasının diyot karakteristiğine etkisinin anlaşılmasından sonra, arayüzeyde farklı maddeleri kullanılarak üretilen Schottky diyotlar üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. 1986 yılında S.R. Forrest ve P.H. Schmidt, organik-inorganik kontakın doğrulama karakterlerini ayrıntılı bir şekilde

inceleyerek yaptıkları araştırmaların neticesinde iletkenliğin ve kapasitenin frekansa bağlı olarak değiştiğini yorumlamışlardır. Çalışmalarında, düşük frekans değerlerinde kapasite ve iletkenliğin uygulanan gerilimin bir fonksiyonu olarak değerlendirilmesiyle, yasak enerji aralığındaki yüzey durumlarının büyüklüğünü ve enerjiye bağlılığının tesbit edilebileceğini belirtmişlerdir. İdealite faktörü olan n değerinin ise organik ve inorganik meteryaller ile denge durumda olan yüzey durumlarına bağlı olduğunu belirtmişlerdir (Forrest et al. 1986). Schottky kontağının elektriksel özelliklerini modifiye etmek için bir çok araştırmacı arayüzey malzemesi olarak organik yarıiletken malzemeler kullanmaktadır (Grupta et al. 2005; Okur vd. 2009; Yakuphanoglu vd. 2010; Yahia et al. 2011). Bu yaklaşımın birçok nedeni bulunmaktadır. Bunlardan bazıları; organik yarıiletkenlerin baskı ve spin kaplama gibi pratik ve tek seferde oldukça fazla üretim yapılabilmesi, ekonomik olarak daha uygun maliyetle üretilebilmeleri, yüksek nonlineerlik ve esneklik gibi birçok özelliğe sahip olmaları arayüzeyde organik materyallerin kullanımını teşvik etmektedir (Güllü vd. 2010). Bir MS, MIS, metal polimer yarıiletken (MPS) schottky engel diyotları veya benzeri güneş pilleri gibi yarıiletken tasarımlarda, tek veya dar bir sıcaklık aralığında gerçekleştirilen elektriksel ölçümleri bize metal ile yarıiletken arasında doğal veya doğal olmayan yollarla oluşan engel yüksekliği hakkında detaylı bir bilgi veremez. Oda sıcaklığı altındaki düşük sıcaklıklarda birçok akım mekanizması tek başına veya birlikte baskın olabilir. Özellikle yüksek katkılı yarıiletkenlerde bu ihtimal daha fazladır. Düşük katkılı yarıiletkenlerde yük taşıyıcılarıyla beraber yapıda geniş bir tükenim tabakası oluşur ve oluşan bu geniş tükenim tabakası tünelleme ihtimaliyetini azaltır. Diğer taraftan yüksek katkılmalarda engel içerisinde tünelleme olasılığının yüksek olduğu ince bir engel oluşabilir. Genel itibarıyla metal ile yarıiletken arayüzeyinde ince bir organik tabakanın varlığı arayüzey durumlarını ve sızıntı akımını azaltmak , aygıt performansını mümkün olan en üst seviyede elde etmek için tercih edilen bir yöntem olarak düşünülebilir (Taşcıoğlu vd. 2010). Bu alandaki yapılan akademik çalışmalar endüstriyel alanda kendisini göstermiş olup, elektronik ve optoelektronik uygulamalarda organik ışık yayan diyot (Organic Light Emitting Diode – OLED), organik alan etkili transistör (Organic Field Effect Transistor – OFET), Schottky engel diyotları ve güneş pilleri, elektronların kuantum mekaniksel dönüş ve yük özelliklerinden faydalanarak geliştirilen spintronik gibi teknolojik uygulamalarda oldukça fazla kullanılmaktadır (Yahia et al. 2011).

1.1. Yarıiletken Bant Yapısı

Akım iletiminde en çok aranan özellik akımın istenilen direnç ve istenilen yönde yönlendirilebilmesidir. Temel durumda bulunan yarımetal malzemelerde elektronlar her atom için belirli enerji seviyelerinde varlıklarını göstermektedirler. Temel durumda olan yapılara katkı veya kontak yapılarak akım iletimi üzerine yönelimler elde edilebilmektedir. Yapılacak olan katkı ve kontak durumları için malzemenin karakteri doğrultusunda hareket edilmektedir. Bunun için Şekil 1.1’de görüleceği üzere kontak haline getirilmeden önce yarıiletkenin enerji ve bant diyagramı incelenerek buna uygun kontak durumları gözetilmelidir.



Şekil 1.1. Termal denge durumunda p-tipi bir yarıiletkenin enerji seviyeleri

Şekil 1.1’de p-tipi bir yarıiletkenin enerji düzeyleri görülmektedir. Bir yarıiletkende akım iletimi için temel olarak dikkate alınması gereken dört enerji seviyesi vardır;

E_{vs} : Yarıiletken vakum enerji seviyesi, bir yarıiletkenin en dışındaki sıfır kinetik enerjiye sahip bir elektronun enerji seviyesini temsil eder. Bir başka deyişle bir elektronun yüzeyden koparıp serbest hale gelebilmesi için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarıdır.

E_c : Yarıiletken iletkenlik bandı enerji seviyesi, valans elektronlarının alması gereken min enerji miktarı olarak bilinir.

E_{fs} : Yarıiletken fermi enerji seviyesi, Mutlak sıfır sıcaklığındaki ($T=0$ K) elektronların maksimum enerjisidir. İletkenlerde taban durumundan itibaren işgal edilen en üst seviyedeki doluluğa teammül eder. Yarıiletkenlerde ise bu seviye iletkenlik ve valans bandındaki taşıyıcı iyonlarının sıcaklığa bağlı olarak, yasak enerji aralığında yer alan izafi bir seviyedir. P-tipi yarıiletkenlerde Fermi enerjisi, valans bandından itibaren ölçülürken n-tipi yarıiletkenlerde iletim bandından itibaren ölçülür.

E_v : Yarıiletken valans bandı enerji seviyesi, elektron içeren son temel hal bandıdır, aynı zamanda değerlik bandı olarak da ifade edilmektedir.

Yarıiletkenler için temel dört enerji seviyesi arasında oluşan üç değişik enerji seviye farkı da aşağıdaki denklemlerde belirtilmiştir;

Yarıiletkenin vakum enerji seviyesi ile iletkenlik bandı enerji seviyesi arasındaki enerji farkı, yarıiletkenin elektron yakınlığı/ilgisi (χ_s) olarak adlandırılmıştır.

$$\chi_s = E_{VAS} - E_c \quad (1.1)$$

Yarıiletkenin vakum enerji seviyesi ile fermi enerji seviyesi arasındaki enerji farkı, iş fonksiyonu (Φ_s) olarak adlandırılmıştır.

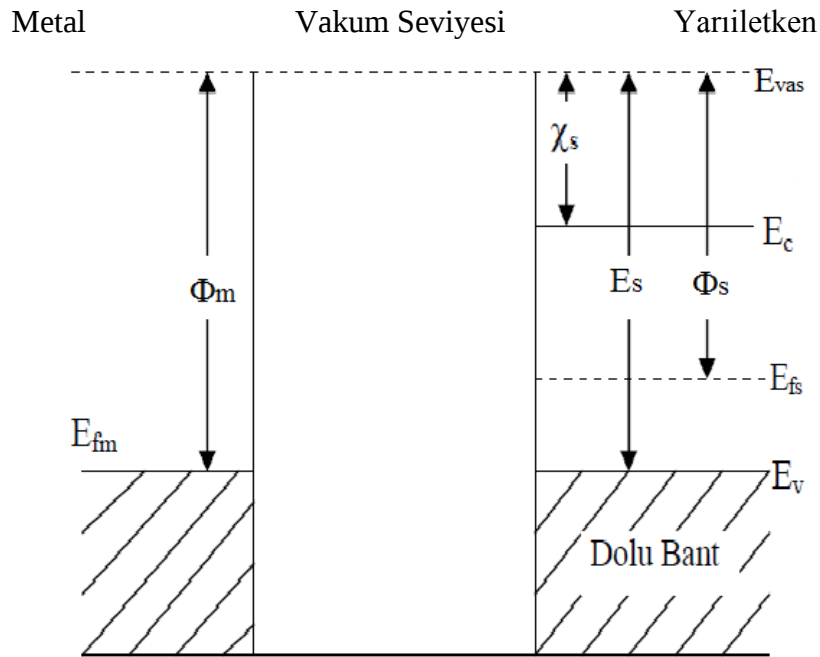
$$\Phi_s = E_{VAS} - E_F \quad (1.2)$$

Yarıiletkenin vakum enerji seviyesi ile valans bandı enerji seviyesi arasındaki enerji farkı, dolu bandın vakum seviyesi altındaki derinliği (E_s) olarak adlandırılır.

$$E_s = E_{VAS} - E_v \quad (1.3)$$

1.2. Metal-Yarıiletken (M/S) Kontaklar

Bir metal ile yarıiletken kontakta önce bant seviyeleri Şekil 1.2’de görüleceği üzere farklılık gösterir, kontak edildikten sonra enerji bant diyagramlarının farklı olmasından dolayı aralarında bir yük transferi gerçekleşir. Bu olay termodinamik ısı denge durumuna ulaşmaya kadar devam etmektedir. İki malzeme arasında meydana gelen engel, MS arayüzündeki yüklerin difüzyonu sonucu ortaya çıkmaktadır. Yani metal tarafında çoğunlukta olan taşıyıcılar difüzyon yoluyla yarıiletkenin ön yüzüne ve yarıiletken tarafında çoğunlukta olan taşıyıcılar ise metalin ön yüzüne geçerek MS arayüzünde bir potansiyel farkı/engel oluştururlar. Böylece MS arayüzünde hareketli taşıyıcılardan arınmış yüksek dirençli bir tüketim bölgesi oluşur. Bu tabaka bazen Schottky tabakası olarak da adlandırılır.



Şekil 1.2. Bir metal (M) ile yarıiletkenin (S) kontakta önceki enerji seviyeleri

MS kontaklarda akım iletimi iletkenlerdeki gibi sadece elektronlarla olmayıp hem boşluk/hol’ler hem de elektronlar tarafından gerçekleşmektedir. Azınlık ve çoğunluk taşıyıcıların meydana getirdiği akım, azınlık ve çoğunluk taşıyıcı akımı olarak bilinmektedir. Bir metal/p-tipi yarıiletken kontakta çoğunluk akım taşıyıcıları holler iken, metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda çoğunluk akım taşıyıcıları elektronlardır. MS arasında

oluşan engel yüksekliğini açıklayan ilk teori Schottky ve Mott tarafından önerilmiştir. Metalin iş fonksiyonu Φ_m ve yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s olmak üzere, MS doğrultucu kontağın oluşabilmesi için n-tipi yarıiletken kontaklarda $\Phi_s < \Phi_m$ ve p-tipi yarıiletken kontaklarda ise tam tersine $\Phi_s > \Phi_m$ olmalıdır (Singh 1985; Neamen 1992). Omik kontaklarda ise hem n-tipi hem de p-tipi yarıiletken kontaklar için durum doğrultucu kontağın tam tersidir. Yani n-tipi yarıiletken kontaklarda iş fonksiyonu $\Phi_s > \Phi_m$ ve p-tipi yarıiletken kontaklarda ise tam tersine $\Phi_s < \Phi_m$ olmalıdır. Hem omik, hem de doğrultucu kontak oluşumunda metal ile yarıiletken iş fonksiyonları Tablo 1.1’de;

Tablo 1.1. MS kontaklarda doğrultucu ve omik kontak oluşumu için metal ve yarıiletken iş fonksiyonları

Kontak türü	n-tipi	p-tipi
Doğrultucu kontak	$\Phi_s < \Phi_m$	$\Phi_s > \Phi_m$
Omik kontak	$\Phi_s > \Phi_m$	$\Phi_s < \Phi_m$

MS kontakların imalatında Tablo 1.2 ve Tablo 1.3’de verilen değerler dikkate alınarak metal ve yarıiletkenin türüne göre uygun kontaklar üretilmektedir.

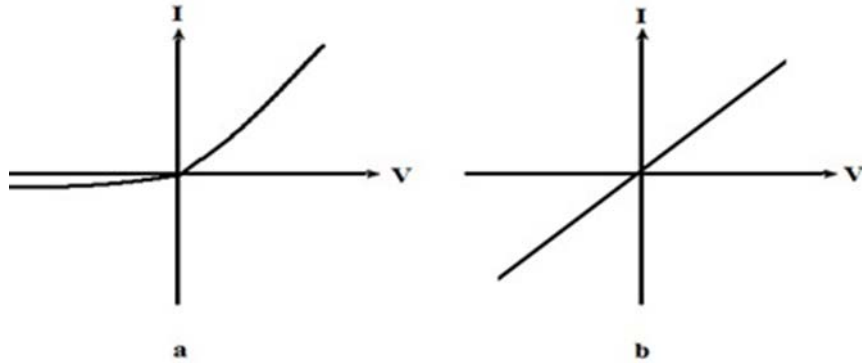
Tablo 1.2. Bazı elementlerin elektron ilgisi

Element	Elektron ilgisi (χ , volt)
Germanyum	4,13
Silisyum	4,01
Galyum Arsenid	4,07
Aluminyum Arsenid	3,50
İndium Fosfat	4,35

Tablo 1.3. Bazı elementlerin iş fonksiyonu değerleri

Element	İş Fonksiyonu (Φ_m , Volt)
Gümüş	4,26
Alüminyum	4,28
Altın	5,10
Krom	4,50
Molibden	4,60
Nikel	5,15
Paladyum	5,12
Platin	5,65
Titanyum	4,33
Tungsten	4,55

MS kontaklar metal ile yarıiletken maddenin iş fonksiyonuna göre Tablo 1.3'deki veriler dikkate alınarak doğrultucu/schottky ve omik kontak olmak üzere iki kısımda incelenir. Şekil 1.3'de kontak durumlarına göre oluşan akım iletim grafikleri görülmektedir.



Şekil 1.3. Düz beslem (dc) akım-gerilim'in lineer grafikleri a) Doğrultucu kontak b) Omik kontak

1.3. Metal / p-Tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontak

MS kontaklarda, akım taşıyıcıların bir yönden diğer yöne göre daha kolayca yük transferinin gerçekleştiği kontak çeşitleri doğrultucu kontaklar olarak ifade edilir. Metal ile p-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonlarına bağlı olarak, $\Phi_m < \Phi_s$ durumunda metal/p-tipi doğrultucu kontak oluşur. Kontak yapıldığı zaman, her iki materyalin fermi enerji seviyeleri aynı enerji seviyesinde olacak şekilde yarıiletkenin kontak yüzeyindeki bantlarda yukarı yönde bir bükülme meydana gelir. Yukarı yönde meydana gelen bu bükülmeden mütevellit yarıiletkenin yasak enerji aralığı bir bütün olarak bir miktar yukarı yönelir. Yasak enerji aralığındaki bu değişimin sebebi, metaldeki enerjisi yüksek olan elektronların, p-tipi yarıiletkenin çoğunluk yük taşıyıcıları olan hollere doğru hareket etmelerinden kaynaklanmaktadır. Bu bükülme, yarıiletkenin E_{fs} seviyesi ile metalin E_{fm} seviyesi eşit oluncaya kadar devam eder. Metal içerisindeki elektronların enerji seviyelerindeki yerlerini terk edip yarıiletkene geçerek yarıiletkendeki boş enerji seviyelerine yerleşmelerinden dolayı, yarıiletkendeki holler sanki metal içerisine doğru hareket ediyorlarmış gibi görünür. Bu geçişten dolayı elektron alan yarıiletkenin yüzey tarafı iyonize olmuş elektronlar tarafından d kalınlığında bir tükenim bölgesi (uzay yükü tabakası) oluştururlar. Elektron veren metal kısmında sadece yüzeyde pozitif olarakta bilinen holler meydana gelir. Kontak oluşumu sonucunda fermi seviyeleri eşitlenen metal ve yarıiletkende iş fonksiyonları ve yarıiletken tarafındaki enerji seviyeleri,

$$\Phi_s - \Phi_m = E_{fm} - E_{fs} \quad (1.4)$$

fermi enerji seviyeleri farkları kadar yükselmektedir. Bu durumda kontağın yarıiletken tarafındaki boşluklar için engel yüksekliği,

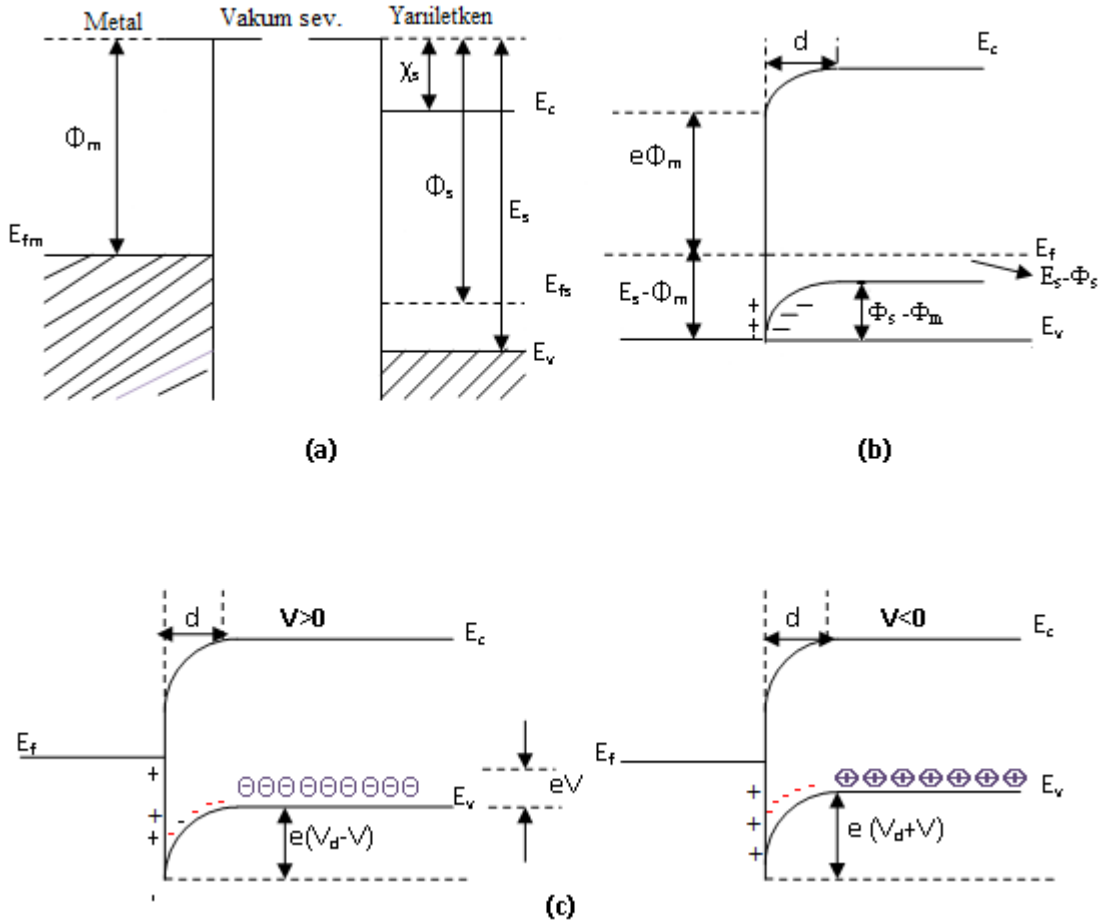
$$eV_d = e(\Phi_s - \Phi_m) \quad (1.5)$$

olur. Burada V_d engel yüksekliği difüzyon potansiyeli olarak adlandırılır. Yarıiletken içerisindeki V_d potansiyeli metalin yüzeyinden itibaren hesaplanır.

Kontağın metal tarafındaki boşluklar için engel yüksekliği ise;

$$e\Phi_b = (\Phi_s - \Phi_m) + (E_s - \Phi_s) = E_s - \Phi_m \quad (1.6)$$

ifadesi ile verilir. Kontak durumunda enerji seviyelerindeki değişimler Şekil 1.4’de gösterilmektedir.



Şekil 1.4. Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontağın enerji bant diyagramı a) Kontak öncesi b) Kontak sonrası ve Termal denge durumunda c) $V \neq 0$ durumu

Termal uyarılma durumunda kontağın yarıiletken tarafında bazı holler enerji kazanarak potansiyel engelini aşıp metal tarafına nüfus edebilirler. Aynı uyarılma durumunda metal tarafında uyarılan bazı hollerde enerji kazanarak engeli aşıp yarıiletkenin tarafına geçebilirler, burada kontakta engeli aşan holler eşit ancak zıt yüklü I_0 akımlarını oluşturur. Bu durumda sistem termal dengededir ve net akım akışı sıfırdır. Yarıiletkene bir V gerilimi

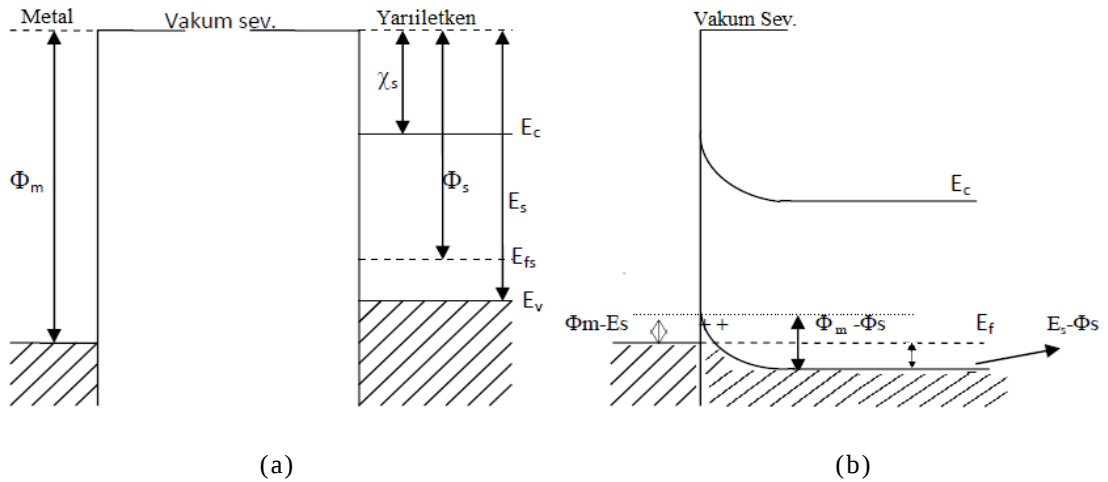
uygulandığında Şekil 1.4.(c)'de, metal tarafından yarıiletkenine akan hol akımında değişiklik olmayacak fakat yarıiletkenden metale akan hol akımı, yarıiletkendeki enerji seviyeleri eV kadar düştüğü için, $\exp(eV/kT)$ çarpanı kadar değişir. Yarıiletkenden metale doğru yönelen akım pozitif kabul edersek bu durumda karakteristik akım;

$$I = I_0 [\exp(eV/kT) - 1] \quad (1.7)$$

Denklem 1.7'de I_0 termal durumdaki doyma akımını, V uygulanan gerilimi, k Boltzman sabitini, T ise mutlak sıcaklığı temsil etmektedir (Sze 1981b; Neaman 1992). Burada görülmektedir ki, yarıiletkenden metale geçen holler için engel yüksekliği uygulanan V değeri kadar azaldığı görülmektedir.

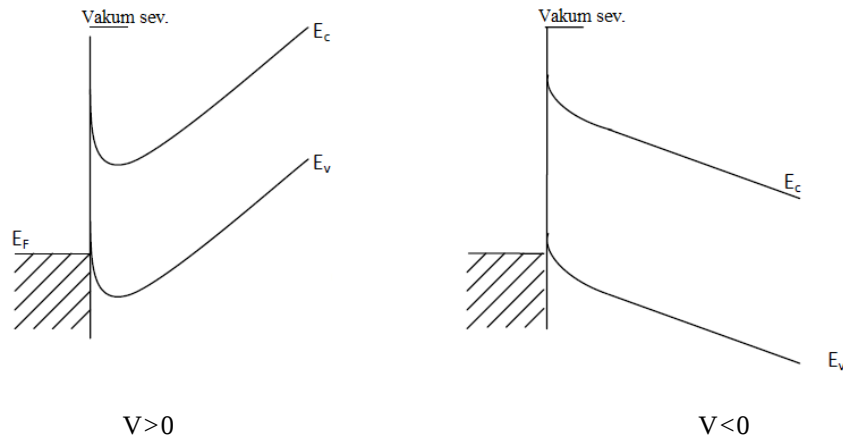
1.4. Metal / p-Tipi Yarıiletken Omik Kontak

Metal ile yarıiletken kontak haline getirilirken Tablo 1.1'deki gibi metalin iş fonksiyonu, yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyük ise ($\Phi_m > \Phi_s$), oluşacak olan kontak omik kontak olacaktır. Omik kontak, uygulanan gerilimin polaritesinden bağımsız olarak her iki yönde de akım akışına minimum direnç gösteren bir kontak şeklidir (Brillson 1993; Neamen, 1992; Holloway, 1997).



Şekil 1.5. $\Phi_m > \Phi_s$ durumu için metal/p-tipi yarıiletken kontakın, a) Kontakdan önce b) Kontakdan sonra, oluşan enerji-bant diyagramları

Kontaktan sonra termal denge durumunda yarıiletkendeki elektronlar, geride bir pozitif yüzey yükü (holler) bırakarak ve metal tarafında bir negatif yüzey yükü oluşturacak şekilde metal tarafına akarlar, bu durumda yarıiletkendeki fermi seviyesi Şekil 1.5(b)'de görüldüğü gibi iş fonksiyonlarında $(\Phi_m - \Phi_s)$ kadar değişim gerçekleşir, yarıiletken yüzeyindeki hol konsantrasyonunun artmasından dolayı, yarıiletken kontak temas yüzeyinde daha fazla hol veya çoğunluk taşıyıcıları oluşmaktadır. Bu durumda tükenim bölgesi oluşmaz fakat daha çok çoğunluk yük taşıyıcıları eklem bölgesinin yakınında toplanmalarından dolayı yarıiletkenin kontak yüzeyindeki hol yoğunluğu yüzey yükü tabakası (dipol tabakası) olarak gözlemlenir. Oluşan bu dipol tabaka akım iletiminde gerçekleşen yük geçişlerine engel teşkil etmez ve bu durumda kontak bir diyot gibi davranış göstermez, bu durum omik kontak olarak adlandırılır.



Şekil 1.6. Metal/p-tipi yarıiletken omik kontağa ait enerji bant diyagramı ($V > 0$) Doğru beslem altında ($V < 0$) Ters beslem altında

Bir V voltajı uygulandığında, Çoğunluk taşıyıcılar bir dış beslem altında her iki yönde serbestçe akarlar. Uygulanan potansiyel fark tüm yarıiletken bölge boyunca dağılır. Kontak yarıiletken bölgesinde $(\Phi_s - \chi_s)$ nispeten elektronlar zorlukla karşılaşmadan engeli geçebilirler. Şekil 1.6 (Brillson 1993; Neamen 1992)'da görüleceği üzere $V > 0$ 'da elektronlar, metalden yarıiletken içindeki boş durumlara kolayca hareket edebilirler. Metal tarafına geçen boşluklar yüksek elektron konsantrasyonundan dolayı hemen nötralize olurlar. Ters beslem yani $V < 0$ 'da metal bölgedeki termal olarak oluşan holler bir zorluk ile karşılaşmadan yarıiletken bölgesine geçerler.

Termiyonik emisyon teorisi (i.); genellikle orta seviye katkılanmış ($N_D \leq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) yarıiletkenlerin kullanıldığı normal sıcaklıklarda Si ve GaAs ile yapılan Schottky engel diyotlarda baskın bir akım iletim mekanizmasıdır. (ii.) durumdaki akım iletim mekanizması düşük sıcaklık ve yüksek katkılı yarıiletkenler için önemlidir ve ideal olmaya durumları ifade eder. Burada elektronlar engel yüksekliğini geçemeyecek kadar az enerjiye sahiptir. Dolayısıyla bu engeli aşmaları için engel içerisinden tünelleme yaparlar. Buna Kuantum Mekaniksel Tünelleme denir. (iii.) durumda ise uzay yükü bölgesinde taşıyıcıların (elektron ve hol) birleşmesi veya oluşması olayıdır. (vi.) durumda ise yarıiletkendeki akım iletimi hem azınlık hem de çoğunluk taşıyıcılarla olur.

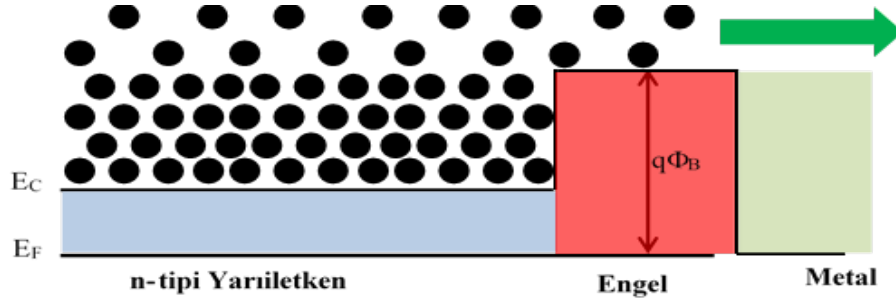
1.6. Termiyonik Emisyon ve Difüzyon Teorisi

1.6.1. Termiyonik Emisyon Teorisi

MS kontaklarda (Schottky kontaklarda), yeterli termal enerji kazanan taşıyıcıların oda sıcaklığında kT/q ' dan büyük olan potansiyel engel Φ_B üzerinden, metalden yarıiletkenle veya yarıiletkenden metale geçmeleri TE teorisi olarak bilinir. Şekil 1.8 (Sze and Kwok 2007_b)'de görüleceği üzere TE teorisi çoğunluk taşıyıcılarla ve potansiyel engel ile ilişkilendirilir. Burada potansiyel engelin şeklinden ziyade engel yüksekliği önemlidir.

TE kontrol mekanizması olması için kıyas,

- Maxwell-Boltzmann yaklaşımının uygulanabilmesi
- Engelin içerisindeki tüketim bölgesinde çarpışma veya sürüklenme etkilerinin ihmal edilebilir olması
- Potansiyel engel yüksekliğinin, (kT/q) termal enerjisinden daha büyük olması
- Taşıyıcılar engeli geçtikten sonra, o bölgedeki difüzyon akımı sınırlayıcı faktör olmamalı
- Engel genişliği taşıyıcıların ortalama serbest yollarından daha dar olması gerekir.



Şekil 1.8. Engel üzerinden Termiyonik Emisyonu gösteren enerji bant diyagramı

Yarıiletken tarafından kontağın metal tarafına doğru akan akım yoğunluğunun J_{sm} ve metalden yarıiletkene doğru akım yoğunluğunun J_{ms} olmak üzere, J_{sm} akım yoğunluğu, x yönünde ve engeli aşabilecek büyüklükte hızlara sahip elektronların yoğunlaşmasının bir fonksiyonudur. Elektronların yarıiletkenden metale doğru nüfus ederken oluşturduğu birim alan başına akım yoğunluğu $J_{s \rightarrow m}$ aşağıdaki gibi tanımlanır (Grundmann 2016; Sze 2007_b).

$$j_{s \rightarrow m} = \int_{E'_C}^{\infty} e v_x dn \quad (1.8)$$

Burada v_x elektronların x yönündeki hızı, E'_C ise metalden TE için gerekli olan minimum enerji miktarıdır.

İletim bandındaki elektronların dağılımı, izinli kuantum durumlarının yoğunluğuyla verilir. Küçük enerji aralıklarında elektron yoğunluğu dn ;

$$dn = g(E)f(E)dE \quad (1.9)$$

ile gösterilir. Burada $g(E)$ iletkenlik bandındaki durum yoğunluğu, $f(E)$ Fermi-Dirac dağılım fonksiyonudur. Maxwell-Boltzman yaklaşımı ve durum yoğunluğu kullanılarak E ve $E+dE$ arasındaki elektron yoğunluğu;

$$dn = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} \sqrt{(E - E_c)} \exp \left(-\frac{(E - E_F)}{kT} \right) dE \quad (1.10)$$

ifadesi ile verilir. Burada $(E - E_C)$ serbest elektronların kinetik enerjisi ve m^* elektronun serbest kütlesi m_0 cinsindeki etkin değeridir.

Belirli bir 'E' enerji için, taşıyıcı hız v aşağıdaki gibi belirlenir.

$$E = E_c + \frac{1}{2}m^*v^2 \quad (1.11)$$

Buradan da,

$$\sqrt{E - E_c} = v \sqrt{\frac{m^*}{2}} \quad (1.12)$$

elde edilir. dE ifadesi ise,

$$dE = m^*v dv \quad (1.13)$$

şeklinde ifade edilir. Bu sonuçlar kullanılarak Denklem 1.10 yeniden düzenlenirse;

$$dn = 2 \left(\frac{m^*}{h} \right) \exp \left(\frac{-e\Phi_n}{kT} \right) \exp \left(\frac{-m^*V^2}{2kT} \right) 4\pi V^2 dV \quad (1.14)$$

elde edilir. Bu denklem hızları v ile $v + dv$ aralığında değişebilen elektronların miktarını belirlememizde yardımcı olur. Hız bileşenlerine ayrılırsa,

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \quad (1.15)$$

yazılır. Buradan Denklem 1.8;

$$J_{s \rightarrow m} = 2e \left(\frac{m^*}{h} \right) \exp \left(\frac{-e\Phi_n}{kT} \right) \int_{V_{ox}}^{\infty} V_x \exp \left(\frac{m^*V_x^2}{2kT} \right) dV_x \quad (1.16)$$

$$x \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(\frac{-m^*V_y^2}{2kT} \right) dV_y \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(\frac{-m^*V_z^2}{2kT} \right) dV_z$$

şeklinde yazılır. Burada x doğrultusundaki harekette geçmiş elektronun potansiyel engelini aşabilmesi için gerekli olan minimum hızı V_{ox} dır. Denklem 1.16'da değişken değiştirme yöntemi yapılarak;

$$\left. \begin{aligned} \frac{m^* V_x^2}{2kT} &= \alpha^2 + \frac{e(V_d - V)}{kT} \\ \frac{m^* V_y^2}{2kT} &= \beta^2 \\ \frac{m^* V_z^2}{2kT} &= \gamma^2 \end{aligned} \right\} \quad (1.17)$$

uygulanır ve V_{ox} için ise aşağıdaki ifade yazılırsa;

$$\frac{1}{2} m^* V_{ox}^2 = e(V_d - V) \quad (1.18)$$

burada $V_x \rightarrow V_{ox}$ şartı için $\alpha = 0$ olur ve

$$V_x dV_x = \left(\frac{2kT}{m^*} \right) \alpha d\alpha \quad (1.19)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu denklemler Denklem (1.16) de kullanıldığında;

$$J_{s \rightarrow m} = 2e \left(\frac{m^*}{h} \right)^3 \left(\frac{2kT}{m_n^*} \right)^2 \exp \left(\frac{-eV_n}{kT} \right) \exp \left(\frac{-e(V_d - V)}{kT} \right) \times \int_0^\infty \alpha \exp(-\alpha^2) d\alpha \int_{-\infty}^\infty (-\beta^2) d\beta \int_{-\infty}^\infty (-\gamma^2) d\gamma \quad (1.20)$$

elde edilir. eV_n yarıiletkenin Fermi seviyesi ile iletkenlik bandı tabanı arasındaki farktır. İntegraller alındığında;

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi e m^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left(\frac{-e\Phi_B}{kT} \right) \exp \left(\frac{eV}{kT} \right) \quad (1.21)$$

elde edilir. Uygulama gerilimi sıfır olduğunda J_{sm} ile J_{ms} birbirine eşittir.

Metalden yarıiletken akım yoğunluğu J_{ms} ;

$$J_{ms} = -A^*T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT}\right) \quad (1.22)$$

MS kontağa doğru beslem uygulanırsa, engel yüksekliği azalacağı için yarıiletkenden metale geçen akım yoğunluğu üstel olarak artar. Metal yarıiletken tarafında ise engel yüksekliği uygulanan gerilimden bağımsız olduğu için engel yüksekliği değişmez. Termal denge kurulduğunda hem yarıiletkenden metale hem de metalden yarıiletken geçen akım yoğunlukları eşitlenir. Toplam akım yoğunluğu ise bu iki taraflı akım yoğunluklarının toplamı kadardır.

$$J_T = J_{s \rightarrow m} + J_{m \rightarrow s} \quad (1.23)$$

ifadedeki değerler yerine yazılıp toplanırsa TE toplam akım yoğunluğu;

$$J_n = A^*T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1.24)$$

şeklinde olur. Burada $J_0 = A^*T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT}\right)$ sızıntı akımı olarak da adlandırılan doyma akımıdır. Doyma akımı sıcaklıkla doğru orantılıdır. Yani sıcaklık arttıkça doyma akımı da artar. T Kelvin cinsinden sıcaklık, q elektronik yük, k Boltzmann sabiti, Φ_B MS arayüzeyinde oluşan engel yüksekliği, V uygulanan voltajdır. A^* Richardson sabitidir ve aşağıdaki gibi ifade edilir (Sharma 1984; Rhoderick and Williams 1988);

$$A^* = \frac{4\pi em^*k^2}{h^3} \quad (1.25)$$

Denklem 1.24 düzenlenerek,

$$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1.26)$$

1.6.2. Difüzyon Teorisi

Yoğunlukları farklı iki bölge arasında çok yoğun ortamdan az yoğun ortama doğru olan yük geçişlerine difüzyon denir. Schottky tarafından ileri sürülen difüzyon teorisinin varsayımları şunlardır (Schotky 1938);

- i. MS kontakta oluşan engel yüksekliği kT/q termal enerjisinden çok büyüktür.
- ii. Tüketim bölgesindeki elektron çarpışma etkileri dahil edilir.
- iii. $x=0$ ve $x=W_D$ 'daki taşıyıcı konsantrasyonları akım tarafından etkilenmez yani taşıyıcılar termal dengedeki değerlerine sahiptir.
- iv. Yarıiletkendeki safsızlık konsantrasyonu dejenere değildir.
- v. Akım difüzyon ve sürüklenme ile sınırlanmıştır.

Kazanılan bilgiler doğrultusunda, tüketim bölgesinin akımı bölgesel alan ve yoğunluk farkına bağlı olduğundan dolayı akım yerine akım yoğunluğu ifadesi kullanılır. Bu denklemler n- tipi (MS) Schottky diyotlarda elektron akım yoğunluğu (Sharma 1984; Sze 2007_b);

$$J_x = J_n = q \left(n(x) \mu_n E_{(x)} + D_n \frac{dn}{dx} \right) = q D_n \left(\frac{n(x)}{kT} \frac{dE_c}{dx} + \frac{dn}{dx} \right) \quad (1.27)$$

şeklindedir. Burada, $(D_n = \frac{kT\mu_n}{q})$ elektron difüzyon sabitidir ve Einstein bağıntısı olarak da ifade edilir, $n(x)$ herhangi bir noktadaki n-tipi yarıiletken için taşıyıcı yoğunluğu, μ_n elektron hareketliliği (mobilité) ve $E_{(x)}$ Schottky bölgesinde konuma bağlı elektrik alanıdır. Sabit durum koşulları altında akım yoğunluğu x 'den bağımsızdır ve Denklem 1.27 bir integral faktörü olarak $\exp[E_c(x)/kT]$ kullanılarak integre edildiğinde,

$$J_n = \int_0^{W_D} \exp \left[\frac{E_c(x)}{kT} \right] dx = q D_n \left\{ n(x) \exp \left[\frac{E_c(x)}{kT} \right] \right\} \quad (1.28)$$

elde edilir ve $E_{Fm}=0$ olarak kullanılan referans sınır koşullarına sahip oluruz. Aşağıdaki durumları referans olarak ve difüzyon için imaj kuvvetini göz ardı edilerek $E_{Fm}=0$ sınır koşullarında yani tüketim bölgesi sınırlarında;

$$E_c(0) = q\Phi_B \quad (1.29)$$

İfadesi deplasyon bölgesi için uygulanırsa,

$$E_c(W_D) = q(\Phi_B + V) \quad (1.30)$$

$$n(0) = N_c \exp \left[-\frac{E_c(0) - E_{Fn}(0)}{kT} \right] = N_c \exp \left(-\frac{q\Phi_B}{kT} \right) \quad (1.31)$$

$$n(W_D) = N_D \exp \left(-\frac{q\Phi_n}{kT} \right) \quad (1.32)$$

olur. Bu koşulları kullanarak Denklem 1.28 yeniden düzenlenirse;

$$J_n = \frac{qN_c D_n \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right]}{\int_0^{W_D} \exp \left[\frac{E_c(x)}{kT} \right] dx} \quad (1.33)$$

elde edilir ve $E_{Fm}=0$ olarak kullanılan referans sınır koşullarına sahip oluruz. Aşağıdaki durumları referans olarak ve difüzyon için imaj kuvvetini göz ardı edilerek $E_{Fm}=0$ sınır koşullarında yani tüketim bölgesi sınırlarında;

$$E_c(x) = q\Phi_B - \frac{q^2 N_D}{\epsilon_s} \left(W_D x - \frac{x^2}{2} \right) \quad (1.34)$$

ile tanımlanır. Bu Denklem 1.32’de yerine konulursa ve bu denklemde W_D ifadesi $\psi_{bi}+V$ ile tanımlanırsa difüzyon teorisine göre akım yoğunluğu ifadesi,

$$J_n \approx \underbrace{\frac{q^2 D_n N_c}{kT} \sqrt{\frac{2qN_D(\psi_{bi} - V)}{\epsilon_s}} \exp \left(-\frac{q\Phi_B}{kT} \right) \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right]}_{J_D} \quad (1.35)$$

ile verilir (Sze 2007_b). Burada, J_D doyum akım yoğunluğu ifadesi, N_c izinli enerji durum yoğunluğu iletkenlik bandındaki birim hacim başına (cm^{-3}), N_D verici katkı atomlarının yoğunluğu, V difüzyon potansiyeli, ϵ_s yarıiletkenin dielektrik geçirgenliğidir.

Bethe'ye göre termiyonik emisyon teorisinde akım, sürüklenme veya emisyonundan ziyade metal içerisine elektronların emisyonu ile gerçekleşmektedir (Bethe 1942). Wagner, Schottky ve Spenke'in difüzyon teorisinde ise akım ise tüketim bölgesindeki difüzyon ve sürüklenmeler tarafından sınırlandırıldığını ifade eder (Wagner 1931; Schottky and Spenke 1939). Crowell ve Sze, TE ve difüzyon teorisini birleştirilmiş ve tek bir Termiyonik Emisyon-Difüzyon Teorisi (TED) ortaya koymuşlardır (Cowley and Sze 1965).

Hem difüzyon hem de TE'den elde edilen akım yoğunluğu ifadeleri Denklem 1.35 ve 1.24 birbirine çok benzemektedir. Ama difüzyon teorisi için akım yoğunluğu J_D uygulanan voltaja bağlıdır ve TE teorisinin doyma akım yoğunluğuyla karşılaştırıldığında sıcaklığa daha az bağımlıdır (Sze 2007_b).

1.7. Schottky Diyotlarda Akım-Gerilim özelliklerinin İncelenmesi

1.7.1. Norde Fonksiyonlarıyla İncelenmesi

Schottky engel diyotların seri direnç ve engel yüksekliği gibi parametrelerin belirlenmesi için 1979'de Norde bir fonksiyon önermiştir. Norde;

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (1.36)$$

$n = 1$ durumunda R_s için akım denklemi,

$$I = I_0 \left[\exp \left\{ \frac{q}{kT} (V_D - IR) \right\} - 1 \right] \quad (1.37)$$

Burada, $I_0 = AA^*T^2 e^{(-q\Phi_B/kT)}$ 'dir. Denklemde $V_D > kT/q$ kabul edilirse, Denklem 1.35 ve 1.36,

$$F(V) = \Phi_B + IR_S - \frac{1}{2}V \quad (1.38)$$

denkleminde dönüşür.

İdeal bir durum için $R_s = 0$ 'dır. $F(V)$ doğrunun eğimi $-1/2$ olan, düz bir doğru vermektedir. Düz doğrunun $F(V)$ eksenini kestiği nokta engel yüksekliğini Φ_b 'yi vermektedir. Seri direnç R_s olur ise,

$$F(V) = F_R(V) \frac{V}{2} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I(V)}{R_s A A^* T^2} \right) \quad (1.39)$$

Olur. Denklem 1.39'un eğimi büyük gerilim değerleri için eğim değeri $+1/2$ olan düz bir çizgiyi verir. $F(V)$ değeri küçük akım değerleri için ideal duruma yakın olurken, büyük akım değerleri için $F_R(V)$ 'ye yaklaşacaktır. Bu iki uç nokta arası $F(V)$ minimum degere sahiptir. Denklem 1.37 gerilime göre türevi alınır,

$$\frac{dF}{dV} = R_s \left(\frac{dI}{dV} \right) - \frac{1}{2} \quad (1.40)$$

olur. Burada akımın gerilime göre diferansiyeli;

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV_D} \left[1 + R_s \left(\frac{dI}{dV_D} \right) \right]^{-1}, \quad (1.41)$$

$$\frac{dI}{dV_D} = \frac{d}{dV_D} \left[I_0 e^{(qV/kT)} \right] = \frac{q}{kT} I$$

Şeklinde. Burada V_D diyot üzerine düşen gerilimdir. dI/dV_D gerilime göre türevi alınır,

$$\frac{dF}{dV} = \frac{\frac{qR_s I}{kT}}{1 + \frac{qR_s I}{kT}} - \frac{1}{2} \quad (1.42)$$

ifadesi elde edilir. $dF/dI=0$ yazılırsa F 'nin minimum olduğu noktadaki I_0 ,

$$I_0 = I_{F(V)_{min}} = \frac{kT}{qR_s} \quad (1.43)$$

Şeklinde bulunur.

$V_{F(V)min}$ değeri;

$$V_{F(V)min} = I_0 R + V_D(I_0) = \frac{kT}{q} + \ln \frac{I_{F(V)min}}{AA^*T^2} \quad (1.44)$$

Şeklinde ifade edilir ve $F(V)$ 'nin minimum değeri şu şekilde verilir;

$$F(V) = F_R(V) \frac{V}{2} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I(V)}{R_S AA^* T^2} \right) \quad (1.45)$$

Eşitliği ile elde edilir. $I_{F(V)min}$, $V_{F(V)min}$, $F(V)min$ ölçülen değerleri ve Denklem 1.43 ve 1.44 kullanılarak seri direnç;

$$R_S = \frac{kT}{qI_0} \quad (1.46)$$

ve engel yüksekliği;

$$\Phi_B = F(V)_{min} + \frac{V_{F(V)min}}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (1.47)$$

Parametreleri bulunur (Norde 1979 ; Yakuphanoglu, 2007).

1.7.2. Cheung ve Cheung Fonksiyonlarıyla İncelenmesi

Schottky diyotlarda I-V karakteristikleri için Cheung ve Cheung 1986'da bir model geliştirerek idealite faktörü n , engel yüksekliği Φ_B ve seri direnç R_S gibi diyot parametrelerinin bulunabileceği bir model geliştirdiler.

$$V = IR_S + n\Phi_{B0} + \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (1.48)$$

eşitliğinde $d \ln I$ 'e göre türev alındığı zaman,

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_S \quad (1.49)$$

eşitliği elde edilir. Burada, $dV/d(\ln I) - I$ grafiğinin y eksenini kestiği ($I_0 = 0$) noktadan idealite faktörü 'n' ve $dV/d(\ln I) - I$ grafiğinin eğiminden seri direnç değeri ' R_s ' bulunabilir. Φ_{B0} değerini bulmak için $H(I)$ fonksiyonu tanımlanırsa;

$$H(I) = V + \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (1.50)$$

$$H(I) = IR_s + n\Phi_{B0} \quad (1.51)$$

denklemleri elde edilir. $H(I)$ 'nın akıma I karşı grafiği bize doğrusal bir grafik verir. $H(I)-I$ grafiğinin eğimi seri direnç R_s 'yi, $I=0$ 'da kestiği nokta $n\Phi_{B0}$ ifadesini verir. $dV/d(\ln I) - I$ ve $H(I)-I$ grafiklerinin eğimleri bize üç önemli diyot parametresini (n , Φ_{B0} , R_s) belirlememize yardımcı olur (Cheung 1986).

1.8. Kapasitans-Gerilim Özelliklerinin İncelenmesi

Schottky doğrultucu kontaklarda yük taşıyıcıların (elektron-hol) yarıiletken kontak sınır bölgesinde n-tipi yarıiletken için elektronlardan veya p-tipi yarıiletken için hollerden arınma ve yüksek dirence sahip bir tükenim tabakası meydana gelir. Meydana gelen bu tükenim bölgesinin genişliği (W_D) diyota uygulanacak bir dış gerilim ile değişim gösterebilir. Tükenim bölgesinin genişliği aynı zamanda bir direnç etkisi oluşturmaktadır, bu direnç yarıiletkenin gövde bölgesinin direncinden daha büyük bir etkiye sahiptir. Bu etki MS ara bölgede bir kapasitif etki olarak gözlemlenebilir. Schottky diyotun bu yapısı kondansatörün yapısına benzemektedir. Poisson denklemini ara bölge sınır şartları eşliğinde çözülmesiyle engel yüksekliği ve kapasite hesaplanabilmektedir. Akımın bir doğrultuda geçtiğini varsayarsak potansiyel dağılımı;

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = -\frac{q}{\epsilon_s} [N_D + p(x) - n(x)] \quad (1.52)$$

Eşitliği ile ifade edilmektedir.

Burada N_D donör konsantrasyonudur. Yarıiletkenin herhangi bir x noktasındaki $n(x)$ elektron ve $p(x)$ hol konsantrasyonları olup, uzay yükü bölgesi kenarında yarıiletkenin nötür gövde bölgesinde potansiyel sıfır kabul edilirse,

$n(x)$ ve $p(x)$;

$$n(x) = n_0 \exp[q\Phi(x)/kT] \quad (1.53)$$

$$p(x) = p_0 \exp[-q\Phi(x)/kT] \quad (1.54)$$

Denklemleri ile verilmektedir. Burada p_0 yarıiletkenin nötral bölgesinde olan hol konsantrasyonu ve n_0 elektron konsantrasyonunun temsil etmektedir.

Poisson denkleminin sınır potansiyel dağılımı;

$$\frac{\partial^2 \Phi(x)}{\partial x^2} = -\frac{q}{\epsilon_s} N_D \quad \text{ise} \quad 0 < x < W \quad (1.55)$$

$$0 \quad \text{ise} \quad x > W$$

Şeklindedir. Burada $x=W$ ve $\frac{d\Phi}{dx} = 0$ 'da başka bir sınır şartını temsil eder, bu şartlarda tükenim bölgesindeki elektrik alan;

$$E(x) = -\frac{d\Phi(x)}{dx} = E_m \left(1 - \frac{x}{W}\right) \quad (1.56)$$

şeklinde ifade edilir. Burada $E_m = -\frac{qN_D}{\epsilon_s} W$ olup, $x=0$ 'daki maximum elektrik alanıdır. Tükenim tabakasının genişliği ise;

$$V_D = (V_i - V) = -\frac{qN_D}{2\epsilon_s} W^2 \quad (1.57)$$

denkleminde,

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D} |V_i - V|} \quad (1.58)$$

şeklinde elde edilir. Burada tükenim tabakası yaklaşımında, elektron ve hol konsantrasyonları donör konsantrasyonları ile karşılaştırılarak ihmal edilmiştir.

Diyot kapasitansı, uygulanan ters gerilimin bir fonksiyonu olarak ölçülebilir. Ters gerilim altındaki diyota alternatif akım ‘a.c.’ sinyali uygulandığında tükenim bölgesi kapasitansı;

$$C = A \left[\frac{\epsilon_s q N_D}{2(V_i + V_R - kT/q)} \right] \quad (1.59)$$

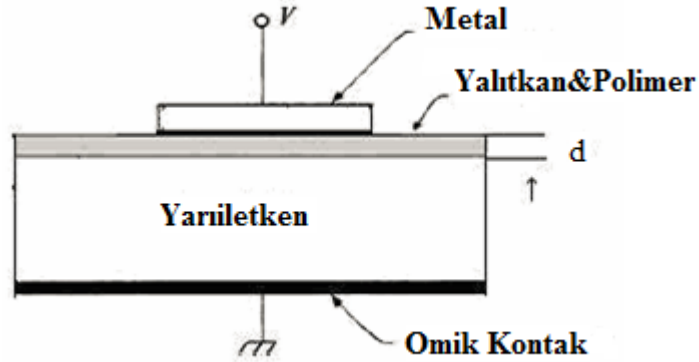
şeklinde elde edilir. Bu eşitliğe göre $1/C^2$ ’nin V_R ‘e göre grafiğin eğrisi doğrusaldır ve eğim $2/A^2 \epsilon_s q N_D$, kesme voltajı ise $V_0 = (V_i - kT/q)$ olur. Bu eğimden katkı konsantrasyonu elde edilebilmektedir.

1.9. Arayüzey Tabakalı Metal-Yarıiletken Kontaklar

Bir MS kontak yapılarında, Schottky ve Mott’a göre metal ile yarıiletken arasında hiçbir engel olmadan temasta olduğu ideal durum, yani engel yüksekliği metalin iş fonksiyonuna çok sıkı bir şekilde bağlı kabul edilir. Bardeen’e göre metal ile yarıiletken arasında ince bir yalıtkan tabakanın olduğu gerçel durum gerçekleşmektedir (Barden 1947). Arayüzey halleri, tahmin edilen ve gözlenen Schottky engel yüksekliklerinin arasındaki farktan dolayı hesaba katılır. Yapılan çalışmalar ve deneyler metal ile yarıiletken arasına yalıtkan/oksit, polimer veya ferro-elektrik gibi bir materyal yerleştirildiğinde, MS yapı sırasıyla MIS veya MOS, MPS ve MFS tipi kontak veya diğer adıyla Schottky engel diyotta dönüşür (Alialy et al. 2014; Marıl vd. 2015).

Yalıtkan veya polimer arayüzey tabakalarının varlığı metal ile yarıiletkeni birbirlerinden izole eder ve metal ile yarıiletken arasındaki yük geçişlerinin kontrolünü sağlar. Seçilen arayüzey tabaka aygıt kararlılığını, performansı ve güvenilirliği açısından oldukça önem taşımaktadır (Aydoğan vd. 2005; Yakuphanoglu vd. 2007). Akım iletim mekanizmalarının kontrol edilebilir hale getirilmesindeki amaç, sızıntı akımını azaltmak ve yüksek elektriksel iletkenlik elde edilmesi amacı ile genellikle organik arayüzey tabaka tercih edilmektedir. MS Schottky diyotlar, hem arayüzey tabakaya hem de bir seri dirence sahip ise diyot üzerine uygulanan geçit voltajı (V_G), kontak yapısında bulunan arayüzey tabaka ve yapının seri direnci ile diyot tarafından ($V_G = V_D + V_{R_s} + V_i$) bölüşülür. Bu nedenle MIS/MPS yapılarda akım-iletimi MS yapılardan farklı olacaktır. Bir MIS/MPS yapının şematik diyagramı Şekil 1.9’da gösterilmiştir. Burada (d) ara tabaka kalınlığı, (V) metal plaka

alanına uygulanan gerilimdir. MS arayüzeyindeki doymamış bağlardan veya safsızlıklardan kaynaklanan durumlar, yalıtkan tabaka büyütme sırasında yonteme bağı olarak ortaya çıkan hareketli iyonlar, tuzaklar ve arayüzey yüklerinin bulunması MIS/MPS yapısının özelliklerini değıştirerek yapının ideal özelliklerinden sapmasına neden olmaktadır.



Şekil 1.9. Bir MIS/MPS yapının şematik gösterimi

1.10. İdeal Bir Metal-Arayüzey Tabakalı-Yarıiletken Kontaklar

Bir ideal MPS Schottky diyot aşağıdaki gibi tanımlanır.

1) Sıfır beslem voltajında, Φ_m ile Φ_s arasındaki fark; Φ_{ms} sıfırdır.

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \left(\chi_i + \frac{E_g}{2e} - \Phi_B \right) \quad \text{n-tipi} \quad (1.60)$$

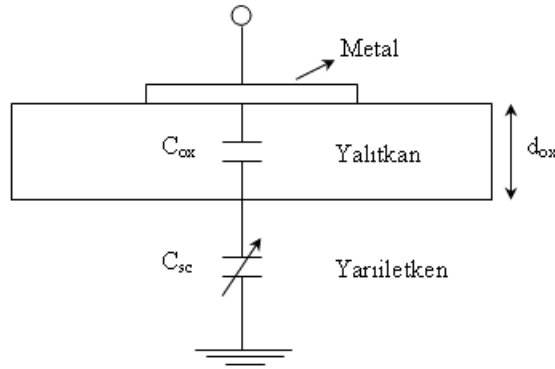
$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \left(\chi_i + \frac{E_g}{2e} + \Phi_B \right) \quad \text{p-tipi}$$

Burada χ_i yarıiletken elektron yakınlığı, E_g yasak enerji aralığı, Φ_b ise engel yüksekliğidir.

2) Doğru akım (d.c.) besleme altında yalıtkan içinden hiçbir akım geçmez veya yalıtkanın direnci sonsuzdur.

3) Herhangi bir besleme altında yarıiletken ve yalıtkana yakın metal yüzeyinde yükler mevcut olabilir fakat eşit ve zıt işaretlidirler.

MPS kontaklar paralel plakalı kondansatöre benzetilebilir. Çünkü metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan/polimer tabakanın varlığından dolayı metal ve yarıiletken arasında bir kapasitif bölge/kapasitans 'C' oluşur. Bu kapasitans MPS kapasitansı olarak adlandırılır. Bir MPS kapasitansına karşılık gelen eşdeğer elektronik devresi Şekil 1.10'da gösterilmiştir. MPS yapının toplam kapasitansı, yalıtkan tabakanın kapasitansı C_i ve uzay yükü kapasitansı C_{cs} 'den oluşur. C_{cs} ve C_i kapasitanslarının seri bağlanmasının eşdeğeridir (Nicollian 1982).



Şekil 1.10. MIS/MPS Kapasitansının eşdeğer devresi

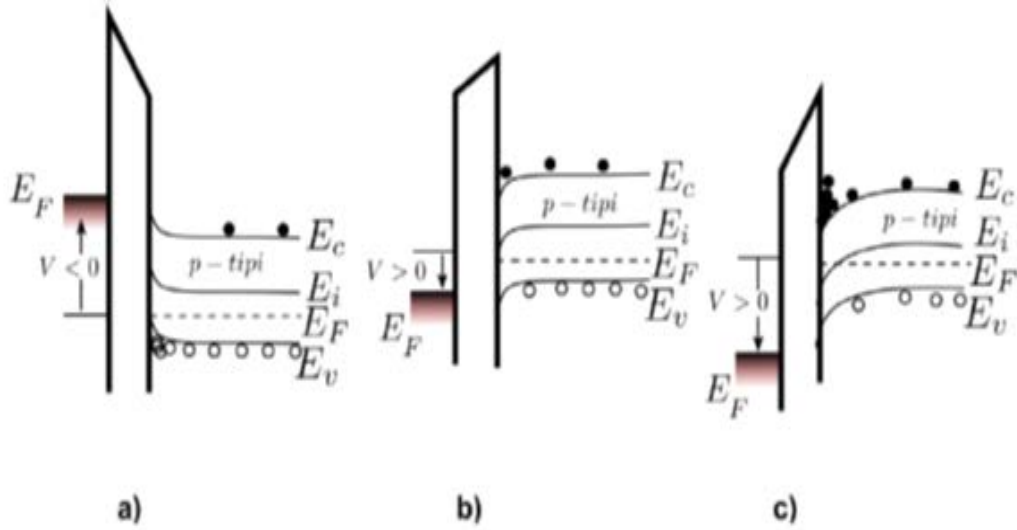
Buna göre Şekil 1.10'da eşdeğer devrenin toplam kapasitansı aşağıdaki denklemta görüleceği üzere;

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{1}{C_{ox}} \quad (1.61)$$

Bu denklemde görüleceği üzere MPS yapının eşdeğer kapasitansı, C_{cs} ve C_{ox} kapasitanslarının seri bağlanmasına eşdeğerdir. C_{ox} yalıtkan tabakanın kapasitansı ise;

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{d_{ox}} A_{ox} \quad (1.62)$$

Olarak verilir. Burada A_{ox} doğrultucu kontağın alanı, ϵ_{ox} yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti, d_{ox} yalıtkan tabakanın kalınlığıdır (Sharma 1984; Neamen 1997).

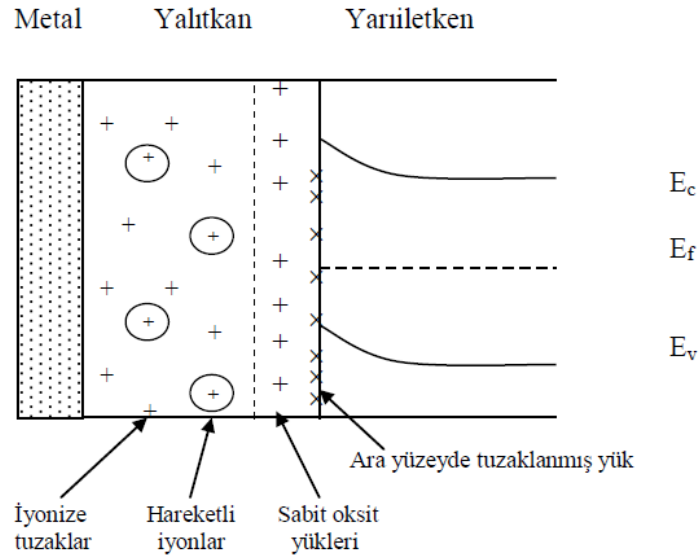


Şekil 1.11. $V \neq 0$ durumunda ideal MPS Schottky diyotun enerji-bant diyagramı a) Yığılma (b) Tüketim (c) Terslenim, durumları

İdeal bir MPS Schottky diyota bir V gerilimi uygulandığında, yarıiletken kontak yüzeyinde temel olarak üç durum mevcut olabilir. P-tipi yarıiletkenle oluşturulan MPS Schottky diyotta, metal kısma negatif bir voltaj ($V < 0$) uygulandığında valans bandının tepesi aşağı doğru bükülür Şekil 1.11.a (Sze and Kwok 2007_a). Yarıiletkendeki Fermi seviyesi sabit kalır. Taşıyıcı yoğunluğu üstel olarak enerji farkı ($E_F - E_v$)'ye bağlı kaldığından, bu bant bükülmesi yarıiletken yakınında çoğunluk taşıyıcı olan hollerin yığılmasına sebep olur. Bu duruma yığılma (accumulation) denir. Aynı diyota küçük bir pozitif voltaj $V > 0$ uygulanırsa Şekil 1.11.b'de görüleceği gibi bantlar yukarı doğru bükülür ve çoğunluk taşıyıcılar tüketilir. Bu duruma tüketim (depletion) denir. Eğer MPS Schottky diyota daha büyük bir pozitif voltaj uygulanırsa, bantlar daha çok yukarı doğru bükülür ve E_i , E_F 'nin üstüne çıkar. Bu durumda yüzeydeki elektronların (azınlık taşıyıcıları) sayısı hollerden fazladır (Şekil 1.11.c). Buna ise terslenim (inversion) denir. Benzer sonuçlar n-tipi yarıiletken içinde elde edilebilir (Sze and Kwok 2007_b).

1.11. Arayüzeyli Yapılarda İdeal Durumdan Sapmalar

İdeal bir yalıtkanın kendi içerisinde ve yarıiletken ile birleşim yüzeyi arasında hiçbir boşluk yükü veya hareketli yük yoktur. Gerçek yapılarda ise yalıtkan ve yarıiletken arayüzeyi hiçbir zaman elektriksel olarak nötr değildir. Diyot arayüzeyinde doymamış bağlardan veya safsızlıklardan kaynaklanan ve arayüzey durumları olarak adlandırılan, arayüzey tuzaklanmış yükler ve oksidasyon sırasında yonteme bağı olarak hareketli iyonize tuzaklar, sabit oksit ve arayüzey yükleri oluşmaktadır. Arayüzeyde oluşan bu yükler yapıların özelliklerini değiştirerek ideallikten sapmalarına neden olabilmektedir (Ghandhi 1983).



Şekil 1.12. İdeal olmayan bir diyotta arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması

Şekil 1.12 (Sze 1981_a), ideal durumdan sapmaların sebebi olarak, MS arayüzeyinde yasak bant aralığı içinde enerji seviyeleri gibi tanımlanan arayüzey durumları, yarıiletkenin yüzeyinde veya yüzeyine yakın yerleşmiş olan uygulanan elektrik alan altında hareketsiz olan sabit yüzey yükleri, ara tabaka (yalıtkan-polimer) içerisindeki hareketli iyonlar ve numunenin x-ışını radyasyonuna maruz kalmasıyla oluşabilecek iyonize tuzaklardır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Şüphesiz teknoloji insanlığın kendini geliştirmesi için hem araç hem de amaç olarak görev yapmaktadır. Fen bilimleri alanında fizik tabanlı elektrik-elektronik teknolojisi bu gelişimde öncü rolünü neredeyse hiç kaybetmeden sürdürmektedir. Teknoloji alanında kullanılan malzemelerin karakterizasyonları, gelişim ihtiyaçlarını karşılamak için araştırmaya ve yeni bulgulara her zaman açık olmuşlardır. Dünya tarihi incelendiğinde devir açıp devir kapatılan dönemlerin temel yapı taşlarını teknoloji oluşturmuştur. Yarıiletken teknolojisi de gelişmeye ve yeni bulgulara açık olan bir teknoloji olarak tarih boyunca kendini öne sürmüştür. Günümüzde metal-yarıiletken teknolojisi gelişime ve yeni sonuçlara açık bir yapıya sahip olduğu için ilerlemesini sürdürmektedir (Schottky, 1938). Bethe 1942 yıllarında TE denklemini metal yarıiletken doğrultucu kontaklara uygulanabileceğini göstermesiyle, ara yüzeyinin elektronik yapısı ile ilgili çalışma yapmıştır (Barden 1947). n-tipi yarı iletkenin üzerine nikelin buharlaştırılmasıyla elde edilen Schottky diyotların I-V, kapasite-gerilim (C-V) karakteristiklerini belirlemiştir (Singh 1985).

Polimer schottky diyotlarda Alq_3/Al ve $Alq_3/LiF/Al$ diyotların arayüzey hallerini ultraviyole fotoelektron spektroskopisi yardımıyla alınan ölçümlerde LiF tabakasının etkisiyle Alq_3 tabakasının işgal edilmiş en yüksek orbital seviyesinde (HOMO) ve diyot vakum seviyesinde değişimler olduğunu tesbiti yapılmış olup, Alq_3/Al arayüzeyinde bariyer yüksekliğinin azalmasına sebep olarak ince LiF tabakanın etkisi tesbit etmişlerdir (Mori et al. 1998).

Kontak arayüzeyi ile ilgili çalışmalarda, polimer olarak polyaniline kullanarak diyotun fiziksel özelliklerinin zamanla değiştiğini tesbit etmiş olup, 120 gün sonra alınan ölçüm değerlerinde idealite değerinin 2,09'dan 1,85 değerine düştüğünü, engel yüksekliği değerinin 0,79 eV'dan 0,81 eV'a yükseldiğini gözlemlemişlerdir (Sağlam vd. 2004).

Organik bileşiği yarıiletken üzerine elektrokimyasal yöntemlerle uygulayan, polypyrrole/p-InP yapısını incelendiğinde, meydana gelen yapının elektriksel karakterizasyonunu inceliyerek, engel yüksekliğini 1,68 ve idealite faktörünü 0,59 olarak bulmuşlardır (Aydoğan vd. 2005).

Schottky kontakta arayüzeyi yalıtkan seçerek kapasite ölçümlerinde ara yüzey durumlarının artan frekans değerlerinde cevap vermediği için yüksek frekanslarda sığanın düştüğü gözlemlenmiş olup, I-V ölçümlerinden engel yüksekliği 0,786 eV ve idealite faktörü 1,76 olarak bulmuşlardır. Beslemeye dayalı etkin engel yüksekliğini dikkate alarak, arayüzey dağılım fonksiyonunu türetmişlerdir. I-V'den elde edilen engel yüksekliği değerinin, C-V'den elde edilen engel yüksekliği değerine göre daha düşük olduğunu belirtilmiştir. Bu iki engel yükseklikleri arasındaki farklılığı ölçüm tekniklerinin yapısından kaynaklı olarak belirtmişlerdir (Tataroğlu ve Altındal, 2006).

Rutheniyum üzerine yapılan sentezleme çalışmalarında, farklı sentez türlerinin HOMO-LUMO boşlukları incelemiş, yapılan çalışmalarda elde edilen polimer/organik Ru(II) kompleksini geniş bir voltaj aralığında I-V değerlerini analiz edilmiştir (Huang et al. 2009). Alüminyum (III) tris (8-hidroksikinolin) ince filmlerini n-tipi Si üzerine büyütürken değişen değerlerde tavlama işlemine maruz bırakan, tavlama numunelerinin tavlama süreleri ve derecesine göre değişimin sonuçlarını yüzey morfolojisini AFM de inceleyerek sergilenmişlerdir (Zawadzka et al. 2013).

Rutheniyum'u In-p üzerine kaplanması sonucu değişen sıcaklık değerlerinde I-V grafiğini termiyonik emisyon teorisi ile inceleyen, yaptıkları araştırmalarda sıcaklık arttıkça bariyer yüksekliğinin azaldığını, bunu takiben tam tersi olarak idealite faktöründe bir artış olduğunu bulunmuşlardır (Reddy et al. 2015).

Kompleks Rutheniyum (II) filmini p-tipi-Si parlak yüzeyine spin kaplama yöntemiyle kaplayarak, polimer tabakalı schottky diyotun fotovoltaiik özelliklerini araştırmaları sonucu bant aralığını 4,42 eV olarak tesbit edilmiş olup, optiksel ve fotovoltaiik araştırmalar sonucu arayüzey polimer malzemesi olan Ru(II) kompleksinin fotovoltaiik aygıtlar için kullanılabileceğini tesbitinde bulunulmuştur (Soylu vd. 2015).

ZnO ince filmini farklı ara yüzey kaplama ve biriktirme yöntemlerini kullanarak p-tipi-Si üzerine filimleri büyütürerek, sabit ve değişmeyen diyot analiz I-V , C-V koşullarda yaptığı gözlem ve ölçümlerde, arayüzey film kaplama yöntemlerinden kaynaklı diyot parametrelerindeki değişimleri belirtilmiştir (Orak 2016).

Tris (2,2'-bipyridine) Ruthenium(II)-complex malzemesini p-tipi Si üzerine döndürerek kaplama yöntemini kullanarak schottky diyotunu elde ettiler. Işık altında yapılan araştırmalarda I-V grafiklerinden cihazın idealitesini 3,22 bariyer yüksekliğini 0,46 eV olarak tesbit etmişlerdir (Doğan vd. 2017).

Polimer olarak schottky kontak arayüzeyinde Alq₃ kullanarak, en yüksek ve en düşük molekül orbital enerji bant diyagramları üzerine incemelerde bulunan HOMO-LUMO engel yüksekliğini 3,27 eV olarak bulmuş olup, temel diyot parametrelerinde I-V grafiğinden faydalanan bariyer yüksekliği değerini 0,82 eV olarak bulmuşlardır (Sevgili vd. 2020).

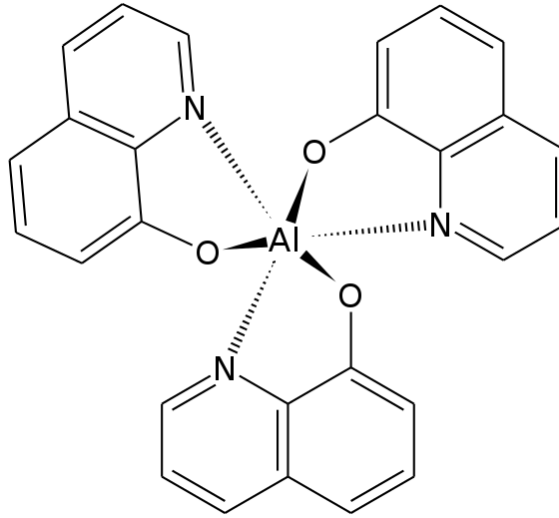
Yapılan literatür araştırmaları organik arayüzeyli malzemelerin elektronik endüstrisinde aktif rol aldığını, diyot ilamalat yöntem ve şekillerine göre farklı sonuçlara ulaşılabileceğini göstermiştir. Organik malzemelerin yüksek elektrolüminans (EL) durumlarından dolayı elektronik cihazlarda, OLED yapılarında yaygın bir şekilde kullanılmakta olduğu görülmüştür (Dediu et al. 2008).

Bu çalışmada, arayüzeysiz ve organik arayüzey tabakalı Schottky diyotun imalatını ve akım iletim mekanizmalarını birden fazla yöntem kullanarak incelemeyi amaçlanmıştır. Organik tabaka olarak seçtiğimiz, Tris-(8-hydroxyquinoline) Alüminyum molekülü (Alq₃) ile Tris-(2,2'-bipyridine) Ruthenium (II) Hexafluorophosphate molekülü (Ru(II)) yapılarını çözücü ve seyreltici olarak seçilen triklorometan (CHCl₃) kloroform ve etanol (C₂H₅OH) kullanarak solisyon haline getirdik. Yaptığımız çalışmalarda organik film tabakasını spin kaplama yöntemiyle oluşturarak arayüzeyde oluşan katmanın yüzey morfolojisini inceledik. Arayüzeye kaplanan filmin farklı molekül oranlarının akım iletiminde ne gibi etkiler yarattığını değişen ışık, sıcaklık ve frekans değerlerinde inceledik.

3. METERYAL VE YÖNTEM

3.1. Tri-(8-hydroxyquinoline) Alüminyum Molekülü

Tris-(8-hydroxyquinoline)-Alüminyum, diğer bir deyişle Alq_3 molekülü, elektron taşıma ve emisyon tabakası özelliği göstermesinden dolayı organik elektronik yapılarda sıklıkla tercih edilmektedir. Bu moleküler yapılar yüksek oranlarda elektron (e) ve düşük oranlarda hol (h) taşıma özelliğine sahiptirler (Sevgili vd. 2020). Şekil 3.1’de Alq_3 organik arayüzey malzemesinin moleküler yapısı gösterilmektedir. Bu şekil incelendiğinde, moleküler yapının Al, H, C, O, N elementlerinden oluştuğu görülmektedir.

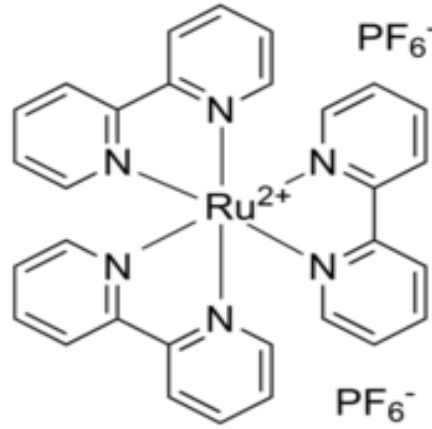


Şekil 3.1. Kompleks olarak sentezlenmiş Tris-(8-hydroxyquinoline)-Alüminyum / Alq_3 ’ün moleküler yapısı

Alq_3 için yapılan çalışmalarda bazı kristal fazlar tanımlanmıştır (Braun vd. 2001). Alq_3 oda sıcaklığına bağlı olmak üzere α , β , δ ve γ olmak üzere dört farklı fazda bulunabilmektedir (Colle vd. 2003). Bu yapıdaki yüksek elektrolüminans etkinliğinden dolayı ışık yayan yassı yapılar olarak bilinen, organik ışık yayıcı cihazlarda (OLED), meteryal olarak kullanılmaktadır (Ulukan, 2017).

3.2. Tris-(2,2'-bipyridine) Ruthenium(II) Hexafluorophosphate Molekülü

Ru (II) komplekslerinin elektronik, optik ve kimyasal özellikleri onları vazgeçilmez bileşenler haline getirmekte olup, son yıllarda yapılan çalışmalarda Ruthenium (II) kompleks boyar moleküllerin güçlü optik soğurma ve emisyon sergilediği yapılan araştırmalarda gözlemlenmiştir (Yam 2001; Soylu 2015; Tataroğlu 2018).



Şekil 3.2. Tris-(2,2'-bipyridine) Ruthenium(II) Hexafluorophosphate / Ru(II) organik arayüzey malzemesinin moleküler yapısı

Komplekslerin üstün elektriksel ve optik özellikleri onları elektronik uygulamalarda çok değerli kılmıştır. Şekil 3.2’de moleküler bağ yapısı verilen Rutenyum (II) komplekslerinin optik ışığa ve akım iletiminde duyarlılığı, elektronik alanında cazip bir yer kılmıştır.

3.3. Kontak Arayüzeyinde Kullanılacak Çözeltilerin Hazırlanması

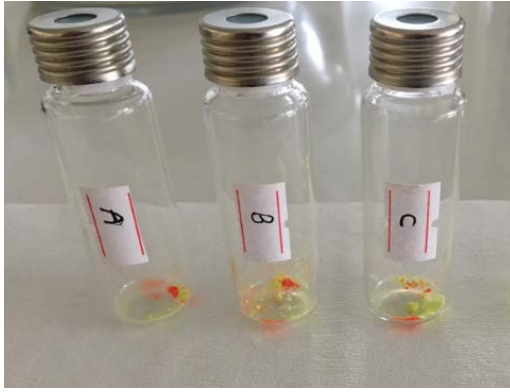
Alq₃ ve Ru(II) kompleks bileşikleri sigma aldrich firmasından temin edilerek Alq₃ ve Ru (II) molekülleri bir karışım olarak arayüzeyde kullanımı amaçlanmış olup, kompleks Ru (II) molekülü sabit tutularak değişen oranlarda Alq₃ molekülü eklenildi. Şekil 3.3.a’da görüleceği üzere, üç adet arayüzey numunesi hazırlandı. Bunlar oransal olarak;

A- 1/2 ; 10 mg Ru(II)+20 mg Alq₃

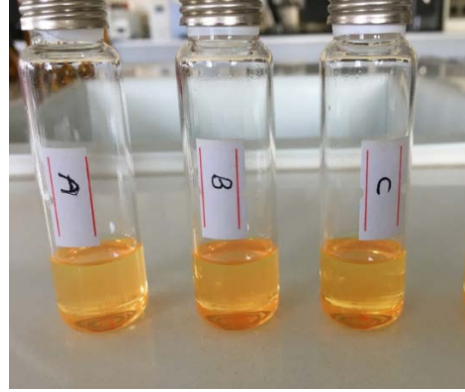
B- 1/5 ; 10 mg Ru(II)+50 mg Alq₃

C- 1/7 ; 10 mg Ru(II)+70 mg Alq₃

olarak hazırlandı.



(a)



(b)

Şekil 3.3. a) Değişen oranlarda Kompleks Ru(II) + Alq₃ boyar maddeleri b) İdeal UV değerlerine göre çözücü ve seyreltinin eklenmiş solisyon görünümü

Hazırlanan tüplere çözücü ve seyreltici olarak kloroform ve ethanol eklenerek, A-solisyonu, B-solisyonu, C-solisyonu olarak isimlendirilmiştir. Solisyonlar ultraviyole görünür ışık Şekil 3.4 (UV-Vis) absorpsiyon spektroskopisi cihazında analiz edildi.



Şekil 3.4. UV-3600 UV-VIS-NIR Spektrofotometre cihazı

UV spektroskopi cihazında analiz edilen solisyonlara, moleküllerin ideal optik geçirgenlik dalga boyu absorpsiyon durumları gözetilerek Şekil 3.3.b'de kademeli olarak çözücü ve seyreltici eklendi. Hazırlanan solisyonlar oda sıcaklığında karanlık bir ortamda arayüzeyde kullanılmak üzere muhafaza edildi.

3.4. P-Tipi-Si Kristalinin Temizlenmesi

MS ve MPS Schottky diyotları hazırlarken birçok yüzey kusurunu ortadan kaldırmak için yarıiletken kristalin mekanik ve kimyasal olarak çok iyi temizlenmesi gerekmektedir. Temizleme esnasında kullanılacak beher, cımbız vb. araç gereçler Şekil 3.5 ultrosonik banyoda asetonla iyice yıkanıp deiyonize su ile durulandıktan sonra etüv fırınında yaklaşık $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 5 dk. ısıtılarak sterilize edildi. Kristalimiz P-tipi Si, 100 yönelimli, $525 \pm 25\text{ }\mu\text{m}$ kalınlıklı, 1-10 $\Omega\text{ cm}$ öz dirençli, P/Boron katkılı Si kristali, $1.0 \times 1.0\text{ cm}^2$ ölçülerek biri referans (arayüzeysiz) olmak üzere dört eşit parçaya ayrıldı.

Silisyum kristali temizleme prosedürleri:

1. Aseton ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) içerisinde ultrasonik olarak 10 dakika yıkandı
2. İzoproponal ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$) içerisinde ultrasonik olarak 10 dakika yıkandı
3. De-iyonize suda ultrasonik olarak 5 dakika yıkandı.
4. Seyreltilmiş HF ($\text{H}_2\text{O}:\text{HF}:10:1$) ile 10 saniye yıkandı.
5. Akan de-iyonize su ile iyice yıkandı.
6. Azot gazı(N_2) ile kurutuldu.



Şekil 3.5. Ultrasonik Temizleyici, Elmasonic S60 H

Omik ve doğrultucu kontak için kullanılacak olan yüksek saflığa sahip Mateck marka alüminyum, buharlaştırma öncesi metanol'de 5 dk ultrasonik olarak yıkandı. Temizleme prosedürünün bitiminde numuneler mat yüzeyine omik kontak yapılmak üzere vakum altına alındı. Arayüzeyde kaplanacak olan solisyonun Taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazında ve Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) cihazında film yapısının analizinde kullanılmak üzere üç adet $2.0 \times 2.0\text{ cm}^2$ boyutlarında lamel üzerine de aynı temizleme prosedürü uygulandı.

3.5. Omik Kontağın Oluşturulması

Kimyasal temizleme prosedürü tamamlanan yarıiletkenlere omik kontak oluşturmak için mat yüzeyleri metal kaplamak üzere, ultrasonik cihazında asetonda 10 dk, de-iyonize suda 5 dk temizlenerek strelize olan alttaş üzerine yerleştirildi. Kontak yapımı için temizlenen yüksek saflıktaki metal (Al) termal buharlaştırma potasına yerleştirilerek cihaz Şekil 3.6'da vakum altına alındı.



Şekil 3.6. İnce Film Kaplama Sistemi, NANOVAK NVTS-400

Vakum altına alına cihazın basıncı 5.10^{-6} bar'da termal buharlaştırma işlemi başlatılarak, metal alüminyumun bulunduğu potaya kademeli artış şeklinde doğru akım (DC) uygulanarak 27 volt (V) değerlerinde termal buharlaştırma gerçekleştirilmiş olup omik kontak yapılmıştır.

3.6. Spin Coating Yöntemi ile p-Si Üzerine Arayüzey Malzeme Büyütülmesi

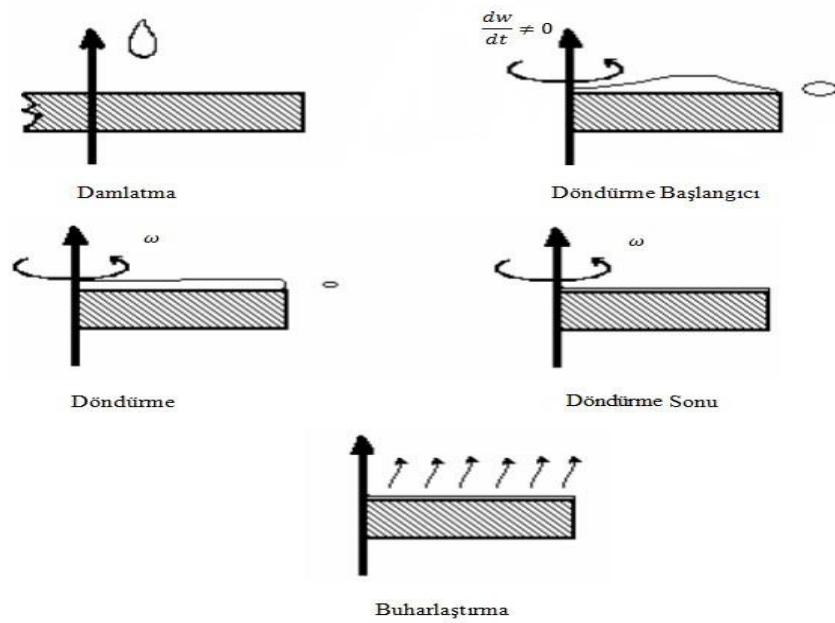
Arayüzey ince filim üretimi için en etkin ve ekonomik olarak en uygun yöntemlerden biri spin coating yöntemidir. Bu yöntem temel fizik, organik ve polimer kimya, akışkanlar dinamiği disiplinlerini barındıran multi disiplinler bir yöntem olarak bilinmektedir. Bu yöntem akışkan çözeltinin küçük bir miktarının kaplanacak yüzey üzerine bırakılmasını ve yüzeyin yüksek hızda (rpm dakikadaki dönme sayısı olmak üzere 500-4000 rpm aralığında) döndürülmesini gerektirir. Filmin son kalınlığı ve diğer özellikleri, dönme işlemi için

seçilen parametreler ve çözeltinin doğasına (viskozite, katıların yüzdesi, yüzey gerilimi vb.) bağlıdır. Spin kaplamadaki en önemli faktörlerden biri de tekrarlanabilirliktir. Parametrelerdeki ince değişiklikler spin yöntemiyle kaplanmış filmlerde şiddetli değişimlere sebep olabilir (Bornside et al. 1987).



Şekil 3.7. Döndürmeli Kaplayıcı - VTC-100 Vacuum Spin Coater

Spin coating yöntemi için gerekli deney düzeneği Şekil 3.8’de görüldüğü gibi temel olarak önemli beş ana parçadan oluşmaktadır;



Şekil 3.8. Spin Coating (Döndürme) yöntemi ile film kaplama şematik gösterimi

Numune yüzeyine kaplanacak filmin kalınlığının düz ve olduğunca homojen olmasını sağlayan iki kuvvet vardır, bunlar merkezci kuvvet ve buna ters yönde sürtünme kuvvetidir. Damlatma aşamasında çözelti, duran veya yavaşça dönen taşıyıcı üzerine damlatılır. Daha sonra taşıyıcı yüksek bir devirle (500-1500 devir/dakika) döndürme başlangıcı gerçekleştirilmiş olur. Solisyon fazlası numune üzerinde merkezci kuvveti yenerek dışarı doğru ilerler ve damlalar halinde terk eder. Döndürme ve döndürme sonuna gelindiğinde solisyon halindeki organik malzemeler taşıyıcı üzerinde olabildiğince homojen olarak dağılır. Son buharlaştırma aşamasında yüzeye kaplanan solisyon çözeltisi içerisindeki çözücü ve seyrelticiler buharlaşarak yüzeyi tamamen terk eder. Bu çalışmada omik kontakları yapılmış üç adet numunemize ve üç adet lamele Spin Coating cihazında 1000 rpm 30 sn uygulanarak ara yüzey filminin kaplama işlemini gerçekleştirilmiştir.

3.7. Kristal Analiz Yöntemleri

3.7.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

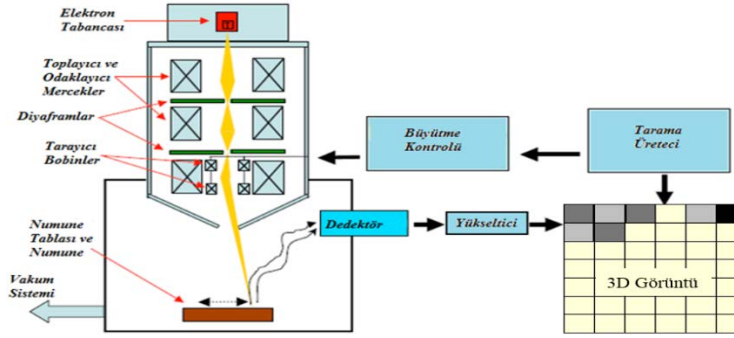
Arayüzeyde kullanılan polimer yapı Coating yöntemiyle lamel üzerine kaplanan ince film tabakanın yüzey morfolojisi, Scanning Electron Microscope (SEM) cihazı eşliğinde incelendi.



Şekil 3.9. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) JEOL JSM 6510

SEM, elektronik ve optik sistemlerin birlikte kullanımı ile yüksek büyütme oranlarında yüzey morfolojisi analizleri yapılabilen görüntülerin elde edildiği cihazdır. Herhangi bir malzeme yüzeyini

µm mertebesinde incelenmesini sağlayan yüksek teknolojiye sahip bu cihaz çalışma prensibi olarak, numune yüzeyinin yüksek voltajda hızlandırılmış elektronlar ile taraması prensibiyle çalışmaktadır.



Şekil 3.10. SEM çalışma şeması

3.7.2. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

Arayüzeye kaplanan polimer film yapının, Atomic Force Microscope (AFM) cihazında yüzey morfolojisi incelendi. Yapıları nano ölçekte incelemek için çok yönlü ve güçlü bir mikroskop olarak bilinen AFM, yapısı itibariyle atomik boyutta sivriltilmiş bir iğne ucunun numune yüzeyini üç boyutlu ve yüksek çözünürlükte taraması ilkesine dayanmaktadır. AFM’de araştırılan meteryaller; kompozitler, seramikler, film şeklindeki kaplamalar, yapay ve biyolojik zarlar, metaller, yarıiletkenler, polimerlerdir (Aydoğan 2011).

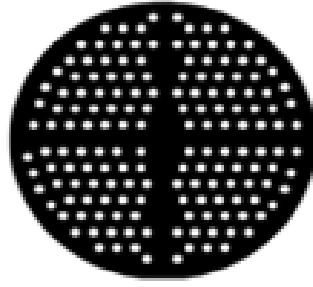


Şekil 3.11. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Park Systems XE-100E ve 2D Temsili Görseli

Numune yüzeyi incelenirken bir lazer ışını yardımıyla yüzeye doğru veya yüzeyden uzağa doğru olan, yaklaşık 0.2 (nm) ve 10 (nm) 'nanometre' arası kalınlığı olan iğne yardımıyla taranılan yüzeydeki ışın sapmaları tespit edilir. Lazer ışını bu iğne benzeri malzemenin üzerinden yansıyarak fotodiyota gönderilir. Eğer çubuk hareket ederse, yansıyan ışının açısında da değişiklikler meydana gelecektir. İşte bu değişiklikleri tespit etmek için de konuma duyarlı fotodiyot (Position sensitive photo diode, PSPD) kullanılır. Lazer ışınındaki bu sapmalar ile, incelenen nano-ölçekteki yüzey girintileri ve çıkıntıları kaydedilir. Bundan sonrasını tıpkı kabartmalı haritalara benzetebiliriz. İlgili konumun yüksekliğindeki, geometrik şekli farklılıkları incelenen nano yüzeyin haritası çıkartılır. Dolayısıyla nano-yüzeyin topografik bir görüntüsü elde edilmiş olur.

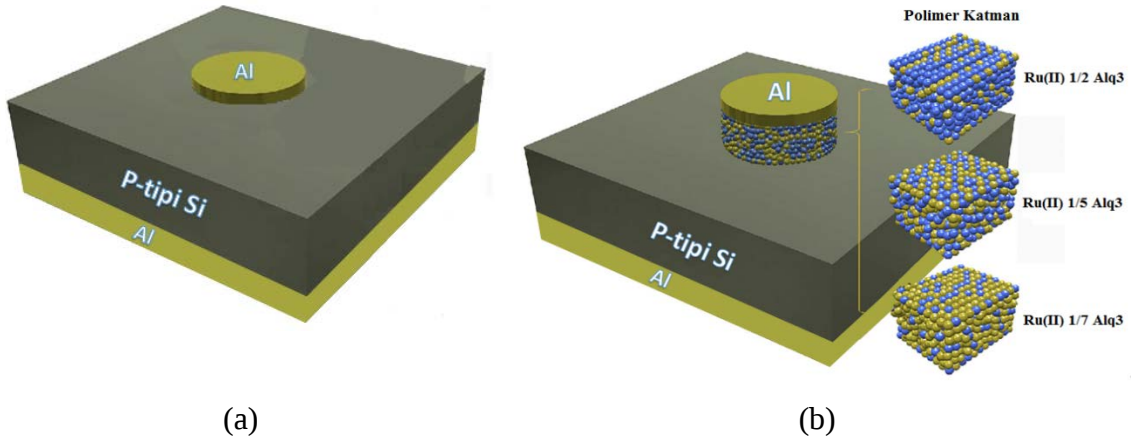
3.8. Doğrultucu-Schottky Kontak

Parlak yüzeyi polimer olarak kaplanan numuneler ve arayüzeyi kaplanılmayan referans numunemiz sterilize yapılmış doğrultucu kontak maskesine Şekil 3.12'e yerleştirilerek,



Şekil 3.12. Doğrultucu-schottky kontak maske

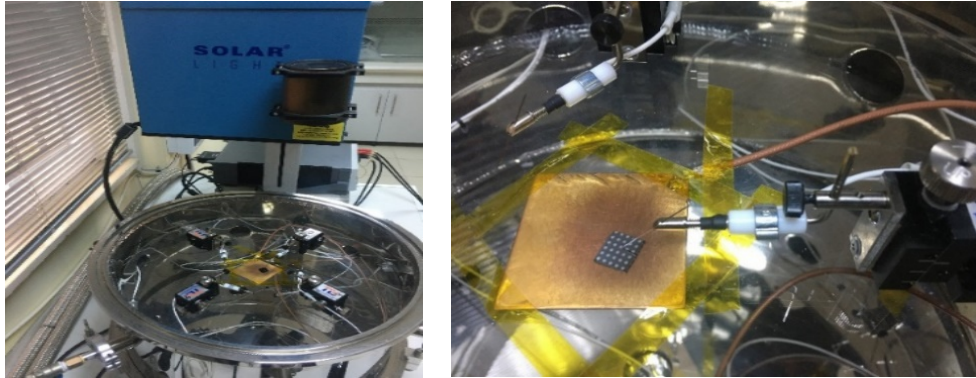
Maskeye yerleştirilen numuneler Şekil 3.6'da ince Film Kaplama Sisteminde vakum altına alındı. Cihazımızın değerleri $4,60.10^{-6}$ bar'a geldiğinde, termal buharlaştırma potasına yerleştirdiğimiz Al'a omik kontaktaki gibi artan şiddette voltaj uygulanarak yaklaşık 30 volt değerinde buharlaşma gerçekleşerek maske içerisindeki numunelerimize doğrultucu /Schottky kontağı yapıldı. Buharlaştırma işlemi sonunda Şekil 3.13'de üç boyut (3D) temsili görünümü çizilen referans ve arayüzeyi değişen oranlarda hazırlanmış MPS schottky diyotlar görülmektedir.



Şekil 3.13. Doğrultucu kontak sonucu oluşan (a) Referans – Al/p-Si/Al (b) Değişen Oranlarda Arayüzeyli; Al / Ru(II)+Alq₃ /p-tipi Si/ Al, numunelerinin 3D görünümü

3.9. Işık Şiddetine Bağlı Ölçümler

Belirli bir voltaj aralığında, Şekil 3.14’de karanlık ve değişen ışık şiddetleri altında schottky diyotun Keithley 2400 güç kaynağı eşliğinde akım iletimi verileri alınarak diyotun verimliliği analiz edilmektedir.

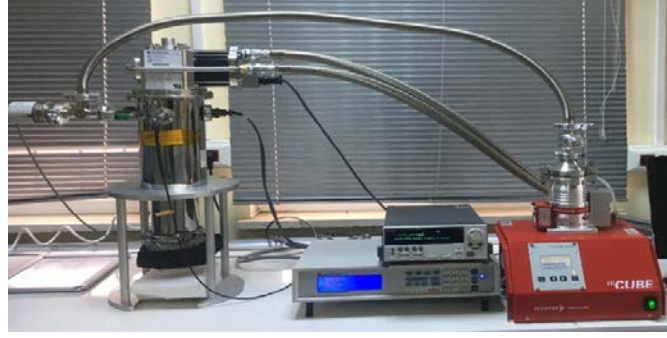


Şekil 3.14. Akım-Gerilim Solar Simülatörü / Probe Station

3.10. Sıcaklığa Bağlı Ölçümler

Optiksel ve optiksel olmayan malzemelerin elektriksel veya elektriksel olmayan karakterizasyonlarını yüksek ve düşük sıcaklık değerlerinde analiz edilmesinde kullanılan kapalı devre kryostat cihazı kullanılmaktadır.

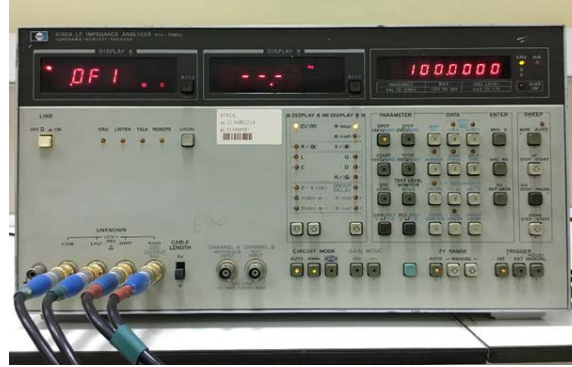
Çalışmamızda Keithley 2400 marka/model güç kaynağıyla belirli bir voltaj aralığı ve karanlık ortamda schottky diyotun değişen sıcaklık etkilerine karşı akım-gerilim verileri alınarak diyot verimliliği analiz edilmiştir.



Şekil 3.15. Kriostat cihazı – Turbo Vakum Pompası, Keithley 2400 güç kaynağı ve Sıcaklık Kontrol Ünitesi

3.11. Frekansa Bağlı Ölçümler

Belirli bir voltaj ve değişen frekans değerlerinde schottky diyotun empedans, kapasitans ve kondüktans değerleri hesaplanarak schottky diyotun verimliliği hesaplanmıştır.

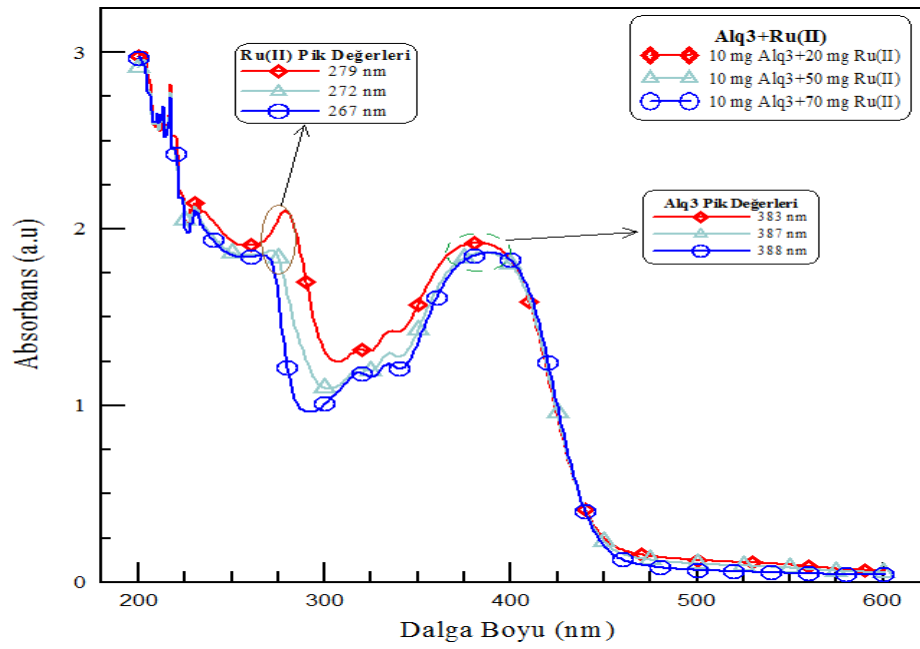


Şekil 3.16. Empedans Analiz Cihazı 4192A Model YHP Marka LF 5 Hz - 13 MHz

Empedans analiz cihazı, alternatif akım (AC) sistemlerinde akıma karşı mukavemeti ölçen bir cihazdır. Empedans, fiziksel veya kimyasal özelliklerin akım ve voltaj ile nasıl etkileşime girdiği anlamına gelir. Diğer bir deyişle empedans, bir malzemenin veya bileşenin akımı ne kadar iyi geçirdiğidir. Voltajın akıma oranı ohm (Ω) cinsinden ölçülür.

4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

4.1. UV – Görünür Bölge Absorbsiyon Spektrumları



Şekil 4.1. Ru(II) ve Alq₃ karışımı ile oluşan solisyonların UV-görünür bölge spektrumları

Organik tabakanın bant aralığını tayin etmek için solisyonların absorpsiyon/optik yoğunluk katsayılarını belirlediğimizde Şekil 4.1 alınan grafik değerleri hesaplamalarında,

$$\alpha = \frac{\ln(1-T)}{d} \quad (4.1)$$

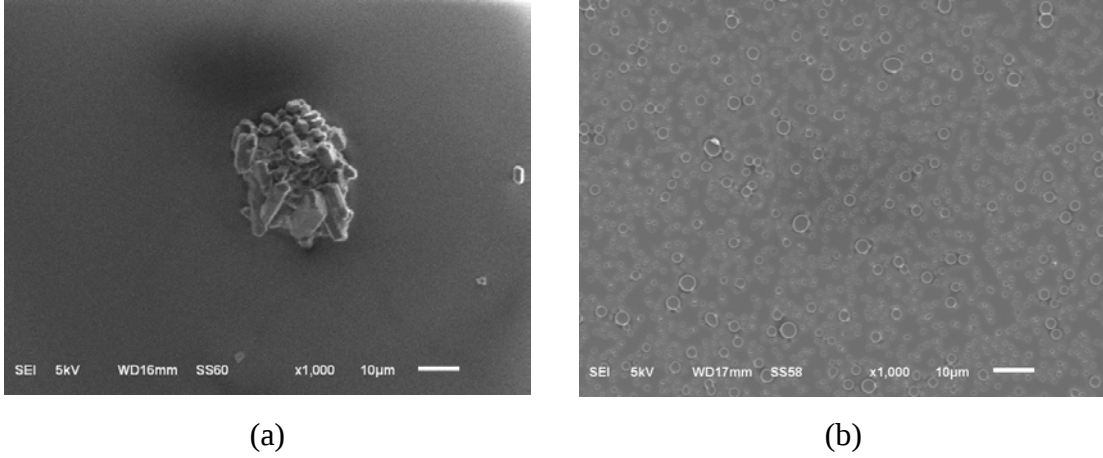
Denklemini kullanılmıştır. Burada d film kalınlığını, T optik geçirgenliğin yüzde değerini temsil eder. Solisyonlarımız için bant aralığını,

$$\alpha h\nu = K(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (4.2)$$

denklemleri ile bulunmaktadır. Burada K malzememizin sabitini, $h\nu$ foton enerjisini, E_g yasak bölge enerji aralığını temsil etmektedir. Hazırlanan solisyonların absorptans pik değeri incelendiğinde Şekil 4.1’de, 383-388 nm aralığında Alq_3 için pik değeri olarak değerlendirilmekte (Sevgili vd. 2020). 267-279 nm aralığı bize Kompleks $Ru(II)$ molekülünün pik değeri olarak değerlendirilmektedir (Pawal et al. 2017). Kompleks bileşenler yapıları gereği ve solisyon oluşum şartlarına göre absorptans değeri değişkenlik gösterebilmektedir. Yine bu ölçümlerden solisyonlarımızın bant aralığı $(\alpha h)^2 - h\nu$ grafiğinin eğim değeri incelenerek elde edilen sonuçlar sırasıyla 2.23 eV, 2.31 eV, 2.33 eV olarak bulunmuştur.

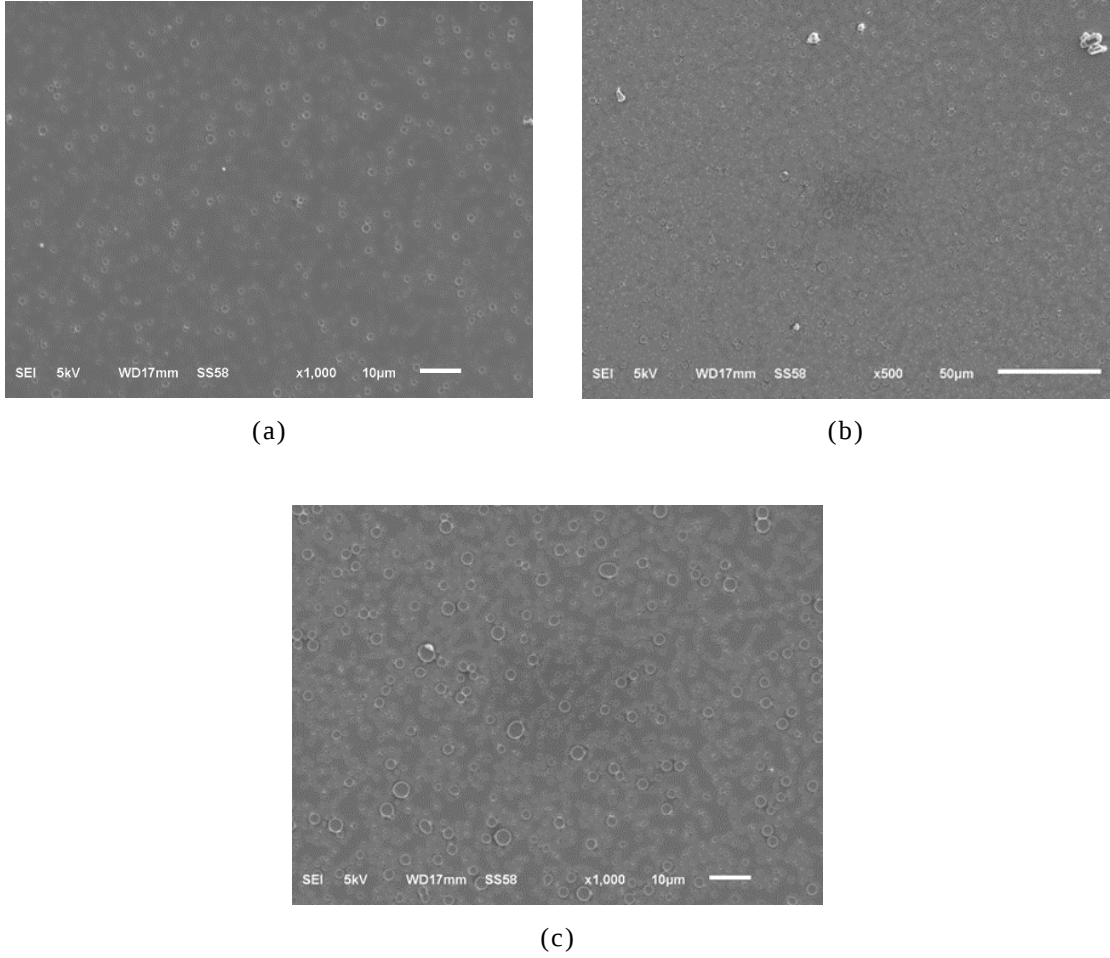
4.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntüleri

Hazırlanan solisyonların spin coating yöntemi ile yüzey filmi oluşturulmasında solisyon bekleme sürelerinin yüzey morfolojisinde değişime sebep olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.2. Solisyon bekleme sürelerine göre yüzey SEM görüntüleri a) 1 saat bekletilmiş solisyon b) 24 saat bekletilmiş solisyon

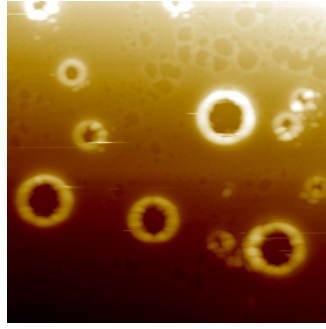
Diyot arayüzeyine kaplanmak üzere hazırlana solisyonun, yüzeye kaplanmadan önce bekleme süreleri farklarından dolayı oluşan yüzey şekilleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Yüzeyde homojen bir yapı oluşumu esas alınarak solisyonlarımız 24 saat bekletilerek spin coating ile yüzey filmi oluşturulmuştur.



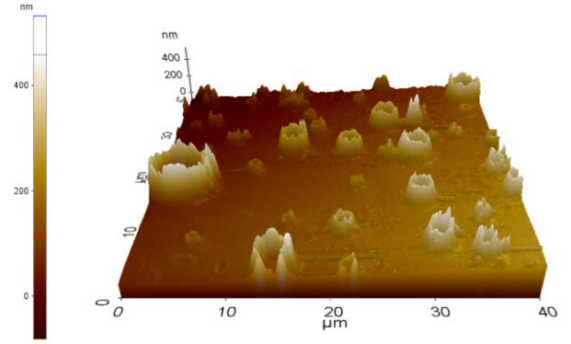
Şekil 4.3. Ru(II) ve Alq₃ kompleks solisyonların taramalı electron mikroskobu SEM görüntüleri (a) (1/2)Ru(II)+Alq₃ (b) (1/5)Ru(II)+Alq₃ (c) (1/7)Ru(II)+Alq₃

Solisyonlarımız cam altlık üzerine spin yöntemiyle aynı şekilde kaplanarak SEM görüntüleri incelenmiştir. Şekil 4.3’de her bir numune için SEM görüntüleri ayrı ayrı incelendiğinde yüzeyin belirli bölgelerinde mikro halka yapıların olduğu gözlemlenmiştir. Arayüzeyde kullanılan solisyondaki madde miktarının artması ile yüzey şekillerinin sayısının arttığı ve Şekil 4.3.c’de görüleceği gibi artan Alq₃ miktarı ile mikro halkalarının çapının büyüdüğü görülmüştür.

4.3. Atomik Kuvvet Mikroskopi (AFM) Görüntüleri

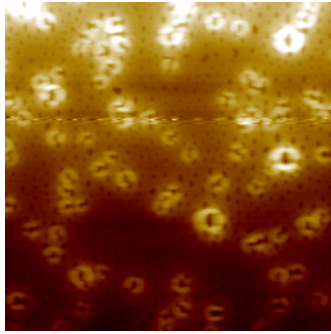


(a)

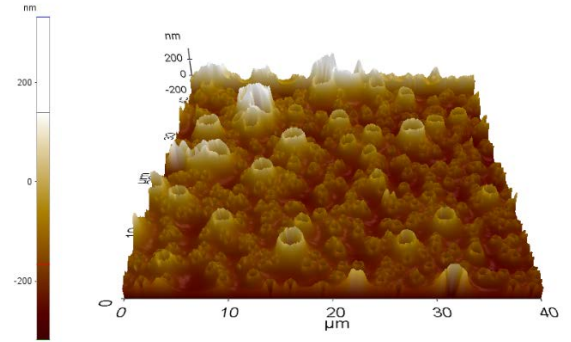


(b)

Şekil 4.4. (1/2)Ru(II)+Alq₃ AFM yüzey morfolojisi a) 20 μm^2 yüzey kesiti b) 40 μm^2 3D yüzey kesiti

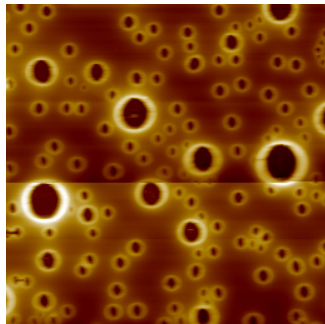


(a)

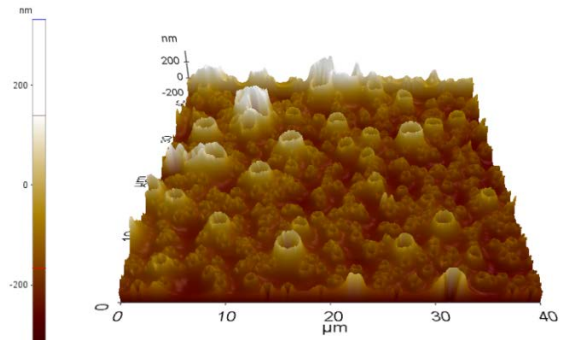


(b)

Şekil 4.5. (1/5)Ru(II)+Alq₃ AFM yüzey morfolojisi a) 20 μm^2 yüzey kesiti b) 40 μm^2 3D yüzey kesiti



(a)



(b)

Şekil 4.6. (1/7)Ru(II)+Alq₃ AFM yüzey morfolojisi a) 20 μm^2 yüzey kesiti b) 40 μm^2 3D yüzey kesiti

Arayüzeyde kullanılan solisyonların lamel üzerine spin coatig ile kaplanarak yüzey morfolojisinin AFM cihazında $20 \mu m^2$ ve $40 \mu m^2$ alan üzerine yapılan analizin Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6'de görüleceği üzere iki ve üç boyutlu resimleridir.

4.4. Akım-Gerilim Diyot Karkteristikleri

4.4.1. Fotovoltaik Ölçümlerin Elde Edilmesi

Schottky diyot karakteristik parametreleri olarak bilinen, engel yüksekliği Φ_b idealite faktörü n gibi parametreler hesaplandı. İdealite faktörü, ideal durumlar için 1'e eşittir ve boyutsuz bir parametre olarak diyotun ideallikten ne kadar uzaklaştığını anlamamıza yardımcı olur. Fiziki olarak üretilen kontakların idealitelerinde 1'den yukarı değerler elde edildiği için, bir kontakın idealite katsayısı 1'e ne kadar yakınsa kontakın o kadar iyi olduğu anlamı gözetilir. İdealite faktörünü termoiyonik emisyon teorisine göre elde edilen akım ve gerilimi ilişkilendiren denklemden yola çıkarak bulmak uygun olacaktır. Denklem 1.26'da $J = I/A$ durumunu gözeterek, I akımının gerilim ile birlikte exponansiyel olarak arttığı Denklem 4.3'de görülmektedir. Ayrıca I akımının, sıfır beslem altında oluşan zıt yönlü I_0 akımının da katsayısı olarak arttığı görülmektedir. Denklem 1.26'da (-1) değeri sıfır beslemde ters yönlü oluşan akım değerini temsil etmektedir, fakat doğru yönde uygulanan gerilime belirli büyüklükte ise bu (-1) ile temsil edilen ters yönlü akımın değeri ihmal edilecek kadar küçük kalmaktadır. Diyot parametrelerini incelerken referans olarak alacağımız idealite faktörü için hesaplamalarda,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.3)$$

eşitliğinden faydalanıldı. Diyot düz beslem durumunda besleme gerilimi $eV \gg kT$ olduğunda, denklemtteki -1 ihmal edilebilir. Bu durumda,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \right] \quad (4.4)$$

şeklinde yeniden yazılabilir.

Bu eşitliğin her iki tarafının tabii logaritması alınarak V 'ye göre türevi alınırsa, idealite faktörü,

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4.5)$$

olarak elde edilir. Burada elde ettiğimiz yarı logaritmik $\ln I$ - V grafiğinin düz beslem bölgesine yer alan lineer kısmına bir fit alındığı zaman ortaya çıkan doğrunun eğiminden $dv/d(\ln I)$ elde edilir. Yine bu doğrunun eğiminden $V=0$ 'da düşey eksenini kestiği nokta bize I_0 doyma akım yoğunluğunu verir. Denklem 4.3'de I_0 doyma akım yoğunluğu,

$$I_0 = AA^* \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \quad (4.6)$$

şeklindedir. Denklem 4.6 her iki tarafı tabii logaritması alınarak, Φ_b 'ye göre çözümlenirse,

$$e\Phi_b = kT \ln(AA^*T^2/I_0) \quad (4.7)$$

şeklinde engel yüksekliği ifadesi elde edilir. Burada k Boltzaman sabiti olup $k = 8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ olarak, T kelvin cinsinden ortamın sıcaklığını $T=300 \text{ K}$ olarak, A diyot etki alanını $A = 7,85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$, A^* Richardson sabiti olup p-Si için $32 \text{ A/K}^2 \text{ cm}^2$ dir. Bu değerler Denklem 4.5 ve 4.7'de yerlerine yazılırsa engel yüksekliği ve idealite gibi temel diyot parametrelerine ulaşılmış oluruz. Tablo 4.1'de odasıcaklığında ve karanlık ortamda alınan ölçümlerin sonucu olarak her bir diyot için hesaplanan değerler;

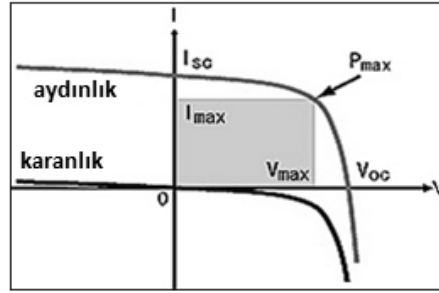
Tablo 4.1. Oda sıcaklığında karanlık ortamda alınan I-V ölçümlerinin TE ile yorumlanması

Numune	Bariyer yüksekliği Φ_b	İdealite n
Al/p-Si/Al	0,78	1,82
(1/2)Ru(II)+Alq ₃ /p-si/Al	0,79	4,73
(1/5)Ru(II)+Alq ₃ /p-si/Al	0,76	3,65
(1/7)Ru(II)+Alq ₃ /p-si/Al	0,79	4,29

Fotovoltaik ölçümlerde schottky diyotlar ışıık altında güneş pili görevi görebilmektedirler. Diyot üzerine gönderilen fotonların soğrularak elektron-hol çiftlerini oluşturmaları ve elektronların güneş pilinin negatif termaline, hollerin ise güneş pilinin pozitif termaline yönelim göstermesi güneş pili yapı muhteviyatını ortaya koymaktadır. Bir güneş pilinin akım-gerilim karakteristiğı aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Shockley 1950);

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{eV_{oc}}{kT} \right) - 1 \right] \quad (4.8)$$

Burada I_{ph} ışıık ile beraber oluşun akımdır ve pil üzerine düşen foton akışına bağılı olarak değışiklik göstermektedir. I_0 doyma akımını temsil eder ki, buda karanlık ortamda güneş pilinin klasik bir doğrultucu görevi gördüğünü göstermektedir.



Şekil 4.7. Bir güneş piline ait akım-gerilim grafiğı

Bir güneş pilinde parametrelerin hesaplanması için Şekil 4.7’de akım-gerilim grafiğınden I_{max} ve V_{max} ifadeleri maksimum gücü elde edebilmemiz için gereken akım ve gerilimi ifade etmektedir. Bu durumda;

$$P_{max} = I_{max} V_{max} \quad (4.9)$$

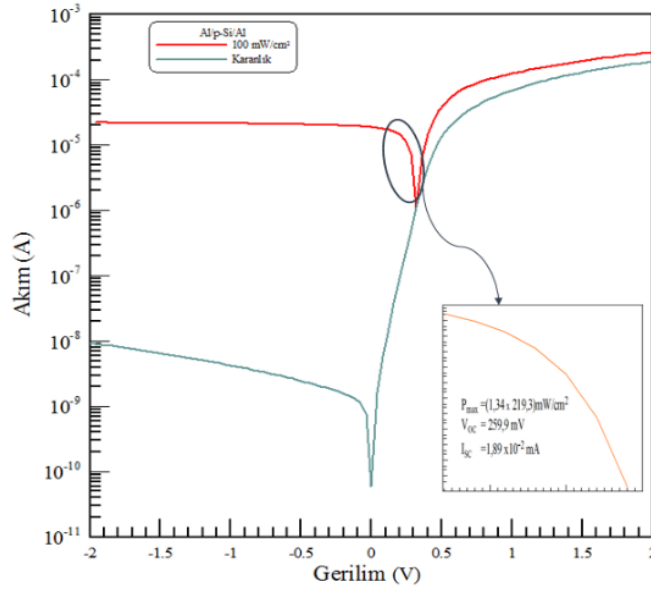
olarak ifade edilir. Güneş pili verimliliğı (η) soğrulan ışıık enerjisinin elektrik enerjine çevrilmesi yüzdesini temsil etmektedir. Bu ifade pilden elde edilen maksimum gücün pil üzerine düşürülen ışıığın gücüne oranlanmasıyla hesaplanmaktadır;

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inA}} \quad (4.10)$$

Burada P_{in} pil üzerine düşen ışığın gücü, A pilin etki alanı (diyot alanı) dır. Güneş pillerinin karakterizasyonunu belirlemede kullanılan bir diğer parametre de doluluk oranıdır. Bu terim, elde edilen maksimum gücün açık devre gerilimi ve kısa devre geriliminin çarpımına oranlanması ile;

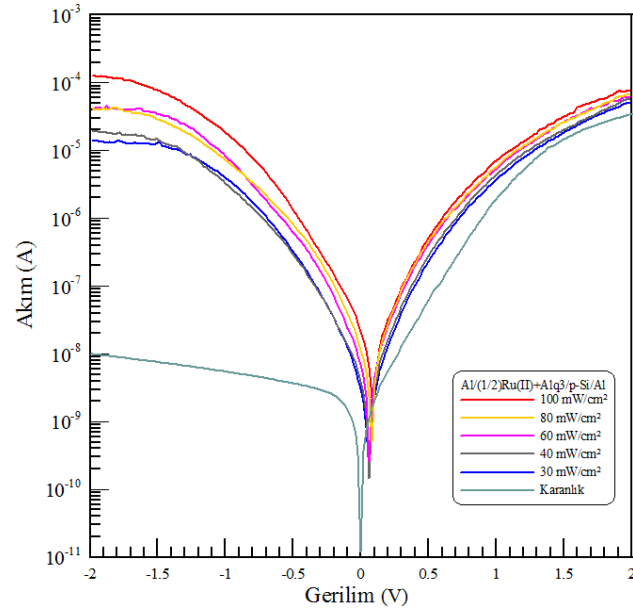
$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc}I_{sc}} = \frac{P_{in}}{V_{oc}I_{sc}} \quad (4.11)$$

ifade dilmektedir. Numunelerimiz ışık altında incelendiğinde elde edilen yarı logaritmik I-V grafikleri ve güneş pili verimlilikleri incelendiğinde;



Şekil 4.8. Referans numunesinin (Al/p-Si/Al) karanlık ve 100 mW/cm² ışık şiddeti altında lnI-V grafiği ve güneş enerjisi verimliliği çıkarımı

Şekil 4.8’de referans numunesinin karanlık ve 100 mW/cm² ışık şiddeti altında alınan akım-gerilim grafiğinden yapılan hesaplamalarda $I_{sc} = 1,84 \times 10^{-2} \text{ mA}$, $V_{oc} = 319,95 \text{ mV}$, $I_{max} = 1,45 \times 10^{-2} \text{ mA}$ ve $V_{max} = 199,89 \text{ mV}$ değerlerinden yola çıkılarak doluluk faktörü $FF = \%42,23$ ve güneş enerji verimlilik değeri $\eta = \%0,037$ olarak hesaplanmıştır. Işık şiddeti altında diyotun ters beslem bölgesindeki akımın arttığı gözlenilmektedir.

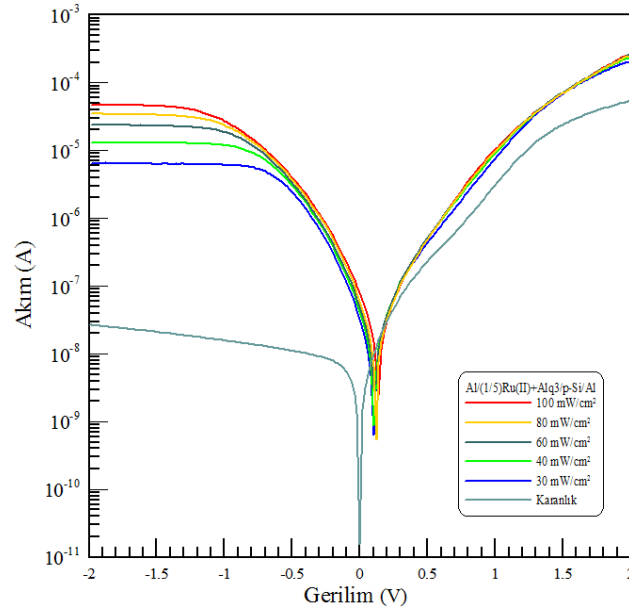


Şekil 4.9. Al/(1/2)Ru(II)+Alq₃/p-Si/Al diyot yapısının karanlık ve 30-100 mW/cm² ışık şiddeti altında lnI-V grafiği

Şekil 4.9’da grafiği incelediğimizde ışık şiddeti arttıkça ters beslem bölgesinde akım değerinin arttığını görmekteyiz. Tablo 4.2’deki diyot parametreleri incelendiğinde diyotun ışığa karşı duyarlılığı değişen ışık şiddetlerine göre incelenmiştir.

Tablo 4.2. Al/(1/2)Ru(II)+Alq₃/p-Si/Al diyot yapısının karanlık ve 30-100 mW/cm² ışık şiddeti altında

Işık Şiddeti mW/cm ²	I _{sc} (mA)	V _{oc} (mV)	I _{max} (mA)	V _{max} (mA)	Doluluk Oranı %(FF)	Güneş Enerji Verimi %(η)
30	1,96E-6	59,92	1,96E-6	19,92	33,26	0,002
40	2,60E-6	59,92	2,60E-6	19,92	33,26	0,002
60	4,55E-6	59,92	2,33E-6	39,94	34,07	0,002
80	8,41E-6	79,89	5,36E-6	39,94	31,90	0,003
100	1,61E-5	79,89	1,12E-5	39,94	34,67	0,006

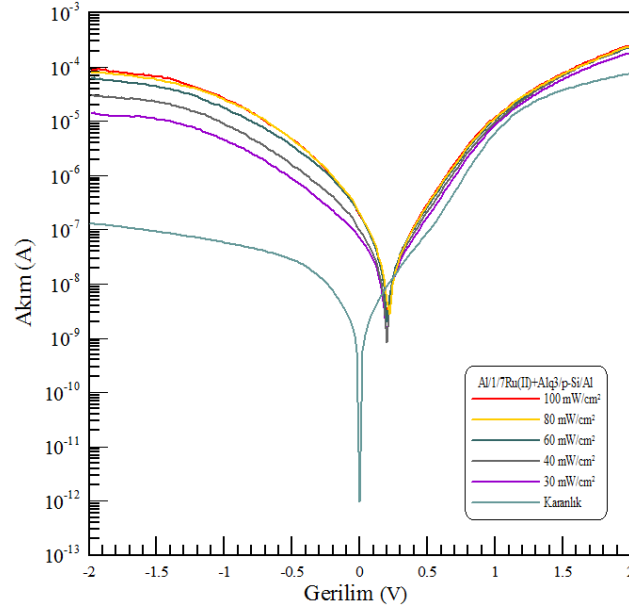


Şekil 4.10. Al/(1/5)Ru(II)+Alq₃/p-Si/Al diyot yapısının karanlık ve 30-100 mW/cm² ışık şiddeti altında lnI-V grafiği

Şekil 4.10’de kompleks Ru(II) molekülü sabit tutularak Alq₃ molaritesini arttırıldığında alınan ölçümler sonucu lnI-V grafiğidir. Bu grafik incelenerek Tablo 4.3’de diyot parametreleri incelenirse, arayüzey filminde Alq₃ miktarında oluşan artışın etkisi olarak fotodiyot etkisi gösteren diyotun ilk numune (1/2)Ru(II)+Alq₃’e kıyasla diyot doluluk oranında ‘FF’ azalma olduğu, diyot güneş verimliliğinde ‘ η ’ nisbeten artış olduğu gözlenilmektedir.

Tablo 4.3. Al/(1/5)Ru(II)+Alq₃/p-Si/Al diyot yapısının karanlık ve 30-100 mW/cm² ışık şiddeti altında lnI-V grafiğinden elde edilen diyot parametreleri

Işık Şiddeti mW/cm ²	I _{sc} (mA)	V _{oc} (mV)	I _{max} (mA)	V _{max} (mA)	Doluluk Oranı %(FF)	Güneş Enerji Verimi %(η)
30	2,37E ⁻⁵	99,87	1,66E ⁻⁵	39,94	27,92	0,028
40	3,11E ⁻⁵	99,87	2,22E ⁻⁵	39,94	28,47	0,028
60	3,69E ⁻⁵	99,87	1,80E ⁻⁵	59,92	29,27	0,022
80	4,56E ⁻⁵	119,85	2,38E ⁻⁵	59,92	26,09	0,022
100	6,17E ⁻⁵	139,87	3,48E ⁻⁵	59,92	24,17	0,026



Şekil 4.11. Al/(1/7)Ru(II)+Alq₃/p-Si/Al diyot yapısının karanlık ve 30-100 mW/cm² ışık şiddeti altında lnI-V grafiği

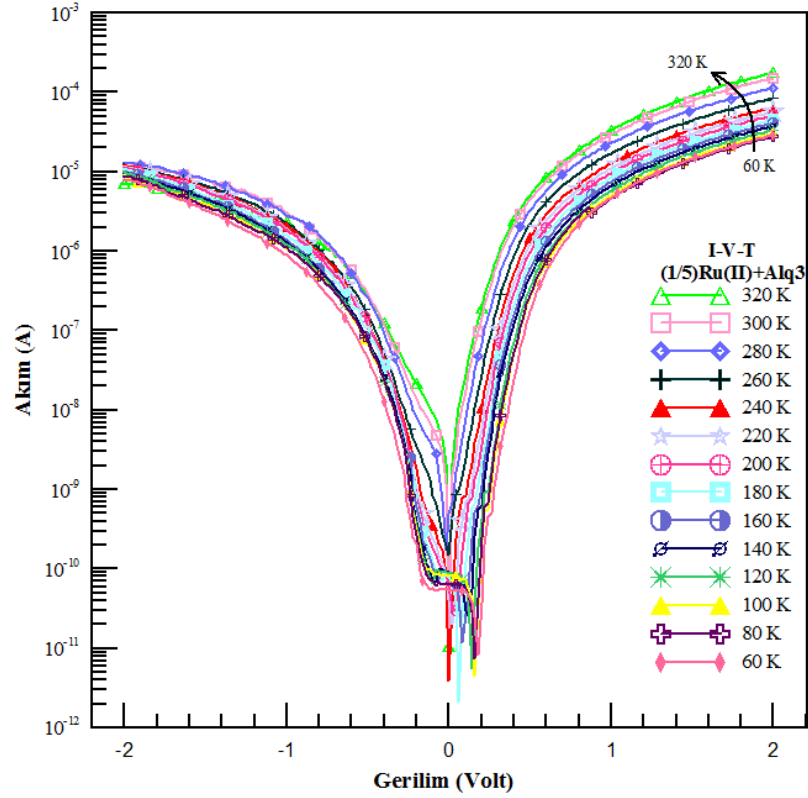
Şekil 4.11’de kademeli olarak artan Alq₃ miktarının lnI-V grafiğinden görüleceği üzere diyot güneş verimliliği 1/2Ru(II)+Alq₃ ve 1/5Ru(II)+Alq₃ arayüzeyli diyotlara kıyasla güneş verimliliğinde artış olduğu tesbit edilmiştir. Buda bize eklenen Alq₃ molekülünün miktarının artışı diyotun güneşe olana tepkisinin arttırdığını göstermektedir. Grafik verilerimiz Tablo 4.4’de görülmektedir.

Tablo 4.4. Al/(1/7)Ru(II)+Alq₃/p-Si/Al diyot yapısının karanlık ve 30-100 mW/cm² ışık şiddeti altında lnI-V grafiğinden elde edilen diyot parametreleri

Işık Şiddeti mW/cm ²	I _{sc} (mA)	V _{oc} (mV)	I _{max} (mA)	V _{max} (mA)	Doluluk Oranı %(FF)	Güneş Enerji Verimi %(η)
30	6,06E ⁻⁵	199,94	3,46E ⁻⁵	79,92	22,81	0,011
40	8,46E ⁻⁵	199,94	4,42E ⁻⁵	79,92	20,91	0,011
60	1,59E ⁻⁴	199,94	9,55E ⁻⁵	59,95	18,73	0,012
80	1,63E ⁻⁴	219,97	8,30E ⁻⁵	79,92	18,45	0,010
100	1,57E ⁻⁴	199,94	7,80E ⁻⁵	79,92	19,85	0,007

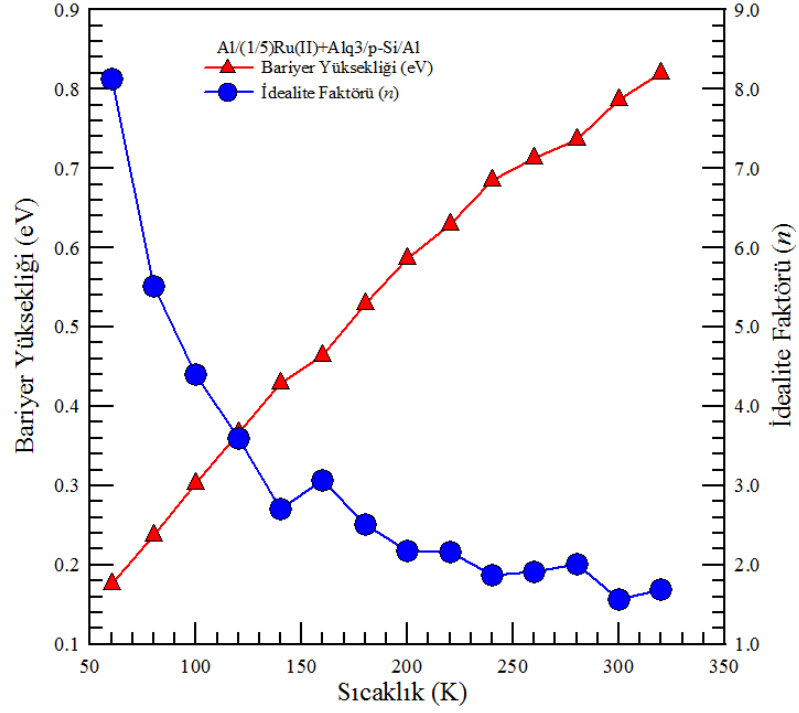
4.4.2. Sıcaklığa Bağlı Ölçümlerin Elde Edilmesi

Karanlık ortamda ve değişen sıcaklık değerlerinde 60-320 K schottky diyotlarında yapılan I-V-T ölçümleri bize diyot yapısının kararlılığını ve akım iletimindeki mekanizmaların anlaşılmasında bize birçok diyot parametreleri sunmaktadır. Bu ölçümler sırasında ışığa karşı doluluk faktörü ve güneş verimliliği olarak diğer numunelere nazaran verimliliği yüksek olan $1/5\text{Ru(II)}+\text{Alq}_3$ arayüzeyli diyotumuz sıcaklığa bağlı I-V ölçümleri alınmıştır. Diyotun akım iletim mekanizmalarını TE, Norde ve Cheung fonksiyonları yardımıyla incelenmiştir.



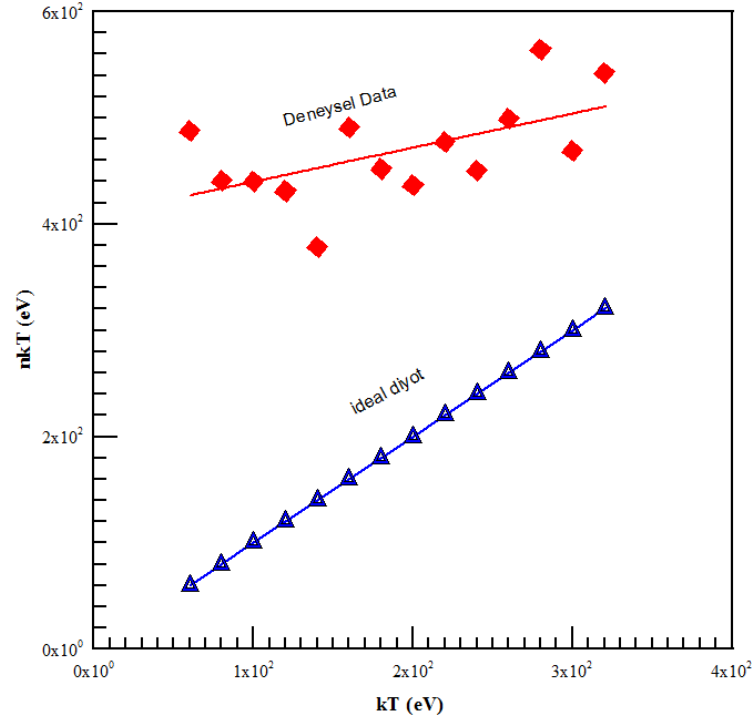
Şekil 4.12. $\text{Al}/(1/5)\text{Ru(II)}+\text{Alq}_3/\text{p-Si}/\text{Al}$ diyot yapısının 60-320 K sıcaklık altında ve karanlık ortamda alınan $\ln I$ -V grafiği

Şekil 4.12’de görüleceği üzere, $(1/5)\text{Ru(II)}+\text{Alq}_3$ arayüzeyli Schottky diyotun karanlık ortamda $\pm 2\text{V}$ doğru beslem aralığında, 60-320 K sıcaklık aralığında yapılan ölçümler sonrası yarı logaritmik $\ln I$ -V grafiği çizilmiştir.

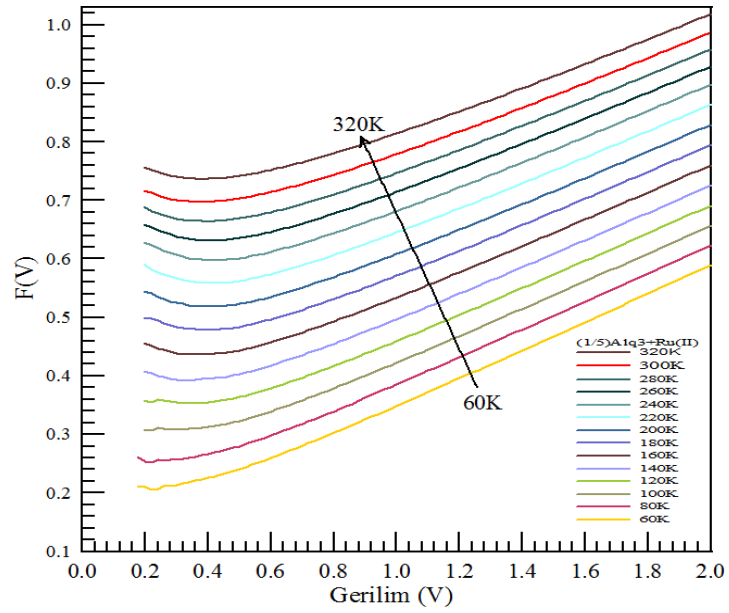


Şekil 4.13. TE'den Al/(1/5)Ru(II)+Alq₃/p-Si/Al schottky diyotun farklı Sıcaklıklarda (K) Bariyer Yüksekliği (Φ_b) ve İdealite Faktörü (n) grafikleri

Şekil 4.13'de değişen sıcaklık durumlarında schottky diyotun akım iletiminde etkili öneme sahip olan bariyer yüksekliği ve idealite faktöründeki sıcaklıkla değişimlerinin nedeni olarak MPS diyot arayüzeyinde akım iletim mekanizmasının bütünüyle TE ile olmamasından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte düşük sıcaklıklarda elektron/hol'ler küçük engelleri kolaylıkla geçebilmektedir. Kolay geçişlerin meydana getirdiği akım değerleri düşük engel yüksekli ve büyük idealite faktörüne sahip görünmektedir (Tung 1992; Karataş vd. 2005). Literatürde düşük sıcaklıklarda engel yüksekliğindeki azalış ve idealite faktöründe oluşan artışın, arayüzey yükünün düzensizliği ve arayüzeyin d kalınlığındaki homojensizlik gibi etkenlerden kaynaklandığı belirtilmiştir (Chand 1995). Bariyer yüksekliği ve idealite faktörünün değişen sıcaklıklarla birbirlerinin etkileyen değişimler göstermesi arayüzey ve engel yüksekliğindeki homojensizliğe bağlı olduğu söylenebilir (Karabulut 2018).



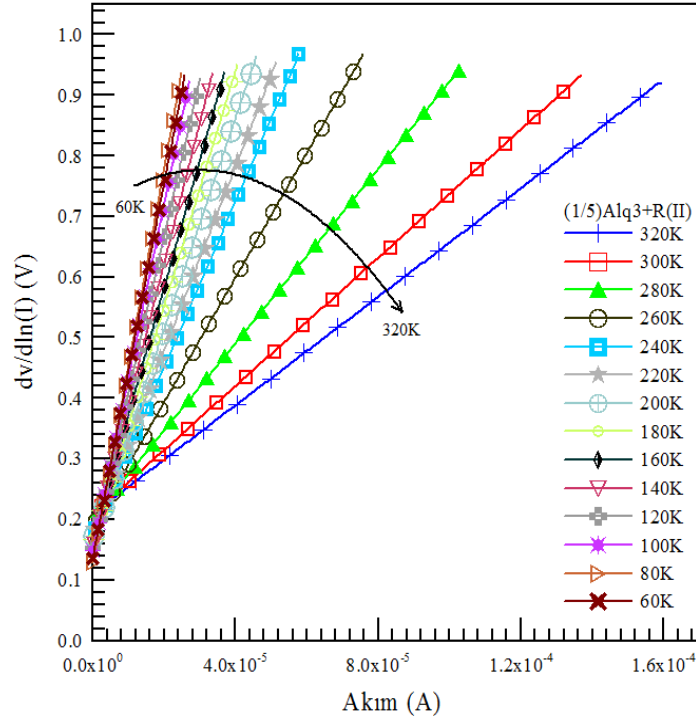
Şekil 4.14. Al/(1/5)Ru(II)+Alq₃/p-Si/Al schottky diyotun deneysel ve teorik idealite faktörü (n), $nkT - kT$ grafiği



Şekil 4.15. Norde fonksiyonu ile Al/(1/5)Ru(II)+Alq₃/p-Si/Al schottky diyotun 60-320 K sıcaklık aralığındaki $F(V)$ - V grafiği

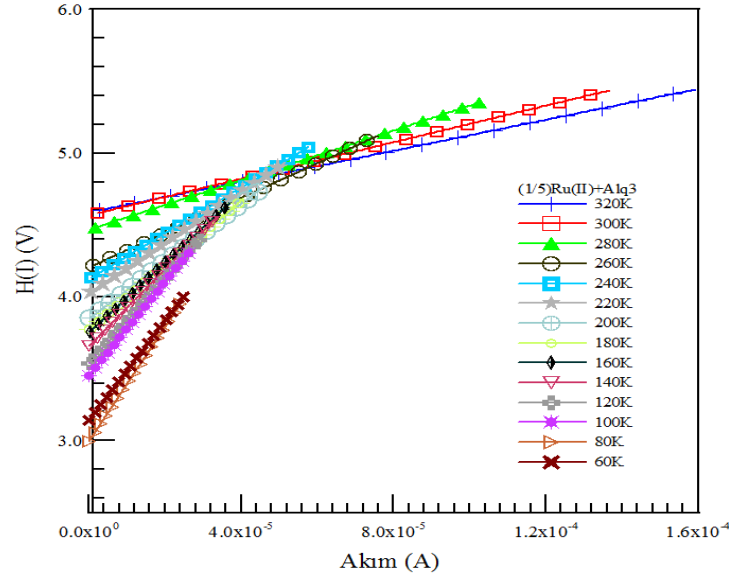
Şekil 4.14’de elde ettiğimiz deneysel verilerin teorikde gerçekleşen ideal diyot yaklaşımına nederece yaklaşıldığının temsili gösterilmektedir. Şekil 4.15’de değişen sıcaklık

değerlerinde akım iletim mekanizmalarını, Norde fonksiyonu Denklem 1.45 ve Denklem 1.46'da deneysel akım iletim eğrileri denkleminde değerlendirildiği zaman R_s seri direnç değeri, Denklem 1.47'dan Φ_b bariyer yüksekliği elde edilmiştir. Norde hesaplamalarında doğru beslem altındaki eğrinin sadece lineer kısmı dikkate alınmıştır, bu bölgede akım üstel olarak değişim göstermektedir. Hesaplamalarda seri direnç ve engel yüksekliği bulunurken geleneksel TE metodu ile bulunan idealite çarpanı değeri kullanılmıştır (Karataş ve Altındal 2004).



Şekil 4.16. Cheung fonksiyonu ile $(1/5)\text{Ru(II)}+\text{Alq}_3/\text{p-Si/Al}$ schottky diyotun 60-320 K sıcaklık aralığındaki $dV/d\ln I$ -I eğrileri

Diyot karakteristiğini anlaşılmasında bir diğer yöntem olan cheung fonksiyonlarından faydalandığında, diyotun doğru beslem altında artan lineer fit doğrusunda artan gerilim ile oluşan değişim bölgesine yapılan yeni bir fit denklemi ile diyot karakteristiklerinden idealite n , bariyer yüksekliği Φ_b ve seri direnç R_s değerleri hesaplanılmış olup Şekil 4.16 ve 4.17'de görüleceği üzere elde edilen parametrelerin değişen sıcaklık durumlarına karşı değişimler incelenmiştir.



Şekil 4.17. Cheung fonksiyonu ile (1/5)Ru(II)+Alq₃/p-Si/Al schottky diyotun 60-320 K sıcaklık aralığındaki H(I)-I eğrileri

Sıcaklığa bağlı alınan ölçüm sonuçlarında her bir sıcaklık değeri için, TE teorisinden diyotun idealite faktörü ve bariyer yüksekliği hesaplamalarında Denklem 4.5 ve Denklem 4.7 hesaplamara alınmış olup, diyotun doğrultucu özelliğinin araştırmasında diğer yöntemlerden Norde fonksiyonunda Denklem 1.46 ve 1.47'den, Cheung fonksiyonlarından Denklem 1.51 dikkate alınarak diyotun seri direnç, bariyer yüksekliği ve idealite değerleri $\ln I$ -V grafiklerinin her bir termal emisyon bölgesi lineer fitler yapılarak eğimlerinde meydana gelen değişim değerleri incelendi. Tablo 4.5'de organik arayüzeyli schottky diyotun termal emisyon bölgelerinin farklı yöntemlerle elde edilen diyot parametreleri görülmektedir.

Tablo 4.5. Al/(1/5)Ru+Alq₃/p-Si/Al MPS Schottky diyotun değişen sıcaklık değerlerinde, doğunluk I₀, idealite n, bariyer yüksekliği Φ_b ve seri direnç R_s değerlerinin incelenmesi

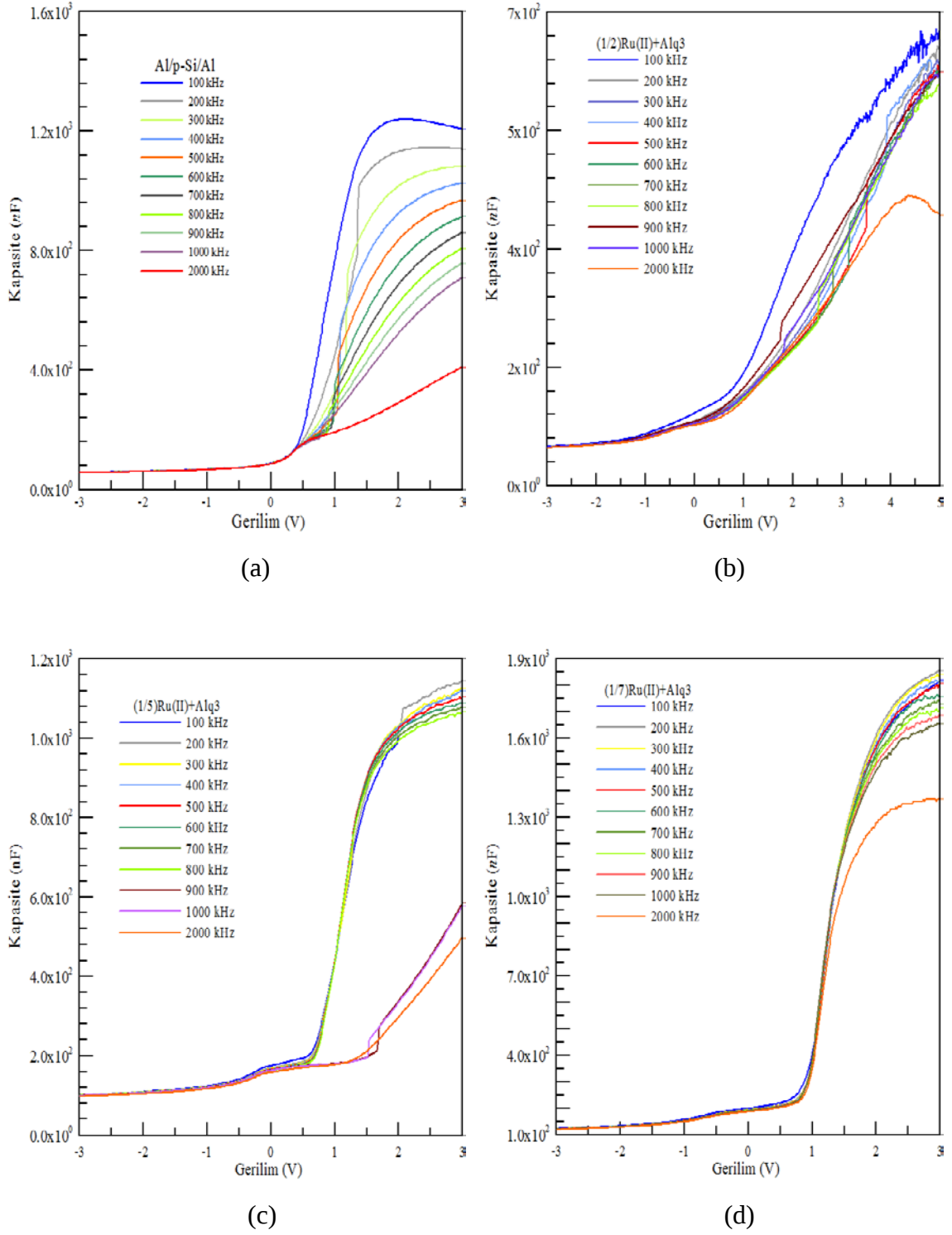
T (K) Sıcaklık	I ₀ (TE)	n (TE)	n (Cheung)	Φ_b (eV) (TE)	Φ_b (eV) (Norde)	Φ_b (eV) (Cheung)	R _s (k Ω) F(V)-V (Norde)	R _s (k Ω) dv/d(lnI) (Cheung)	R _s (k Ω) H(I)-I (Cheung)
320	3,33E ⁻⁹	1,70	6,89	0,82	0,89	0,67	4,12E ³	4,48E ⁹	5,38E ³
300	1,47E ⁻⁹	1,56	6,86	0,79	0,85	0,67	7,92E ³	5,25E ⁹	6,37E ³
280	1,13E ⁻⁹	2,02	6,65	0,74	0,84	0,67	1,70E ⁴	7,19E ⁹	8,63E ⁴
260	2,64E ⁻¹⁰	1,92	6,16	0,71	0,80	0,68	2,94E ³	1,03E ⁹	1,21E ³
240	6,03E ⁻¹¹	1,88	5,81	0,69	0,78	0,71	4,01E ³	1,37E ⁷	1,59E ³
220	4,95E ⁻¹¹	2,17	5,79	0,63	0,74	0,70	3,10E ⁴	1,51E ⁹	1,76E ⁴
200	1,77E ⁻¹¹	2,18	5,48	0,59	0,70	0,70	4,71E ⁴	1,74E ⁹	2,00E ⁴
180	1,28E ⁻¹¹	2,51	5,35	0,53	0,66	0,70	3,63E ⁵	1,94E ⁷	2,24E ⁴
160	1,56E ⁻¹¹	3,07	5,33	0,46	0,59	0,70	2,33E ⁵	2,10E ⁹	2,43E ⁵
140	1,73E ⁻¹²	2,70	5,18	0,43	0,54	0,71	1,27E ⁵	2,32E ⁹	2,67E ⁵
120	1,52E ⁻¹²	3,59	4,99	0,37	0,52	0,71	1,26E ¹²	2,58E ⁹	2,97E ⁵
100	1,44E ⁻¹²	4,40	4,87	0,30	0,45	0,71	1,16E ¹²	2,86E ⁸	3,27E ¹²
80	1,73E ⁻¹²	5,51	4,18	0,24	0,37	0,72	2,17E ¹²	3,25E ⁹	3,98E ¹²
60	1,46E ⁻¹²	8,12	4,49	0,18	0,31	0,70	2,26E ¹³	3,05E ⁹	3,51E ¹³

Sıcaklığa bağlı ölçümlerden elde edilen yarı logaritmik ln(I)-V grafiğinin herbir emisyon bölgesinin eğimleri TE, Norde ve Cheung fonksiyonları yardımıyla incelenerek değişen sıcaklık durumlarına karşı Tablo 4.5’de incelenmiştir.

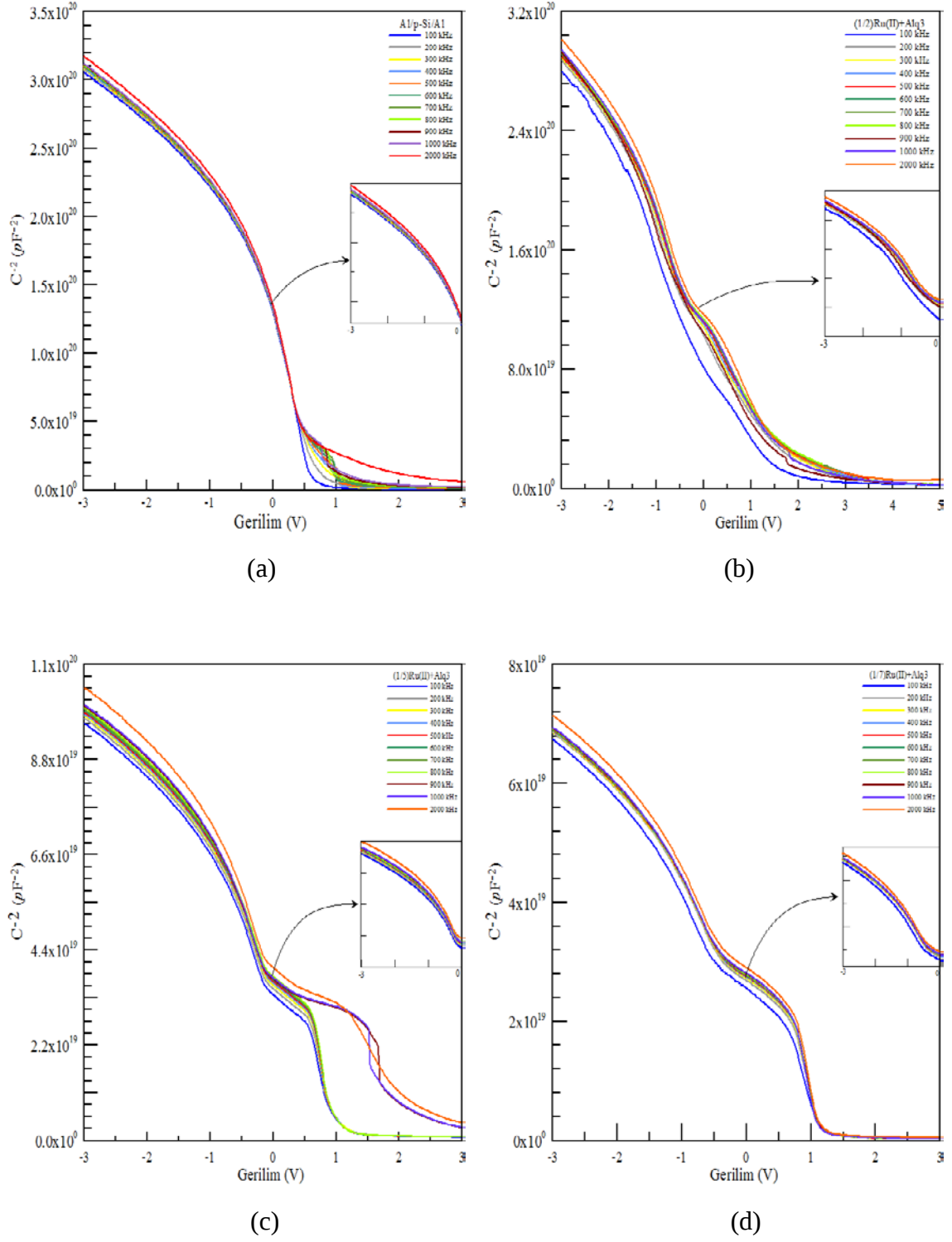
4.5. Frekansa Bağlı Diyot Karakteristikleri

Schottky kontakların akım iletim mekanizmalarının yanı sıra elde edilen diyotun frekansa karşı verdiği tepkiyi belirlemek amacıyla referans (Al/p-Si/Al) ve (1/5)Ru(II)+Alq₃ ara yüzey katmanlı numunelerimizi frekansa bağımlı incelemelerde bulunuldu. C-V ve kondüktans/İletkenlik – voltaj karakteristikleri oda sıcaklığında geniş bir frekans aralığında (100-2000 kHz) incelenerek sırasıyla Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da görüleceği üzere C-V eğrileri terslenim, yığılım ve tükenim tabakasından oluşan üç bölgeye sahip olduğu gözlemlenmiştir. C-V ile diyot parametrelerinin incelenmesi diyot kontak aralığında varlığı bilinen uzay yükü bölgesinin öngerilimlenmiş terslenim bölgesinin genişliği ile ilişkilidir. Gerilimi takip eden düşük frekans değerlerinde yüksek pik verilen bölgeyi tükenim bölgesi olarak adlandırmak mümkündür. Bu tükenim bölgesindeki pik durumlarını yasak enerji aralığında mevcut arayüzey durumlarının yani arayüzey tabakasının varlığı teyit edilmiş olur. Diyotun grafiğinde kapasitenin artan gerilim değerlerinde aşağı doğru yönelimi bize Şekil 4.21’de görüleceği üzere seri direnç varlığını belirtmektedir.

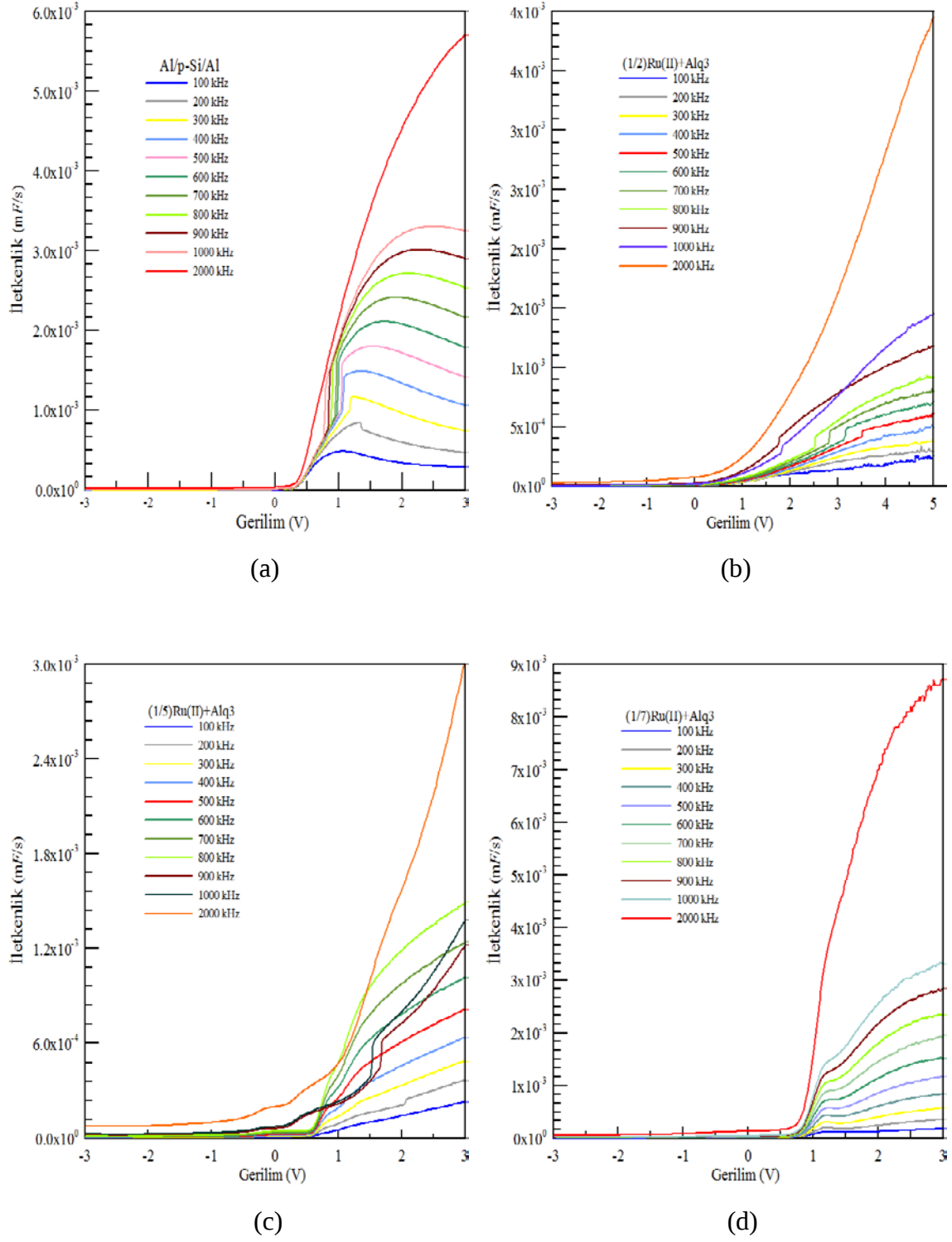
Diyot arayüzey halleri küçük frekanslarda AC sinyali takip edebilmektedir, böylece diyotun kapasitans değerinde tükenim bölgesinde aktif rol almaktadır. Bu durumun aksine yüksek frekans durumlarında arayüzey halleri AC sinyali takip edememekte ve hem kapasite (C) hemde iletkenlik (G/w) değerlerine bir katkıda bulunamazlar (Kar and Dahlke 1972). Bütün bunların yanında hem kapasite hemde iletkenlik grafiklerinde gözlemleneceği üzerine, düşük gerilim değerleri dikkate alındığında uygulanan AC sinyalinin kayda değer değişiklikler meydana getirmediği gözlemlenilmektedir. Uygulanan gerilim arttıkça Şekil 4.20’de görüleceği üzere iletkenlik değerleri doğru beslem bölgesinde artış sergilemiş olup bu davranış C-V karakteristiği ile benzerlik göstermektedir. Alınan kapasite – iletkenlik – gerilim ölçümlerinde Denklem 1.59’dan faydalanılmış olup buradaki parametrelerde ‘A’ diyot alanını temsil etmektedir. Diyotun bir yalıtkan tabakaya sahip olmadığı ve yarıiletken düzgün bir katkı konsantrasyonuna sahip kabul edilir. Bu eşitliğe göre $1/C^2$ ’nin V_R ’e göre grafiğin eğrisi doğrusal olarak dikkate alınır ve eğimi bize katkı konsantrasyonunu belirlememize yardımcı olur.



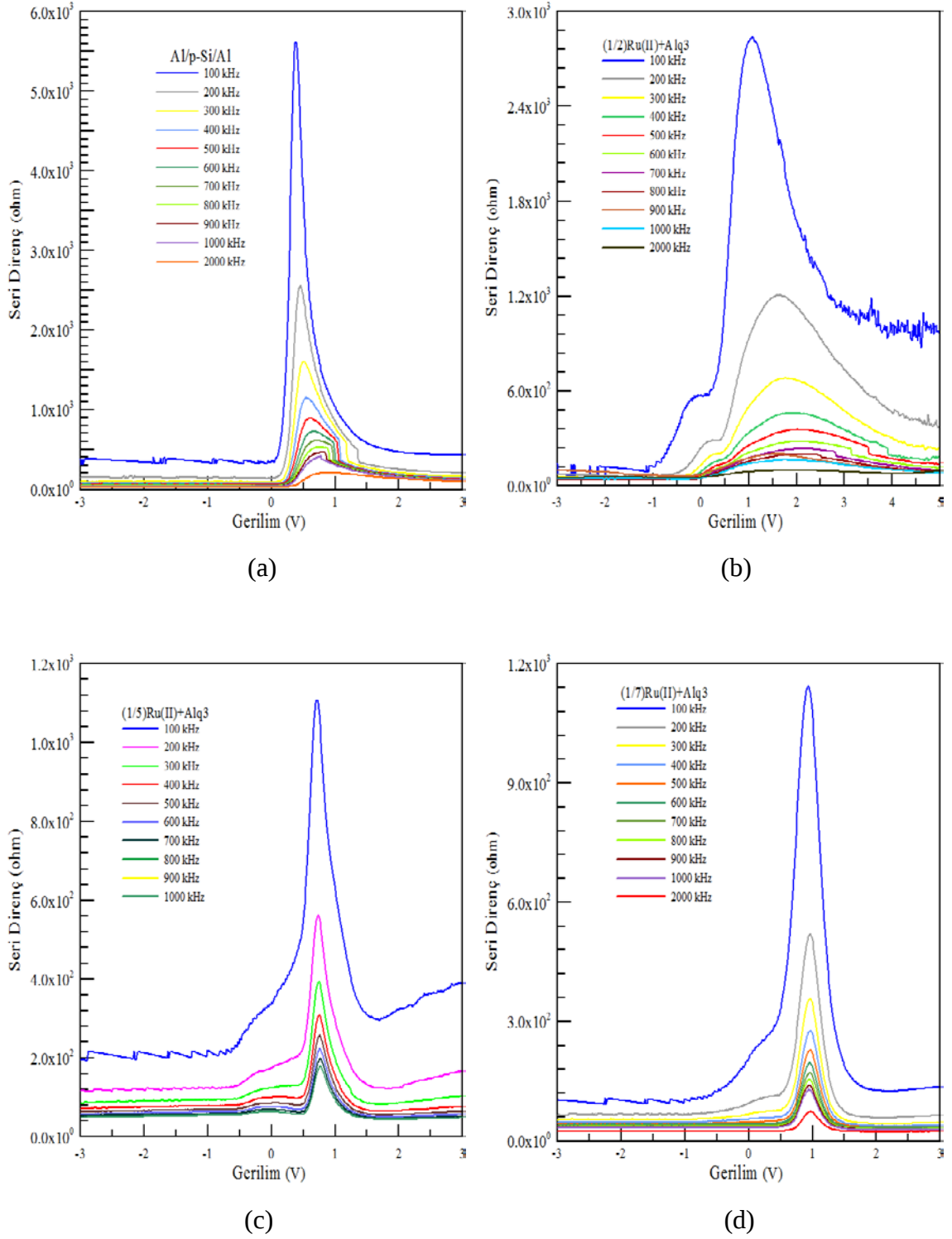
Şekil 4.18. Schottky kontaktların (-3,+3) volt ve (100-2000) kHz frekans aralığında elde edilen C-V grafiği
a) Referans Al/p-Si/Al numunesi b) (1/2)Ru(II)+Alq₃ numunesi c) (1/5)Ru(II)+Alq₃ numunesi d) (1/7)Ru(II)+Alq₃ numunesi



Şekil 4.19. Schottky kontakların (-3,+3) volt ve (100-2000) kHz frekans aralığında elde edilen C^2 -V grafiği
a) Referans Al/p-Si/Al numunesi b) (1/2)Ru(II)+Alq₃ numunesi c) (1/5)Ru(II)+Alq₃ numunesi d) (1/7)Ru(II)+Alq₃ numunesi



Şekil 4.20. Schottky kontaktların (-3,+3) volt ve (100-2000) kHz frekans aralığında elde edilen G/w -V grafiği
a) Referans Al/p-Si/Al numunesi b) $(1/2)\text{Ru(II)}+\text{Alq}_3$ numunesi c) $(1/5)\text{Ru(II)}+\text{Alq}_3$ numunesi d) $(1/7)\text{Ru(II)}+\text{Alq}_3$ numunesi



Şekil 4.21. Schottky kontaktların (-3,+3) volt ve (100-2000) kHz frekans aralığında elde edilen R_s -V grafiği
a) Referans Al/p-Si/Al numunesi b) $(1/2)\text{Ru(II)}+\text{Alq}_3$ numunesi c) $(1/5)\text{Ru(II)}+\text{Alq}_3$ numunesi d) $(1/7)\text{Ru(II)}+\text{Alq}_3$ numunesi

Değişen frekans gerilim değerlerinde diyot karakteristikleri Tablo 4.6-7-8-9'da;

Tablo 4.6. Al/p-Si/Al Schottky diyotun Frekans – İletkenlik – Gerilim ölçümlerinden elde edilen diyot parametreleri

Frekans (kHz)	Ln (f)	V ₀ (V)	N _A (cm ⁻³) x10 ¹⁴	V _D (eV)	E _f (eV)	E _m (V/cm) x10 ³	Φ _B (eV)	W _D (cm) x10 ⁻⁴
100	11,51	0,964	5,28	0,989	0,281	7,679	1,270	2,54
200	12,20	0,955	5,19	0,980	0,282	7,578	1,262	2,55
300	12,61	0,966	5,22	0,991	0,282	7,650	1,273	2,56
400	12,89	0,962	5,19	0,987	0,282	7,609	1,268	2,56
500	13,12	0,964	5,20	0,989	0,282	7,620	1,271	2,56
600	13,30	0,951	5,13	0,976	0,282	7,523	1,259	2,56
700	13,45	0,960	5,16	0,985	0,282	7,580	1,267	2,57
800	13,59	0,961	5,16	0,986	0,282	7,580	1,268	2,57
900	13,71	0,960	5,14	0,985	0,282	7,564	1,267	2,57
1000	13,81	0,958	5,13	0,983	0,282	7,548	1,266	2,57
2000	14,50	0,962	5,05	0,987	0,283	7,502	1,270	2,60

Tablo 4.7. Al/(1/2)Ru(II)+Alq₃/p-Si/Al Schottky diyotun Frekans – İletkenlik – Gerilim ölçümlerinden elde edilen diyot parametreleri

Frekans (kHz)	Ln (f)	V ₀ (V)	N _A (cm ⁻³) x10 ¹⁴	V _D (eV)	E _f (eV)	E _m (V/cm) x10 ³	Φ _B (eV)	W _D (cm) x10 ⁻⁴
100	11,513	0,773	8,05	0,798	0,271	8,522	1,070	1,84
200	12,206	0,745	7,08	0,770	0,274	7,848	1,045	1,93
300	12,612	0,719	6,78	0,744	0,275	7,549	1,020	1,94
400	12,899	0,733	6,75	0,758	0,275	7,603	1,034	1,96
500	13,122	0,735	6,69	0,760	0,275	7,581	1,036	1,97
600	13,305	0,759	6,70	0,784	0,275	7,703	1,060	2,00
700	13,459	0,774	6,75	0,799	0,275	7,805	1,075	2,01
800	13,592	0,786	6,74	0,811	0,275	7,856	1,087	2,03
900	13,710	0,811	7,16	0,836	0,274	8,225	1,110	2,00
1000	13,816	0,813	7,16	0,838	0,274	8,235	1,112	2,00
2000	14,509	0,817	7,16	0,842	0,274	8,255	1,116	2,01

Tablo 4.8. Al/(1/5)Ru(II)+Alq₃/p-Si/Al Schottky diyotun Frekans – İletkenlik – Gerilim ölçümlerinden elde edilen diyot parametreleri

Frekans (kHz)	Ln (f)	V ₀ (V)	N _A (cm ⁻³) x10 ¹⁵	V _D (eV)	E _f (eV)	E _m (V/cm) x10 ⁴	Φ _B (eV)	W _D (cm) x10 ⁻⁴
100	11,51	0,686	1,62	0,711	0,236	2,88	2,322	1,44
200	12,20	0,792	1,76	0,817	0,236	2,94	2,402	1,46
300	12,61	0,824	1,78	0,849	0,236	2,98	2,452	1,48
400	12,89	0,842	1,79	0,867	0,236	3,00	2,477	1,48
500	13,12	0,856	1,79	0,881	0,236	3,01	2,497	1,49
600	13,30	0,868	1,80	0,893	0,236	3,02	2,512	1,50
700	13,45	0,878	1,80	0,903	0,236	3,04	2,532	1,50
800	13,59	0,891	1,80	0,916	0,236	3,05	2,551	1,51
900	13,71	0,787	1,69	0,812	0,235	2,96	2,467	1,50
1000	13,81	0,793	1,69	0,818	0,235	2,96	2,477	1,50
2000	14,50	0,770	1,67	0,795	0,235	2,97	2,544	1,54

Tablo 4.9. Al/(1/7)Ru(II)+Alq₃/p-Si/Al Schottky diyotun Frekans – İletkenlik – Gerilim ölçümlerinden elde edilen diyot parametreleri

Frekans (kHz)	Ln (f)	V ₀ (V)	N _A (cm ⁻³) 10 ¹⁵	V _D (V)	E _f (eV)	E _m (V/cm) 10 ⁴	Φ _B (eV)	W _D 10 ⁻⁴
100	11,51	0,884	3,30	0,909	0,234	1,840	1,144	0,97
200	12,20	0,901	3,11	0,926	0,236	1,803	1,162	1,01
300	12,61	0,924	3,13	0,949	0,235	1,832	1,186	1,02
400	12,89	0,939	3,14	0,964	0,235	1,850	1,201	1,03
500	13,12	0,949	3,15	0,974	0,235	1,863	1,210	1,03
600	13,30	0,981	3,24	1,006	0,235	1,919	1,242	1,04
700	13,45	0,965	3,18	0,990	0,235	1,884	1,226	1,04
800	13,59	0,965	3,17	0,990	0,235	1,882	1,226	1,04
900	13,71	0,976	3,19	1,001	0,235	1,899	1,237	1,04
1000	13,81	0,984	3,20	1,009	0,235	1,910	1,245	1,04
2000	14,50	0,996	3,12	1,021	0,236	1,895	1,257	1,06

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada yarıiletken malzeme olarak hol bakımından zenginleştirilmesi için P/Boron katkılı p-tipi Si, 100 yönelimine sahip , 525 ± 25 μm kalınlıklı, $1-10 \Omega \text{ cm}$ öz dirençli özelliklere sahip Si kristali alınarak bu malzeme üzerine biri arayüzeyli olmak üzere dört adet schottky diyot yapılarak akım iletim mekanizmaları incelendi. Arayüzey olarak Ru(II) kompleksi ve Alq₃ organik molekül malzemeleri kullanılarak malzeme karakterizasyonunun tam olarak anlaşılabilmesi için Ru(II) kompleksi sabit tutularak Alq₃ kompleksinin miktarı artırıldı. Malzeme miktarı olarak Ru(II) kompleksimiz 10 mg'da sabit tutularak artan oranlarda 20 mg - 50 mg - 70 mg şeklinde Alq₃ kompleksimiz eklendi. Komplekslerin arayüzey filmi için solüsyon haline getirilmesinde oda sıcaklığında buharlaşma ve malzeme karakterizasyonunda bir değişim meydana getirmeme gibi etkileride gözönünde bulundurularak kloroform ve etanol kullanılmıştır. Hazırlanan solisyonlar UV cihazında optik karakterizasyonları yapılarak madde miktarı değişmeksizin en iyi abzorban pik değerleri gözetilerek çözücü ve seyreltici eklenmiştir. Elde edilen solisyonların yüzey morfolojisi SEM ve AFM cihazlarında incelenmiştir. UV, SEM ve AFM analizleri komplekslerimizin yapı itibarıyla literatürde verilen değerlere uygun olduğu tesbit edildi ve malzemelerin fotodiyot diyot karakteristikleri incelemeye alınmıştır.

Fabrikasyonu yapılan referans ve organik arayüzey malzemeli diyotların hepsi sabit bir gerilim aralığında ve aynı koşullarda ışığa - sıcaklığa ve frekansa bağlı akım iletim analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçların yarı logaritmik I-V, I-V-T, C-V ve $1/C^2$ grafiklerinden diyot parametreleri TE, Norde ve Cheung fonksiyonları ve Poisson denklemleri yardımı ile hesaplanmış olup literatürde karşılığı araştırılmıştır.

Malzemelerin optiksel olarak UV cihazında yapılan analizlerde 267-279 nm aralığında verilen tepki Ru(II) kompleksimize atfedilmiş olup, 383-388 nm aralığında verilen tepkiyide Alq₃ molekülüne atfedilmiştir (Jung et al. 2012, Pawal et al. 2017).

Arayüzey filimlerinin SEM ve AFM yüzey görüntüleri incelendiğinde kompleks malzemelerin film imalatında kullanılan çözücü ve seyreltici değişkenlerinin yaratacağı etkide göz önünde bulundurularak yüzey morfolojisinin daha önce yapılan araştırmalarla birebir olmamakla, düzensiz ve parçacık görünümünde olup küresel ve halkalı boyutta biçimlendiği gözlemlenmiştir (Sevgili 2020).

Oda sıcaklığında ve karanlık ortamda yapılan ölçümler sonucu hazırlanan diyotlarımızın bariyer yüksekliği ve idealite değerleri hesaplanılmış olup, teorik olarak bilinen ideal diyot değeri olan $n=1$ idealite değerine en yakın diyotumuzun referans olarak yapılan diyot olduğu tesbit edilmiştir.

Odasıcaklığında karanlık ve ışık şiddeti altında alınan ölçümlerde referans ve organik arayüzeyli diyotlarımızın güneş enerjisi verimliliği incelendiğinde organik film katmanlı diyotumuzun ışık altında ' η ' verimliliği referans numunemize göre azaldığı fakat ters beslem bölgesinde ışık şiddetinin artmasıyla sızıntı akımı olarak nitelendirebileceğimiz akımın arttığı gözlemlenmiştir.

Sıcaklığa bağlı yapılan ölçümlerde referans ve organik arayüzeyli diyot yapılarımızın idealite ve engel yükseklikleri akım-gerilim grafiklerimizin eğimlerinden hesaplanmış olup fabrikasyonu yapılan tüm diyotlar için $n>1$ olarak hesaplanmıştır. Deneysel yöntemlerde idealite faktörünün 1'den büyük olmasının metal-yarıiletken arayüzeyinde arayüzey yükleri ve yüzey oksit tabakası durumlarına atfedilmiştir (Sağlam vd. 2004). TE, Cheung ve Norde akım iletim bölgelerinde gerilim ve sıcaklığın artmasıyla $\ln I-V$ eğrilerinin doğrusallıktan ayrılarak doyuma gittiği gözlemlenilmektedir. Yapıda meydana gelen bu durum seri direnç etkisine atfedilir çünkü, seri direnç ohm kanununa göre diyottan geçen akım miktarını sınırlandırmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda TE bölgesi ya da bir başka değişle lineer bölge olarak adlandırılan kısımlar incelendiğinde, sıcaklığın azalması ile lineer bölgede kaymalar olduğu gözlemlenilmiştir, bu durum sıcaklık azaldıkça yapıda idealite faktörünün artması ve ters oranda engel yüksekliğinin azalması, engel yüksekliğinin homojen olmama durumlarına atfedilmiş olup, yapıda anormal ve istenmeyen bazı akımların olduğunu göstermektedir (Yıldırım 2009).

Diyotların Şekil 4.18 C-V ve Şekil 4.20 G/w-V ölçümlerinde görüldüğü üzere, negatif voltaj aralığında, kapasitans ve iletkenlik değerleri değişen frekanslarda herhangi bir değişiklik göstermez iken, pozitif voltaj aralığında, her ikisi de frekanstan güçlü bir şekilde etkilendiği tesbit edilmiştir. Diyot üzerine uygulanan voltajdaki artış, frekansı takip eden diyot iletkenlik değeri ile daha da artmış, fakat bir süre sonra artan tepkiyi kaybetmiş ve yüksek voltajlarda neredeyse sabit bir şekilde ilerlemiştir. Şekil 4.21 incelendiğinde kapasite ve iletkenlikte meydana gelen bu tepkilere karşılık diyot seri direncinin değişim bölgelerinde tepki verdiği tesbit edilmiştir.

Yüksek frekans değerleri diyot arayüzeyinde arayüzey taşıyıcı sayısının artmasına sebep olmuştur. Fakat artan voltaj değerlerinde bu artış sürekliliğini kaybetmiş, akım iletiminde rol alan elektron hol çiftleri bu duruma eşlik edememiştir. Arayüzeyde kullanılan kompleks malzemelerimizin referans numunesine göre bu artışa daha düşük bir tepki verdiği anlaşılmıştır. Bu durum kompleks yapı içerisinde safsızlık atomları, tuzaklar ve arayüzey durumlarının yoğunluk farklılığına atfedilmiştir (Sarılmaz 2019). Daha önce yapılan Ru(II) ve Alq₃ çalışmalarına ek olarak iki malzeme aynı anda kullanılarak aygıtların performansları değerlendirilmiş olup belli oranlarda oluşturulan bileşimlerin daha iyi fotodiyot özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Deneysel olarak elde edilen bu sonuçlar MPS yapılarda bu malzemelerin optoelektronik ve fotodiyot uygulamalarını geliştirmede kullanılabileceği öngörüsünü vermiştir.

KAYNAKLAR

Alialy S, Altindal Ş, Tanrikulu EE, Yildiz DE (2014) Analysis of temperature dependent current-conduction mechanisms in Au/ TiO₂/ n-4H -SiC (metal/ insulator/ semiconductor) type Schottky barrier diodes. Journal of Applied Physics. American Institute of Physics Inc 116(8)

Aydoğan Ş, Sağlam M, Türüt A (2005) Characterization of capacitance-frequency features of Sn/polypyrrole/n-Si structure as a function of temperature. Polymer. Elsevier BV 46(16): 6148–6153

Aydoğan Ş, Sağlam M, Türüt A (2005) Current-voltage and capacitance-voltage characteristics of polypyrrole/p-InP structure. Vacuum 77(3): 269–274

Aydoğan Ş (2011) Katıhal Fiziği. Nobel yayınları 112(69): 451-453

Bardeen J (1947) Surface states and rectification at a metal semi-conductor contact. Physical Review 71(10): 717–727

Barret C, Vapaille A (1979) Interface states in a cleaved M-S junction. J. Appl phys. 50(6): 4217-4222

Bethe HA (1942) Theory of the boundary layer of crystal rectifiers, MIT Radiation Laboratory Report

Bornside DE, Macosko CW, Scriven LE (1987) On Modeling of Spin Coating, Journal of Imaging Technology 13 p. 122-129

Braun M, Gmeiner J, Tzolov M, Coelle M, Meyer FD, Milius, W, Brütting W (2001) A new crystalline phase of the electroluminescent material tris(8-hydroxyquinoline) aluminum exhibiting blueshifted fluorescence. Journal of Chemical Physics 114(21): 9625-9632

Braun F (1875) Über die Stromleitung durch Schweflmetalle. Annalen der Physik, 229(12): 556–563

Brillson LJ (1993) Contactsto semiconductors. Noyes Publications, New Jersey p. 127-139

Card HC, Rhoderick EH (1971) Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. Journal of Physics D: Applied Physics 4(10): 1589–1601

Chand S, Kumar J (1995) Current-voltage characteristics and barrier parameters of Pd 2Si/p-Si(111) Schottky diodes in a wide temperature range. *Semiconductor Science and Technology* 10(12): 1680–1688

Cheung SK, Cheung NW (1986) Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters* 49(2): 85–87

Colle M, Gmeiner J, Milius W, Hillebrecht H, Brutting W (2003) Preparation and characterization of blue-luminescent tris(8-hydroxyquinoline) aluminum (Alq₃). *Advanced Functional Materials* 13(2): 108–112

Cowley AM, Sze SM (1965) Surface states and barrier height of metal-semiconductor systems. *Journal of Applied Physics* 36(10): 3212–3220

Dediu V, Hueso LE, Bergenti I, Riminucci A, Borgatti F, Graziosi P, Newby C, Casoli F, De Jong MP, Taliani C, Zhan Y (2008) Room-temperature spintronic effects in Alq₃-based hybrid devices. *Physical Review B* 78: 115203

Doğan H, Yıldırım N, Orak İ (2017) Photovoltaic and Electrical Properties of Al/Ruthenium (II)-complex / p-Si Photodiode. *Cumhuriyet Science Journal* 38(2): 329–329

Forrest SR, Schmidt PH (1986) Semiconductor analysis using organic-on inorganic contact barriers. 1. Theory of the effects of surface state on diode potential and admittance, *J. Appl. Phys* 59(2): 513-525

Ghandhi SK (1983) *VLSI Fabrication Principles*. John Wiley & Sons, New York p. 401-405

Grundmann M (2016) *The Physics of Semiconductors: An Introduction Including Nanophysics and Applications*, 3rd ed., Springer International Publishing, Cham, Switzerland p. 264-272

Gupta RK, Singh RA (2005) Fabrication and characteristics of Schottky diode based on composite organics semiconductor. *Composites and Science and Technology* 65(3): 677-681

Güllü Ö, Asubay S, Aydoğan Ş, Türüt A (2010) Electrical characterization of the Al/new fuchsin/n-Si organic-modified device. *Physica E* 42(5): 1411-1416

Holloway PH, Kim TJ, Trexler JT, Miller S, Fijol JJ, Lampert WV, Haas TW (1997) Interfacial reactions in the formation of ohmic contacts to wide bandgap semiconductors. *Applied Surface Science*. Elsevier 117–118: 362–372

Huang W, Wang L, Tanaka H, Ogawa T (2009) Spectral, Structural, and Computational Studies of a New Family of Ruthenium(II) Complexes Containing Substituted 1,10-Phenanthroline Ligands and in situ Electropolymerization of a Phenanthrolineruthenium(II) Complex Bridging Nanogap Gold Electrodes. *European Journal of Inorganic Chemistry* (10): 1321–1330

- Jung J, Lee J, Woo J, Seo MR, Hyun SK, Lee J, Wook S (2012) Luminescence variation of organic Alq₃ nanoparticles on surface of Au nanoparticles and graphene. *Synthetic Metals*. Elsevier BV 162(21–22): 1852–1857
- Kar S, Dahlke WE (1972) Interface states in MOS structures with 20-40 Å thick SiO₂ films on nondegenerate Si. *Solid State Electronics* 15(2): 221–237
- Karabulut A, Orak i, Canlı S, Yıldırım N, Türüt A (2018) Temperature-dependent electrical characteristics of Alq₃/p-Si heterojunction. *Physica B: Condensed Matter*. Elsevier BV 550: 68–74
- Karataş Ş, Altındal Ş (2004) ideal olmayan Schottky diyotların temel parametrelerinin akım-voltaj karakteristiklerinden hesaplanması. *KSÜ. Fen ve Mühendislik Dergisi* 7(2): 20-25
- Kratas S, Altındal S (2005) Zn/p-Si Schottky diyotlarda temel elektriksel parametrelerin sıcaklığa bağlı incelenmesi. *KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi* 8(1): 26-30
- Laeri F, Schüth F, Simon U, Wark M (Editors) (2003) *Host-Guest-Systems Based on Nanoporous Crystals*. Weinheim: Wiley 145:160:436
- Lehovec K, Slobodskoy A (1963) Field Effect-Capacitance Analysis of Surface States on Silicon. *Physica Status Solidi A* 3(3): 447–464
- Maril E, Altındal Ş, Kaya A, Koçyiğit S, Uslu İ (2015) On Double Exponential Forward Bias Current-Voltage (I-V) Characteristics of Au/Ca₃CO₄Ga_{0,001}Ox/n-Si/Au (MS) Type Structures in Temperature Range of 80-340 K. *Philosophical Magazine* 95(10) 1049-1068
- Moll JL (1959) Variable Capacitance with Large Capacity Change. *IRE Wescon Convention Record* 3: 32–36
- Mori T, Fujikawa H, Tokito S, Taga Y (1998) Electronic structure of 8-hydroxyquinoline aluminum/LiF/Al interface for organic electroluminescent device studied by ultraviolet photoelectron spectroscopy. *Applied Physics Letters* 73(19): 2763–2765
- Neamen DA (1992) *Semiconductors Physics and Devices*, R.R. Donnelley & Sons Company, Sydney p. 163-169
- Neamen DA (1997) *Semiconductor Physics and Devices* 2nd ed. Mc Graw-Hill, New York, USA p. 420-450, 517-523
- Nicollian EH, Brews JR (1982) *MOS Physics and Technology*. John Wiley & Sons. New York, USA (40): 175, 222-226, 423-439
- Norde H (1979) A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics* 50(7): 5052-5053

Okur S, Yakuphanoglu F, Özsöz M, Kadayıfçılar PK (2009) Electrical and interface properties of Au/DNA/n-Si organic-on-inorganic structures. *Microelectronic Engineering* 86(11): 2305-2311

Onnes HK (1911) Disappearance of the electrical resistance of mercury of helium temperature. *Akad. Van Wetenschappen* p. 113-115

Orak İ (2016) The performances photodiode and diode of ZnO thin film by atomic layer deposition technique. *Solid State Commun* 247: 17–22

Pawal SB, Lolage SR, Chavan SS (2017) Heterometallic Cu(I)/Ru(II) halide and pseudohalide hybrid complexes composed of coordination and organometallic sites: Synthesis, spectroscopic characterization, electrochemical and luminescence properties. *Polyhedron. Elsevier* 128:112–120

Perlin J (2002) *From Space to Earth: The Story of Solar Electricity*. Cambridge: Harvard University Press 17

Reddy VR., Reddy YM, Padmasuvarna R, Narasappa TL (2015) Ru/Ti Schottky Contacts on N-type In-P (100): Temperature Dependence of Current-Voltage (I-V) Characteristics. *Procedia Materials Science* 10: 666–672

Rhoderick EH, Williams RH (1988) *Metal-Semiconductor Contacts*, 2nd ed., Oxford University Press London p 152-164

Rideout VL (1978) A review of the theory, technology and applications of metalsemiconductor rectifiers *Thin Solid Films* 48(3): 261-291

Round HJ (1907) A Note on Carborundum. *Electrical World* 19:309

Sağlam M, Biber M, Çakar M, Türüt A (2004) The effects of the ageing on the characteristic parameters of polyaniline/p-type Si/Al structure. *Appl. Surf Sci* 230: 404–410

Sarilmaz A, Ozel F, Karabulut A, Orak İ, Şahinkaya MA (2019) The effects of temperature and frequency changes on the electrical characteristics of hot-injected Cu₂MnSnS₄ chalcogenide-based heterojunction. *Physica B: Condensed Matter. Elsevier* BV 571:411821

Sevgili O, Akman F, Orak İ, Karabulut A (2020) Characterization of aluminum 8-hydroxyquinoline microbelts and microdots, and photodiode applications. *Journal of Physics and Chemistry of Solids. Elsevier* 136:109128

Schottky W (1938) Halbleitertheorie der Sperrschicht, *Naturwissenschaften*. 26: 843

Schottky W, Spenke E (1939) Quantitative treatment of the space charge and boundary-layer theory of the crystal rectifier, *Wissenschaftliche Veröffentlichungen Aus Dem Siemens Konzern* 18: 225–291

Sharma BL (1984) Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications. Plenum Press, 1-3 p New York, USA

Singh A (1985) Characterization of interface states at Ni/nCdF₂ Schottky barrier type diodes and the effect of CdF₂ surface preparation. Solid state electron 28(3): 223-232

Soylu M, Orak I, Dayan O, Serbetci Z (2015) A novel photodiode based on Ruthenium(II) complex containing polydentate pyridine as photocatalyst. Microelectronics Reliability 55: 2685-2688

Shockley W (1950) Holes and electrons. Physics Today 3(10): 16–24

Sze SM (1981)(a) Metal-Semiconductor Contacts. Physics of Semiconductor Devices 2nd ed. John Wiley & Sons New York 250-270

Sze SM (1981)(b) Physics of Semiconductor Devices 2nd ed. John Wiley & Sons, New York 245-300, 362-390

Sze SM, Kwok KNg (2007)(a). Metal-Semiconductor Contacts. Physics of Semiconductor Devices 3rd. Ed. Hoboken, New Jersey, : Ed: John Wiley & Sons Inc p 197-200

Sze SM, Kwok KN (2007)(b) Physics of semiconductor devices. New Jersey : John Wiley & Sons Interscience p 815

Tan SO (2018) Schottky yapılar üzerine inceleme ve analiz çalışması. Politeknik Dergisi 21(4): 977-989

Taşcıoğlu İ, Aydemir U, Altındal Ş (2010) The Explanation of Barrier Height Inhomogeneities in Au/n-Si Schottky Barrier Diodes (SBDs) with organic thin interfacial layer. Journal of Applied Physics 8(6): 064506-064511

Tataroglu A, Ocaa R, Dere A, Daya O (2018) Ruthenium(II) Complex Based Photodiode for Organic Electronic Applications. Journal of Electronic Materials. Springer New York LLC 47(1): 828–833

Tataroğlu A, Altındal Ş (2006) Characterization of current-voltage (I-V) and capacitance-voltage-frequency (C-V-f) features of Al/SiO₂/p-Si (MIS) Schottky diodes. Microelectronic Engineering 83(3): 582–588

Terman LM (1962) An Investigation of Surface States at a Silicon/Silicon Oxide Interface Employing Metal-Oxide-Silicon Diodes. Solid State Electronics 5 (5): 259-285–299

Tung RT (1992) Electron transport at metal-semiconductor interfaces physical review b. 45(23): 509-522

Ulukan P (2017) Organik ışık yayan diodlar ve güneş pili uygulamaları için tiyenotiyofen ve bor türevli moleküllerin sentezi ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü s. 52-63

- Wagner C (1931) Theory of Current Rectifiers, *Physikalische Zeitschrift* 32: 641–645
- Wilson AN (1983) Stress and Stability in Coal Ribside and Pillars. West Wirigina Üniv. Wirigina 831145
- Wilson AH (1931) The theory of Electronic Semi-Conductors *Proc. Roy. Soc. London* A133- 458
- Yahia IS, Farag A, Yakuphanoglu F, Farooq WA (2011) Temperature dependence of electronic parameters of organic Schottky diode based on fluorescein sodium salt. *Synthetic Metals* 161(9): 881-887
- Yakuphanoglu F (2007) Electrical characterization and interface state density properties of the ITO/C70/Au Schottky Diode. *J. Phys. Chem C*. 111(3): 1505-1507
- Yakuphanoglu F, Okur S (2010) Analysis of electronic parameters and interface states of boron dispersed triethenolemine/p-Si structure by AFM, I-V, C-V-f and G/w-V-f techniques, *Mikroelektronik Engineering* 87(1): 30-34
- Yam VWW, Chu BWK, Ko CC, Cheung KK (2001) *Chem Soc. Dalton Trans.* 12 p. 1911
- Yıldırım N (2009) Saçtırma Yöntemiyle Hazırlanan Ni/n-GaAsschottky engel diyotların karakteristik parametrelerinin tavlama ve numune sıcaklığına bağlı değişimleri. *Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* s. 72-74
- Zawadzka A, Plociennik P, Strzelecki, J, Lukasiak Z, Sahraoui B (2013) Photophysical properties of Alq₃ thin films. *Optical Materials* 36(1): 91–97

ÖZGEÇMİŞ

Kahramanmaraş’da 1983 yılında doğdu. İlk ve Ortaöğretim eğitimini İskenderun Demir Çelik Fab. (İSDEMİR) Lojmanlarında tamamladı. 2001 yılında İnönü Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde Lisans öğrenimine başladı. 2014 yılında Mustafa Kemal Üniversitesi Pedagojik Formasyon eğitimini tamamladı. 2017 yılında Bingöl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans eğitime başladı.