

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

**SİLİSYUM TABANLI Alq_3 ARAYÜZEYLİ FOTODİYOTLARIN ELEKTRİKSEL
VE OPTİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SERDAL CANLI

FİZİK ANABİLİM DALI

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

BİNGÖL-2018

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİLİSYUM TABANLI Alq₃ ARAYÜZEYLİ FOTODİYOTLARIN
ELEKTRİKSEL VE OPTİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

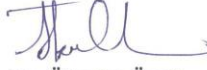
Serdal CANLI

Enstitü Anabilim Dalı : FİZİK

Bu tez 07.09.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr.
Nezir YILDIRIM
Üye


Dr. Öğretim Üyesi
Adem KOÇYİĞİT
Üye


Dr. Öğretim Üyesi
İkram ORAK
Üye

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Doç. Dr. Zafer ŞİAR
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bilimin ve bilimsel bilginin öneminin arttığı çağımızda, bilime katkıda bulunmama vesile olan, bu tez çalışmasının hazırlanmasında manevi desteklerini, bilgi ve birikimlerini esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Nezir YILDIRIM'a teşekkürü borç bilir, saygı ve şükranlarımı sunarım.

Laboratuvar çalışmalarım sırasında, numunelerin hazırlanmasında ve ölçümlerin alınması esnasında yardımlarını ve kıymetli bilgilerini benden esirgemeyen Öğretim Görevlisi Sayın Ömer SEVGİLİ ve Dr. Öğr. Üyesi Sayın İkrım ORAK'a çok teşekkür ederim.

Bu çalışmanın uygulamasının yapıldığı Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezi personellerine gösterdikleri ilgi ve alakadan dolayı teşekkür ederim.

Tez çalışmaları sırasında desteklerinden dolayı İnşaat Mühendisi Recep YALÇIN'a teşekkür ederim.

Çalışmamın hazırlanmasında bana her türlü desteği veren anneme, eşime ve çocuklarıma minnet ve şükranlarımı sunuyorum.

Serdal CANLI

Haziran 2018

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	4
3. KURAMSAL TEMELLER	9
3.1. Metal-Yarıiletken Kontaklar	9
3.1.1. Giriş	9
3.1.2. Metal p-tipi Yarıiletken Doğrultucu (Schottky) Kontaklar	10
3.1.3. Metal p-Tipi Yarıiletken Omik Kontaklar	12
3.1.4. Metal-Organik Yarıiletken-Metal Yapısı.....	13
3.1.5. Schottky Diyotlarda Termoiyonik Emisyonla Akım İletimi	14
3.2. Fotovoltaik Aygıtların Karakterizasyonu.....	17
4. MATERYAL VE YÖNTEM	20
4.1. Tris-(8-hydroxyquinoline) Alüminyum Molekülü.....	20
4.2. p-Si Kristalinin Temizlenmesi	21
4.3. Referans ve Organik Arayüzey Malzemelerin Fabrikasyonu	21
4.4. Elektriksel Ölçüm	23
4.5. Kristal Analiz Yöntemleri	24

4.5.1 Taramalı Elektron Mikroskobu.....	24
4.5.2. X-Işınları Kullanılarak Enerji Ayırmalı Analiz (EDX).....	25
4.5.3. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM).....	25
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	27
5.1. UV-Görünür Bölge Absorbsiyon Spektrumları	27
5.2. Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri	28
5.3. Atomik Kuvvet Mikroskobu Görüntüleri	30
5.4. Akım-Gerilim Ölçümleri ve Diyot Parametrelerinin Hesaplanması.....	31
5.4.1. Sıcaklığa Bağlı Parametreler	34
5.4.2. Fotovoltaik Ölçümler	36
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	39
KAYNAKLAR	41
ÖZGEÇMİŞ	47

SİMGELER VE KISALTMALAR

A	: Diyotun kontak alanı
A^*	: Richardson sabiti
e^-	: Elektron yükü
h^+	: Boşluk
eV	: Elektron volt
Φ_s	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu (eV)
Φ_m	: Metalin iş fonksiyonu (eV)
Φ_b	: Engel yüksekliği (eV)
k	: Boltzman sabiti
I	: Akım (A)
J	: Akım yoğunluğu (A/cm ²)
J_0	: Ters beslem akım yoğunluğu (A/cm ²)
μ	: Mobilite (cm ² / V.s)
E_c	: İletim bandı minimum enerji seviyesi (eV)
E_v	: Valans bandı maksimum enerji seviyesi (eV)
E_F	: Fermi enerjisi (eV)
E_g	: Yasak enerji aralığı (eV)
E_s	: Yarıiletkenin dolu bandının vakum seviyesi altındaki derinliği
ϵ_0	: Boşluğun dielektrik sabiti
χ_s	: Yarıiletkenin elektron ilgisi
T	: Mutlak sıcaklık (K)
$g_c(E)$	: İletkenlik bandındaki hal yoğunluğu
I_0	: Ters doyma akımı (A)
m	: Serbest elektronun kütlesi
m_n^*	: Elektronun etkin kütlesi
n	: İdealite faktörü
K	: Kelvin

P	: Güç (Watt)
FF	: Doldurma faktörü (%)
V _{oc}	: Açık devre voltajı (V)
I _{sc}	: Kısa devre akımı (A)
V _d	:Difüzyon potansiyeli
Alq ₃	: Tris-(8-hydroxyquinoline) alüminyum
ETL	: Electron Transfer Layer (Elektron taşıma tabakası)
EML	: Emission Layer (Emisyon tabakası)
EL	: Elektrolüminans
HOMO	: En yüksek enerjili dolu moleküler orbital
LUMO	: En düşük enerjili boş moleküler orbital
MIS	: Metal/yalıtkan/yarıiletken
MS	: Metal/yarıiletken
TE	: Termiyonik emisyon
I-V	: Akım-voltaj

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	Metal p-tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontakın Enerji Bant Diyagramı.....	11
Şekil 3.2.	$\Phi_m > \Phi_s$ durumu için metal/p-tipi yarıiletken kontakın enerji-bant diyagramı kontakdan sonra ısısal dengede	12
Şekil 3.3.	Metal/p-tipi yarıiletken omik kontakta ait enerji bant diyagramı a) ters beslem altında ($V > 0$) b) doğru beslem altında ($V < 0$)	13
Şekil 3.4.	Düz beslem altındaki metal yarıiletken Schottky kontaktaki imaj azalma etkisine ait enerji–band diyagramı	14
Şekil 3.5.	(a) Güneş piline ait eşdeğer devrenin gösterimi (b) diyot ve güneş piline ait akım-gerilim grafiği	18
Şekil 3.6.	Güneş piline ait akım-gerilim grafiği	19
Şekil 4.1.	Alq3’ün moleküler yapısı	20
Şekil 4.2.	a) Termal Buharlaştırma ve Sputter cihazı b) Spin coater cihazı	22
Şekil 4.3.	Al/Alq3/p-Si/Al diyotunun şematik gösterimi	23
Şekil 4.4.	Sıcaklığa bağlı ölçümlerin alındığı Kryostat Cihazı ve Sıcaklık Kontrol Ünitesi.....	24
Şekil 4.5.	AFM’nin basit şeması (Aydoğan,2011)	26
Şekil 5.1.	Alq3 organik tabakanın a) UV-görünür bölge spektrumu ve b) yasak enerji bant aralığı.....	27
Şekil 5.2.	a) Tanecikli yapıdan oluşan birbirine geçmiş kristal yapılar b) İçinde boşluklar barındıran çiçeksi kristal yapı c) Yüzeye dağılmış tanecikler d) 0.344µm, 0.748µm, 0.912µm boyutunda tanecikler	29
Şekil 5.3.	SEM’de görüntülenen elementlerin a) yüzeysel dağılımları ve b) yoğunluk oranları.....	30
Şekil 5.4.	Cam üzerine kaplanan Alq3 ince filminin a) 20µm ² ’lik alanda 1D ve 3D b) 40 µm ² ’lik alanda 1D ve 3D boyutlu AFM görüntüleri	31
Şekil 5.5.	Referans numunesi ve Al/Alq3/p-Si/Al diyot yapısının karanlık ortamda, oda sıcaklığında lnI-V grafiği.....	33

Şekil 5.6.	Al/Alq3/p-Si/Al diyot yapısının karanlık ortamda 80-320 K sıcaklık altında lnI-V grafiği.....	34
Şekil 5.7.	Referans numunesinin (Al/p-Si/Al) karanlık ve 30-100 mW/cm ² ışık şiddeti altında lnI-V grafiği	36
Şekil 5.8.	Al/Alq3/p-Si/Al diyot yapısının karanlık ve 30-100 mW/cm ² ışık şiddeti altında lnI-V grafiği	37

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 5.1.	Al/p-Si/Al ve Al/Alq3/p-Si/Al diyot yapılarının oda sıcaklığında hesaplanan engel yüksekliği ve idealite faktörü değerleri.....	34
Tablo 5.2.	Al/Alq3/p-Si/Al Schottky diyotlar için engel yüksekliği ve idealite faktörünün numune sıcaklığına göre değişimi	35
Tablo 5.3.	Al/p-Si/Al diyodunun 30-100 mW/cm ² ışık şiddeti altında lnI-V grafiğinden elde edilen I _{sc} , V _{oc} , I _{max} , V _{max} , Doluluk oranı (FF) ve Güneş enerji verimi değerleri	37
Tablo 5.4.	Al/Alq3/p-Si/Al diyodunun 30-100 mW/cm ² ışık şiddeti altında lnI-V grafiğinden elde edilen I _{sc} , V _{oc} , I _{max} , V _{max} , Doluluk oranı (FF) ve Güneş enerji verimi değerleri	38

SİLİSYUM TABANLI Alq₃ ARAYÜZEYLİ FOTODİYOTLARIN ELEKTRİKSEL VE OPTİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Alq₃ molekülünün diyot üzerindeki fotovoltaiik performansını anlayabilmek amacıyla termal buharlaştırma tekniğiyle Al/p-Si/Al (referans) ve Al/Alq₃/p-Si/Al diyot yapılarının fabrikasyonu yapıldı. Fabrikasyonu yapılan referans ve organik arayüzey malzemeli diyot yapılarının güneş simülatörü altında karanlıkta ve 30-100 mW/cm² arasında farklı ışık şiddetleri altında açık devre voltajı, kısa devre akımı, doluluk faktörü, güneş enerji verimi gibi fotovoltaiik parametreleri ölçüldü. Güneş simülatörü altında alınan ölçümlerden elde edilen sonuçlara göre referans ve organik arayüzeyli numuneler fotodiyot özellik gösterdiler. Bununla beraber Alq₃ molekülünün kullanıldığı organik arayüzey malzemeli fotodiyotun, aydınlatma şiddeti arttırıldıkça referans diyota kıyasla ters beslem bölgesindeki akımı daha fazla arttırdığı görüldü. Fabrikasyonu yapılan referans ve organik arayüzey malzemeli numunelerin karanlıkta I-V ölçümleri alınmış, yapılan bu ölçümlerden idealite faktörü ve engel yüksekliği hesaplanmıştır. Ayrıca organik arayüzey malzemeli numune için 80-320 K aralığında elektriksel ölçümlerden numune sıcaklığına bağlı karakteristik diyot parametreleri hesaplanmıştır. Oda sıcaklığında karanlıkta referans ve organik arayüzeyli diyotun engel yüksekliği ve idealite faktörü değerleri sırasıyla 0,79 eV, 1,61 ve 0,81 eV, 1,44 olarak hesaplandı. Organik arayüzeyli diyotun 80-320 K aralığında sıcaklık arttıkça engel yüksekliğinin arttığı, idealite faktörünün ise azaldığı görüldü. Kullanılan organik arayüzey malzemenin optik özellikleri ve yüzey morfolojisi UV, SEM ve AFM cihazları kullanılarak incelendi.

Anahtar Kelimeler: Organik arayüzey, Alq₃, termal buharlaştırma, idealite faktörü, engel yüksekliği, fotodiyot, yüzey morfolojisi.

INVESTIGATION OF ELECTRICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF Alq₃ INTERFACE PHOTODIODES SILICIUM BASED

ABSTRACT

The Al/p-Si/Al (reference) and Al/Alq₃/p-Si/Al diode structures were fabricated by thermal evaporation technique in order to understand the photovoltaic performance of Alq₃ molecule used as organic interface material on the diode. The fabricated reference and interfacial material with organic Alq₃ diode structures were measured under the solar simulator, and the photovoltaic parameters such as open circuit voltage, short circuit current, fillfactor and conversion efficiency under different light intensities between 30-100 mW/cm² were measured. According to the results obtained under solar simulator, the samples with reference and organic interface showed photodiode. However, it was observed that the photodiode with the organic interface material using the Alq₃ molecule caused to increase the current in the reverse bias region compared to the reference diode as the intensity of illumination was increased. The I-V measurements were collected under the dark for samples with reference and organic interface materials were employed to calculate ideality factors and barrier heights. In addition, the temperature dependent characteristic diode parameters were calculated from the electrical measurements in the 80-320 K range for the reference and organic interface material samples. . The barrier height and ideality factor values of the diode for reference and organic interface material sample in the dark at room temperature were calculated as 0.79 eV, 1.61 and 0.81 eV, 1.44, respectively. As the temperature increased in the from 80 to 320 K, the diode with the organic material interface, the barrier height values increased and the ideality factor values decreased. The optical properties and surface morphology of the organic interface material were investigated by using UV, SEM and AFM instruments.

Keyword: Organic interface, Alq₃, thermal evaporation, ideal factor, barrier height, photodiode, surface morphology.

1. GİRİŞ

Enerji ilk insanın yaratılmasıyla beraber hayatın önemli bir parçası olarak, tarihsel gelişim süreci boyunca önemini ve çeşitliliğini sürekli arttırarak, ihtiyacını hissettirmiştir. Son yüzyıl boyunca enerji kullanım alanlarının geniş bir alanı kapsamıyla, elektronik cihazların üretiminde yarıiletken teknolojisinin önemini arttırmıştır (Dinek 2006).

Yarıiletken malzemelerin elektriksel ve optiksel özelliklerinin araştırılması; güneş pilleri, alan etkili transistörler, organik ışık yayan diyotlar ve diğer elektronik ve optoelektronik cihazlar gibi kullanım yönünden birbirinden farklı olan teknolojilerin gelişimine zemin hazırlamıştır (Lonergan 2004). Bu teknolojik çeşitliliğin ortaya çıkmasıyla beraber daha güvenilir yarıiletken malzeme üretme çabaları artmıştır (Aydoğan vd. 2006).

Yarıiletken teknolojisinin gelişmesiyle beraber metal-yarıiletken kontakların yapısal özelliklerini anlamaya yönelik çalışmalar artmıştır (Braun 1874). Metal-yarıiletken kontaklar ilk defa ince metal bir telin yarıiletken yüzeyine nokta şeklinde kontak yapılmasıyla keşfedilmiştir (Göndük 2014). Metal-yarıiletken üzerine nokta şeklinde yapılmış olan bu kontak mekanik olarak fazla güven vermediği için 1950'li yıllarda yerine p-n eklem diyotlar kullanılmıştır. Gelişen yarıiletken ve vakum teknolojisi sayesinde, günümüzde metal-yarıiletken kontakların üretilebilirliği ve güvenilirliği artmıştır (Neamen 1992).

Yarıiletken devre elemanları genel itibarıyla metal-yarıiletken kontaklar, transistörler, cep telefonları, lazerler, sensörler, güneş pilleri, fotodetektörler, hızlı anahtarlama uygulamaları (switching), varaktörler (uygulanan gerilimle kapasitesi değişen kondansatör) ve mikrodalga devre elemanları gibi birçok cihazın yapısında kullanılırlar (Dinek 2006). III-V grubunda yer alan yarıiletkenler elektronik devrelerde sıkça kullanılırlar (Yıldırım 2009).

Metal-yarıiletken doğrultucu kontaklar aynı zamanda Schottky diyot (SD) olarak da bilinmektedirler. Schottky diyotlar ilk kez 1874 yılında Walter Schottky tarafından metal-yarıiletken arayüzeyinde bir potansiyel engel tespit edilmesiyle ortaya çıkmıştır. Bundan dolayı metal-yarıiletken kontaklara Schottky diyot veya Schottky kontak denilmektedir.

Yarıiletken devre elemanlarının kararlılığını, güvenilirliğinin ve performansını etkileyen en önemli kriterler arayüzey durumu ve hazırlanma şartlarıdır (Ziel 1968, Türüt vd 1992). Metal-yarıiletken kontaklar yüksek vakum değerlerinde üretilmediği durumlarda metal-yarıiletken arayüzeyde bir oksit tabaka oluşacaktır (Orak 2013). Metal-yarıiletken kontaklar çok özel şartlarda üretilmedikleri sürece, laboratuvar şartlarında üretilmiş olsalar dahi, ortamda var olan oksijenden dolayı yarıiletken yüzeyde doğal bir oksit tabakası oluşur (Rhoderick 1978). Oluşan bu doğal oksit tabakası metal-yarıiletken kontakların performans ve kararlılığını belirlenmesinde etkili olur (Card ve Rhoderick 1971, Osvald ve Burian 1997, Yıldırım 2009, Orak 2013). Metal-yarıiletken kontakların elektriksel karakteristikleri, metal-yarıiletken arasında kullanılan ara yüzey malzemesine bağlı olarak değişmektedir. Metal-yarıiletken kontakların ara yüzey durumları engel yüksekliği, idealite faktörü gibi diyota ait birçok parametreyi değiştireceğinden kullanılan ara yüzey malzemesi doğrudan malzemenin özelliklerini, performansını ve verimini etkiler (Sze 1981, Rhoderick 1978). Yapılan deneysel çalışmalarda metal-yarıiletken arayüzey farklı işlemlere maruz bırakıldığında, engel yüksekliği ve idealite faktörünün değiştiği görülmüştür (Chandra vd.1986, Türüt vd. 1992) .

Yarıiletken diyotların elektriksel karakteristiklerinin, sadece bir ölçüm metoduyla ve tek bir sıcaklık aralığında ölçülmesi güvenilir olmayıp, geniş bir sıcaklık aralığında I-V karakteristiklerinin incelenmesi, belirli sıcaklık ve gerilim bölgesinde akım-iletim mekanizmasını daha etkin hale getirecektir (Rhoderick ve Williams 1988).

Bu çalışmada, organik arayüzey malzemeli ve harici arayüzeysiz (referans) diyotların fabrikasyonu yapılarak fotovoltaik performansları incelendi. Hazırlanmış olan referans ve organik arayüzey malzemeli yarıiletken diyotların karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altında akım-voltaj ölçümleri alındı. Alınan ölçümler sonucu idealite faktörü, engel yüksekliği, açık devre voltajı, kısa devre akımı, doldurma faktörü, güneş enerji verimi

gibi elektriksel parametreler hesaplanarak yorumlandı. Ayrıca çalışmada kullanılan organik arayüzey malzemesinin optik özellikleri ve yüzey morfolojisi incelendi.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Metal-yarıiletken kontaklar ile ilgili ilk sistematik çalışma, bakır ve demir sülfat gibi metal kontaklarla yarıiletken arasındaki anti-simetrik yapıda olan elektriksel iletkenliğin ortaya çıkarmasıyla olmuştur (Braun 1874). Bu çalışmalar, ilk olarak radyo detektörlerinde (Braun 1874), daha sonra da radar detektörlerinde kullanılmış olup, günümüzde mikrodalga diyotlarda ve transistörlerde başarıyla kullanılmaktadır (Yıldırım 2009).

Metal-yarıiletken kontaklarda, metal ile yarıiletken arayüzeyinde bir potansiyel engelin varlığının ilk defa ortaya konmasından sonra (Schottky 1938), oluşan bu potansiyel engelin metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farktan kaynaklandığı açıklanmıştır (Mott 1938). Metal-yarıiletken kontaklarda engel yüksekliğinin belirlenmesinde iş fonksiyonu ve arayüzey halleri etkili olmaktadır (Crowel ve Sze 1965). Arayüzey hallerinin olduğu arayüzey bölgesi, yarıiletken tarafında oluşan ve hareketli yüklerin olmadığı yüksek dirençli bir alandır (Orak, 2013). Metal ve yarıiletkenin bir araya getirilmesiyle oluşan eklemden meydana gelen engelde akım taşıyıcıları, uygulanan gerilimin artırılması ya da azaltılmasıyla kontrol altına alınabilmektedir (Azaroff ve Brophy 1965). İdealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri yarıiletken yüzeyin farklı işlemlere maruz bırakılmasıyla değişebilmektedir.

Nathan vd. (1996), engel yüksekliğinin ve idealite faktörünün artan sıcaklıkla değişimini inceleyerek, sıcaklığın 298 K'den 473 K'e doğru artırıldığında engel yüksekliğinin %3,5 kadar, idealite faktörünün ise %5 kadar azaldığını gözlemlediler.

Aydoğan vd. (2005), p-InP yüzeyine polypyrrole organik bileşiğini elektrokimyasal yöntemlerle uygulayarak polypyrrole/p-InP yapısını oluşturdular. Oluşan bu yapının elektriksel karakterizasyonunu inceleyerek, idealite faktörü ve engel yüksekliğini sırasıyla 1,68 ve 0,59 eV olarak hesapladılar.

Duman vd. (2012), Ni/n-GaP Schottky diyodunun I-V karakteristiklerinden engel yüksekliği ve idealite faktörleri değerlerini hesapladılar. Yapmış oldukları çalışmada 20 K'lık adımlarla 120-320 K arasında idealite faktörü ve engel yüksekliğini sırasıyla; 320 K'de 1,27 ve 1,01 eV, 120 K'de 5,93 ve 0,38 eV olarak buldular.

1900 yılında Max Planck enerjinin küçük ayrı bir birimi “kuanta” adı verilen yapılarla yayıldığını keşfetmesiyle beraber Planck sabiti (h), evrensel bir sabit olarak bilim dünyasındaki yerini almıştır. Fotovoltaik aygıtlar, içerisindeki doğrultucu ekleme ışık gelmesiyle yeterli enerjiye sahip fotonların ($h\nu > E_g$) soğrularak elektron-boşluk çiftleri oluşma prensiplerine göre çalışan, yarıiletken teknolojisine dayanan elemanlardır. Hovel (1975) fotovoltaik parametreleri açık-devre voltajı (V_{oc}), kısa devre akımı (I_{sc}), doldurma faktörü (FF), maksimum güç noktasındaki voltaj (V_{max}), maksimum güç noktasındaki akım (I_{max}), maksimum çıkış gücü (P_{max}) olarak analiz etmiştir.

Yakuphanoglu vd. (2007), p-Si malzemesi üzerine CuPc ince film yapısını ekleyerek termal buharlaştırma yöntemiyle Au/CuPc/p-Si yapısını oluşturmuş, yaptıkları ölçümler sonucu idealite faktörü ve engel yüksekliğini sırasıyla 2,38 ve 0,71 eV ölçmüşlerdir. Ayrıca 3500 lüks ışık altında aldıkları I-V ölçümleriyle oluşturdukları diyot yapısının fotodiyot özelliği gösterdiği sonucuna varmışlardır.

Yakuphanoglu vd. (2011), 100mW/cm^2 ışık şiddeti altında CdO/p-Si diyotu için $I_{sc}=0,53 \times 10^{-6}$ A, $V_{oc}=0,12$ V değerlerini hesapladılar. Buldukları bu değerlerden V_{oc} değeri çok küçük olduğundan bu diyotun güneş pili yerine diyot olarak kullanılmasının daha doğru olacağını açıklamışlardır.

Yıldız (2012), Al/OC-ZnPc/ p-Si Schottky diyotunu üreterek idealite faktörü, engel yüksekliği değerlerini bulmuş, $40\text{-}100\text{ mW/cm}^2$ ışık şiddeti altında I-V ölçümlerini elde ederek diyotun fotodiyot özelliği gösterdiğini saptamıştır.

Organik/polimer bileşiklerin iletken özelliğinin keşfedilmesi 1977 yılında iyot katkılı poliasetilen maddesinin iletken özellik göstermesiyle başlamıştır (Saçak 2002, Uzun 2006). Schottky diyotların fotovoltaik performansı organik arayüzey malzemeleri kullanılarak arttırılabilmektedir (Baraz vd. 2017). Bu tez çalışmasında organik arayüzey

malzemesi olarak Alq_3 molekülü kullanılmıştır. Alq_3 ve türevleri literatür çalışmalarında hem elektron taşıma tabakası (ETL) hem de emisyon tabakası (EML) olarak kullanılan, yapısında fazla miktarda elektron, az miktarda boşluk taşıyan moleküllerdir (Shinar 2004).

Mori vd. (1998), $\text{Alq}_3/\text{LiF}/\text{Al}$ ve Alq_3/Al yapılarının arayüzey hallerini ultraviyole fotoelektron spektroskopisi ile ölçtüler. Bu ölçümler sonucu, ince bir LiF tabakasının arayüzeye yerleştirilmesiyle Alq_3 tabakasının işgal edilmiş en yüksek molekül orbital seviyesinde (HOMO) ve vakum seviyesinde kaymalar tespit ettiler. Bu bulgulardan ince LiF tabakanın Alq_3/Al arayüzeyinde elektron enjeksiyonu için bariyer yüksekliğinin azalttığını tespit ettiler.

Bolognesi vd. (1999), $\text{ITO}/\text{P5OMe}/\text{Alq}_3/\text{Al}$ heteroeklem yapısındaki organik ışık yayan diyot (OLED) yapısının optik ve elektrolüminans özelliklerini incelediler. Hem ETL hem de EML tabakası gibi davranan Alq_3 molekülünün cihaz performansını iyileştirdiğini gözlemlediler. Farklı gerilimler altında yaptıkları incelemede, gerilim değerinin arttıkça P5OMe emisyonunun Alq_3 emisyonuna göre arttığını gördüler.

Cerniuke vd. (2013), $\text{Al}/\text{Alq}_3/\text{Si}$ diyot yapısının elektriksel özelliklerini hazırlanma koşullarına bağlı olarak incelediler. Toz halinde olan Alq_3 organik malzemesini termal buharlaştırma yöntemiyle numune yüzeyine 80-200 nm arasında değişen kalınlıklarda film şeklinde uygulayarak $\text{Al}/\text{Alq}_3/\text{n-Si}$ ve $\text{Al}/\text{Alq}_3/\text{p-Si}$ diyot yapılarını oluşturdular. $\text{Al}/\text{Alq}_3/\text{n-Si}$ diyot yapısı için, Alq_3 film kalınlığı 85-200 nm aralığında arttırıldığında engel yüksekliği değerinin 1,1 eV'den 0,9 eV'ye doğru azaldığını; idealite faktörünün 1,5'ten 2'ye doğru arttığını gördüler. $\text{Al}/\text{Alq}_3/\text{p-Si}$ diyot yapısı içinse, Alq_3 film kalınlığı 80-200 nm aralığında arttırıldığında engel yüksekliği değerinin 0,77 eV'den 0,82 eV'ye doğru arttığını; idealite faktörünün 2,8'den 3,5'a doğru arttığını gördüler. Ayrıca Alq_3 organik malzemesini kullandıkları $\text{Al}/\text{Alq}_3/\text{n-Si}$ ve $\text{Al}/\text{Alq}_3/\text{p-Si}$ diyot yapılarının engel yüksekliği değerlerini $\text{Al}/\text{n-Si}$ ve $\text{Al}/\text{p-Si}$ diyot yapılarına kıyasla daha yüksek bulmuşlardır. Sonuç olarak Alq_3 filmleri uygulanmış bütün diyot yapılarında engel yüksekliği değerleri belirgin bir şekilde artmıştır. Bu belirgin artışın nedenini Alq_3 organik molekülünün polar yapısından dolayı yüzeyde oluşan dipol tabakaya atfetmişlerdir.

Ağar (2015), yapmış olduğu tez çalışmasında kadmiyum, çinko, bakır ve kobalt gibi ağır metal iyonlarının algılanmasına yönelik sensörlerin geliştirilmesi amacıyla iki farklı organik malzeme olan ftalosiyanın ve Alq_3 'ü kullanmıştır. Algılayıcı malzeme boyutunun algılama özelliklerine etkilerini incelemek amacıyla Alq_3 ince film ve mikrotellerinin fabrikasyonu yapılarak yedi farklı metal iyonu üzerinde algılama özelliği araştırılmıştır. Algılayıcı olarak Alq_3 mikrotellerinin kullanılmış olduğu sensörlerin cevap ve geri dönüşüm sürelerinin, Alq_3 ince filmlerinin kullanıldığı sensörlerden daha düşük olduğu görülmüştür. Alq_3 ince filmlerinin kullanıldığı sensörlerde en yüksek duyarlılık gösteren metal iyon türünün kadmiyum iyonları olduğu görülmüştür.

Yamaguchi vd. (2017), anodik yapıya sahip alüminyum plakalarının farklı daldırma süreleri, sıcaklık, yoğunluk parametreleriyle 8-hidroksikinolin (HQ) çözeltisiyle tepkimeye girmesi sonucu Alq_3 'ün oluştuğunu ve bu oluşumun belirli aşamalarla nanopartiküller, mikro kuşaklar ve çiçeksi kristal yapılar şeklinde olduğunu gözlemlediler. Farklı daldırma süreleri için 100 °C'de, 10 mM'lık HQ çözeltisi içerisinde yaptıkları işlemde; sadece daldırılıp çıkarılan numunelerde nanopartiküller, 10 saniye boyunca daldırılıp çıkarılan numunelerde mikro kuşak, 60 saniye boyunca daldırılıp çıkarılan numunelerde artmış mikro kuşak, 180 saniye ve 300 saniye daldırılıp çıkarılan numunelerde çiçeksi kristal yapıların oluştuğunu SEM görüntüleriyle ortaya koydular. Farklı sıcaklıklar için alüminyum plakaları 100 °C'de, 10 mM'lık HQ çözeltisi içerisinde 10 dakika boyunca işleme tabi tuttular. Bu işlem sırasında aldıkları SEM görüntüleriyle yüzeyde; 30 °C'de 1-2 μm civarında filiz şeklinde, 60 °C'de çiçeksi kristal yapıda, 80 °C ve 100 °C'de ise artmış çiçeksi kristal yapıların oluşumunu gözlemleyerek, kristal yapının 60°C'de oluşmaya başladığını gözlemlediler. Farklı yoğunlukta çözeltilerde ise 100 °C'de 10 dakika boyunca işleme tabi tutarak elde ettikleri SEM yüzey görüntülerinde; 1 mM'lık numune yüzeyinde püskürtme tarzında çatlaklar, 3 mM'lık çözeltide mikro kemerler, 5 mM'lık çözeltide aratan mikro kemer yapısı, 7 mM ve 10 mM'lık çözeltilerde ise çiçeksi kristal yapılar tespit ettiler. SEM görüntülerinde incelenen bu yapılarda mikro kemerlerin 5–10 μm genişliğinde ve 5-20 μm uzunluğuna sahip olduğunu gözlemlediler. Sonuç olarak daldırma süresi, sıcaklık ve yoğunluğun arttıkça nanopartiküller yapıdan çiçeksi kristal yapılara doğru oluşumun arttığını SEM görüntüleriyle tespit ettiler.

Tagaya vd. (2017), Alq_3 molekülünü farklı gözenek boyutlarına sahip (3,0 ve 5,4 nm) şeffaf gözenekli silikon filmlere adsorbe ederek incelediler. Yapmış oldukları çalışmada Alq_3 molekülünün adsorbe düzeyinin farklı gözenek boyutlarına ve sıcaklık değişimlerine bağlı olarak değiştiğini gözlemlediler.

Yapılan literatür araştırmalarında, Alq_3 organik malzemesinin yüksek elektrolüminans (EL) etkinliğinden dolayı OLED yapılarda ve elektronik cihazların üretiminde elektron taşıma ve ışık yayıcı materyal olarak etkin olarak kullanılan en kararlı organik yarıiletken olduğu görülmüştür (Tang vd. 1987, Bolognesi vd. 1999, Dediu vd. 2008). Bu veriler ışığında Alq_3 organik malzemesinin fotodiyot yapımında kullanılmadığı anlaşıldığından, fotodiyot üretiminde ilk defa Alq_3 organik malzemesi kullanılarak bilimsel literatüre katkı sunulmaya çalışılmıştır.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Metal-Yarıiletken Kontaklar

3.1.1. Giriş

Yarıiletken teknolojisi bugün olduğu gibi geleceğin de en önemli teknolojilerinden biri olma özelliğini sürdürmektedir. Bunun nedenlerinin birisi, yarıiletkenlerin iletkenlik bakımından yalıtkan ve iletken maddeler arasında yer alarak, teknolojik çalışmalarda kullanılabilirliğinin artmasıdır. Yarıiletkenler normal halde yalıtkan olan ancak ısı, ışık, manyetik etki veya gerilim uygulandığında valans elektronları serbest hale geçerek, iletkenlik özelliği kazanan maddeleridir. Bununla beraber yarıiletkenler kristal yapıya sahiptirler. Yarıiletkenlerde var olan bu kristal yapıda meydana gelen yapısal bozukluklar ve sıcaklık değişimleri, yük taşıyıcılarının hareketlerini ve sayılarını etkiler.

Schottky diyotlar bir metal ve bir yarıiletken arasında kontak oluşturularak elde edilirler. Oluşan bu kontağa doğrultucu kontak ya da Schottky diyot denilmektedir. Kontak durumunda, kontak yapılacak iki maddenin olabildiğince az dirençle, mümkün olması durumunda ideal şartlarda sıfır dirençle temas ettirilmesi amaçlanır. İdeal bir kontak yapabilmek için kontak yüzeyinin temiz ve pürüzsüz olması büyük önem taşır (Cowley ve Sze 1965).

İki madde birbirine değdirildiği zaman bu iki maddenin fermi seviyeleri eşit yükseklikte olan bir dengeye ulaşınca kadar yeni bir yük alışverişi meydana gelir. Meydana gelen bu yük alışverişi metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına (Φ_s , Φ_m) bağlı olarak değişiklik gösterir. Bu halde iki durum söz konusu olacaktır. Ya taşıyıcıların bir yöne doğru hareketi diğer yöne göre daha fazla olacak ve doğrultucu kontak oluşur ya da taşıyıcıların her iki yöne geçerken de zorluk çekmeyeceği omik kontak oluşur. (Rhoderick ve Willams 1988).

Fermi enerjisi seviyesi; mutlak sıfır sıcaklıkta ($T=0$ K) dolu olan mevcut elektron enerji seviyeleri ile boş olan enerji seviyelerini ayıran, mevcut elektron enerji seviyelerinin en yüksek konumuna karşılık gelen enerji düzeyidir. Fermi enerjisi kristaller için önemli bir parametredir. Sıcaklık arttıkça Fermi enerji düzeyindeki elektronlar uyarılarak iletkenlik bandına (E_c) geçerler. n-tipi yarıiletkenler için fermi enerji seviyesi, iletkenlik bandının hemen altında; p-tipi yarıiletkenler için fermi enerji seviyesi, valans bandının (E_v) hemen üstünde yer alır.

3.1.2. Metal p-tipi Yarıiletken Doğrultucu (Schottky) Kontaklar

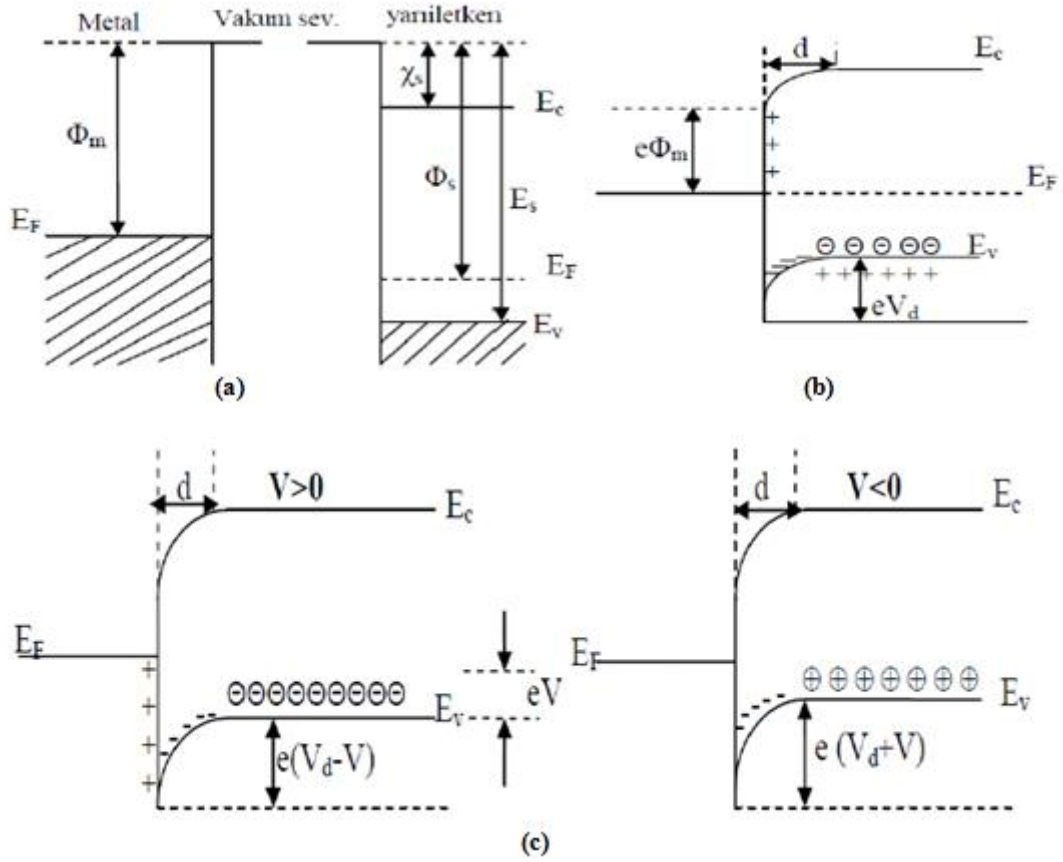
Doğrultucu kontakların temel özelliği akım taşıyıcıları olan boşluk ve elektronların bir doğrultudan diğerine geçerken daha kolay geçebilmesidir. Metalin iş fonksiyonu Φ_m yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s kontağın yapısını belirlemede etkili olur. Şöyle ki metal p-tipi yarıiletkenlerle bir doğrultucu kontak yapabilmek için yarıiletkenin iş fonksiyonunun metalin iş fonksiyonundan büyük olmasıyla mümkün olabilmektedir. Şekil 3.1 (a)'da kontak yapılmadan önce yarıiletkenin Fermi enerji seviyesinin metalin Fermi enerji seviyesinden $\Phi_s - \Phi_m$ kadar aşağıda olduğu görülmektedir. Kontak yapıldıktan sonra ise p-tipi yarıiletken ile metal arasında yük akışı meydana gelerek Şekil 3.1 (b)'de görüleceği gibi yarıiletkenin ve metalin Fermi enerji seviyeleri eşit olana kadar devam eder. Metalden ayrılan elektronlar yarı iletken kısmına geçerek boşlukları iyonize etmeleri nedeniyle geride bir pozitif yük fazlalığı oluşacaktır. Ayrıca metalde elektron sayısı daha fazla olduğundan arayüzeyde bir yük fazlalığı da oluşacaktır. Böylece yarıiletken yüzey tabakasında negatif yüklü iyonize olmuş akseptörler d kalınlıklı bir uzay yükü tabakası oluştururlar. Bu durum da metal ve yarıiletken arasında oluşan bu uzay yükü bölgesinde metalden yarıiletkene doğru bir elektriksel alan oluşmasına neden olur. Yarıiletken tarafındaki boşlukların potansiyel engeli;

$$e V_d = \Phi_s - \Phi_m \quad (3.1)$$

Oluşan difüzyon potansiyeli V_d ile gösterilmiştir. V_d yarıiletken tabaka içerisinde metalin yüzeyi esas alınarak belirlenir. Metal tabaka tarafında yer alan holler için engel yüksekliği;

$$e\Phi_b = E_s - \Phi_m \quad (3.2)$$

Isısal uyarma sayesinde yarıiletkendeki boşlukların potansiyel engeli aşıp, enerji kazanarak metalin içine geçerler. Bu durumun tam tersine metal içinde termal olarak oluşan boşluklarında engeli aşacak şekilde enerji kazanarak, yarıiletken içerisine geçmesine neden olabilir. Oluşan bu durumlar nedeniyle birbirine zıt olan I_0 akımları meydana gelir.



Şekil 3.1. Metal p-tipi Yarıiletken Doğrultucu Konağın Enerji Bant Diyagramı a) Kontakdan önce b) Kontakdan sonra c) $V > 0$ durumunda ve $V < 0$ durumunda

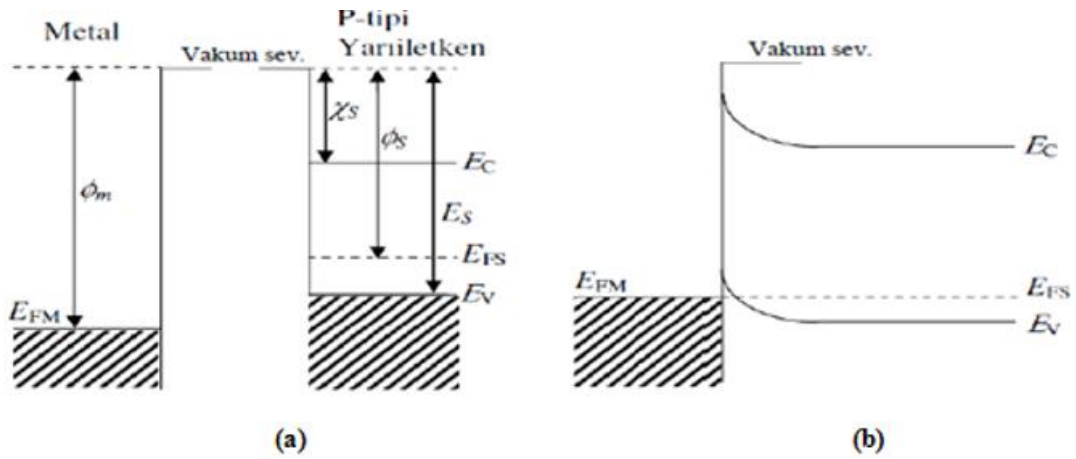
Yarıiletkene uygulanacak bir V gerilimi, metalden yarıiletkene doğru olan boşluk akımını değiştirmez ancak tam tersine olarak yarıiletken metale doğru olan boşluk akımını $\exp(eV/kT)$ çarpanı kadar değiştirir. Sonuç olarak yarıiletkendeki enerji seviyelerinin hepsi eV kadar düşerek, yarıiletkenden metale geçen boşluklar için engel yüksekliğinin V kadar azalmasına neden olur. Yarıiletkenden metale doğru geçen boşluklar tarafından oluşturulmuş akım pozitif kabul edilirse doğrultucu konağın akım denklemi;

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (3.3)$$

şeklinde olacaktır. Bu denklemde I_0 doyma akımını, V uygulanan gerilimi, k Boltzman sabitini ve T ise mutlak sıcaklığı göstermektedir.

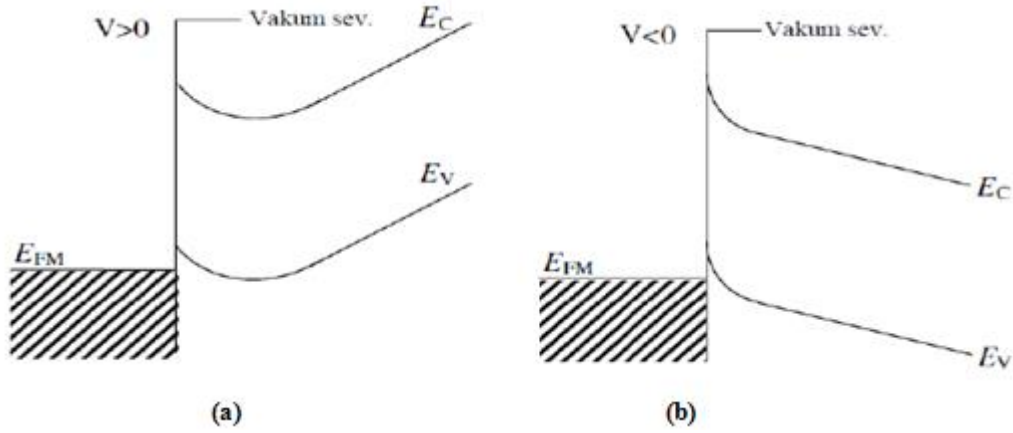
3.1.3. Metal p-Tipi Yarıiletken Omik Kontaklar

($\Phi_m > \Phi_s$) durumunda bir metalle bir yarıiletken için kontakta önce yarıiletkenin Fermi seviyesi, metalin Fermi seviyesinden ($\Phi_m - \Phi_s$) kadar aşağıdadır. Kontakta önceki ve sonraki enerji-band diyagramı aşağıdaki Şekil 3.2’de görülmektedir. Kontakta sonra termal denge durumunda yarıiletkenden metale elektron akışı olmaya başlar. Bu durumda yarıiletken yüzeyin p -tipliliği yani boşluk konsantrasyonu artar. Yarıiletken yüzeydeki bu fazla boşluklar yüzey yükü tabakası meydana getirirler. Yarıiletkenden ayrılan elektronlar geride yüzey yükü tabakası meydana getirirler ve böylece kontak bölgesinde bir dipol tabakası oluşur. Oluşan bu dipol tabaka sayesinde her iki yönde de yük geçişi olur ve omik kontak oluşur.



Şekil 3.2. $\Phi_m > \Phi_s$ durumu için metal/p-tipi yarıiletken kontakta enerji-bant diyagramı a) kontakta önce b) kontakta sonra ısısal denge

Omik kontak oluştuktan sonra, bir V gerilimi uygulandığında bu gerilim tüm yarıiletken boyunca dağılır ve omik kontakta akım akışına minimum direnç göstermesinden dolayı her iki yönde de kolayca akabilir. Şekil 3.3.’te negatif ve pozitif gerilim uygulanması durumunda bantların durumunu gösterir.



Şekil 3.3. Metal/p-tipi yarıiletken omik kontakta ait enerji bant diyagramı a) ters beslem altında ($V > 0$) b) doğru beslem altında ($V < 0$)

3.1.4. Metal-Organik Yarıiletken-Metal Yapısı

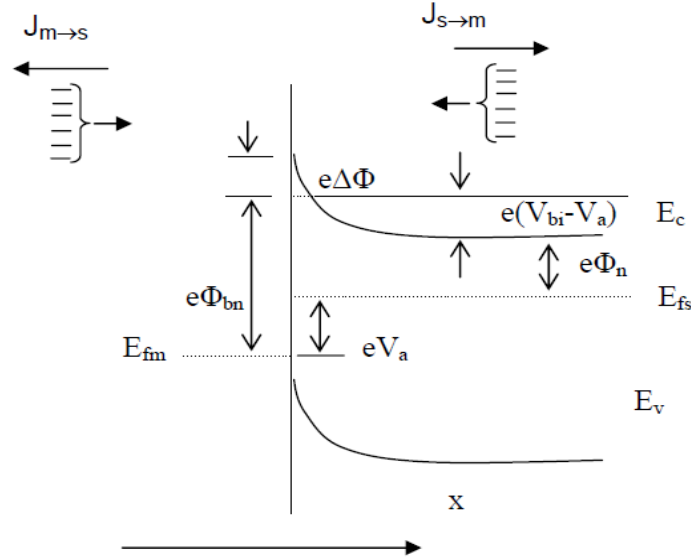
Organik/polimer yarıiletken teknolojisi, yeni nesil elektronik cihazlar için aktif olarak kullanılmaktadır (Dediu vd. 2002). Son yıllarda hem akademik hem de endüstriyel çalışmalarda sıklıkla tercih edilen polimer yarıiletken malzemeler yapılarında birçok bileşiği barındırabilen ancak tek bir molekül yapısında olan bileşiklerdir. Yapılarını oluşturan birçok karbon molekülü nedeniyle organik bileşikler olarak da anılmaktadırlar. Organik yarıiletken malzemeler genellikle p-tipi elektriksel özellik gösterir. Optik ve elektriksel özelliklerinin Schottky diyotların çalışma yapısına uygun olması nedeniyle organik malzemeler genellikle metal-yarıiletken arayüzey tabakası olarak kullanılırlar (Baraz vd. 2017). Metal-yarıiletken eklemlerin arayüzey özellikleri, verimlilik üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Yakuphanoglu 2007). Schottky diyotların elektriksel performansı metal ve organik yarıiletken arasındaki arayüzey özelliklerinin anlaşılmasına bağlıdır.

Organik yarıiletken teknolojisinin kullanıldığı fotovoltaiik yapılar ışık etkisi, esnek yapı, düşük maliyet ve kolay üretilme gibi avantajlara sahiptirler. Bunun yanında düşük verim ve kısa bir yaşam döngüsüne sahip olmak gibi dezavantajları vardır (Frederik vd. 2005). Organik yarıiletken malzemelerde iletkenlik, HOMO (dolu olan en yüksek moleküler orbital) ve LUMO (boş olan en düşük moleküler orbital) enerji seviyelerine ve bu seviyeler arasındaki bant aralığına bağlı olarak değişmektedir (Yazıcı 2011). Bu durum

fotovoltaik aygıtlar için düşünüldüğünde; bir elektronun HOMO'dan LUMO'ya geçerek elektron-boşluk çiftlerini oluşması için, gelen ışığın enerjisinin HOMO ve LUMO enerji seviyeleri arasındaki enerji farkından büyük olması gereklidir (Sajjad 2013).

3.1.5. Schottky Diyotlarda Termiyonik Emisyonla Akım İletimi

Schottky diyotlarda termiyonik emisyon, metal/n-tipi yarıiletken yapılarda çoğunluk taşıyıcı olan elektronların, metal/p-tipi yarıiletken yapılarda ise çoğunluk taşıyıcıları olana boşlukların termal enerjileri nedeniyle potansiyel engeli aşarak yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene doğru salınması olayıdır.



Şekil 3.4. Düz beslem altındaki metal yarıiletken Schottky kontaktaki imaj azalma etkisine ait enerji–band diyagramı

Şekil 3.4'te görüldüğü üzere, Schottky kontağa V_a büyüklüğünde bir gerilim uygulanmıştır. Yarıiletkenden metale doğru olan akım yoğunluğu $J_{s \rightarrow m}$, metalden yarıiletkene doğru olan akım yoğunluğu ise $J_{m \rightarrow s}$ olarak tasvir edilmiştir.

$J_{s \rightarrow m}$ akım yoğunluğu x yönünde olan ve potansiyel engeli aşabilecek büyüklükte hızlara sahip olan elektron yoğunlaşmasının bir fonksiyon biçimi olarak;

$$J_{s \rightarrow m} = e \int_{E_c}^{\infty} V_X dn \quad (3.4)$$

şeklinde gösterilir. Bu fonksiyonda E_c , termoiyonik emisyon olayının gerçekleşmesi için gereken minimum enerjiyi; V_X , sürüklenme hızını ifade eder. Artan elektron konsantrasyonu

$$dn = g_c(E) f(E) dE \quad (3.5)$$

şeklinde gösterilir. Burada $g_c(E)$ iletkenlik bandı üzerindeki hal yoğunluğunu, $f(E)$ ise Fermi-Dirac ihtimaliyet fonksiyonunu gösterir. Bu durum için Maxwell-Boltzman yaklaşımı uygulanırsa, elektron konsantrasyonu

$$dn = \frac{4\pi(2m_n^*)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \sqrt{E - E_c} \exp \left[\frac{-(E - E_c)}{kT} \right] dE \quad (3.6)$$

ifadesine eşit olur. $(E - E_c)$ enerjisine serbest elektronun kinetik enerjisi denilirse

$$(E - E_c) = \frac{1}{2} m_n^* V^2 \quad (3.7)$$

$$dE = m_n^* V dV \quad (3.8)$$

$$\sqrt{E - E_c} = V \sqrt{\frac{m_n^*}{2}} \quad (3.9)$$

olarak bulunur. Bu sonuçlarla beraber (3.6) ifadesi tekrar düzenlenirse

$$dn = 2 \left(\frac{m_n^*}{h} \right)^3 \exp \left(\frac{\phi_b}{h} \right) \exp \left(\frac{-m_n^* V^2}{2kT} \right) 4\pi V^2 dV \quad (3.10)$$

sonucu elde edilerek, hızları V ile $V+dv$ arasında değişen elektronların sayısı hakkında bilgi edinilir. Buradaki hız

$$V^2 = V_x^2 + V_y^2 + V_z^2 \quad (3.11)$$

olarak bileşenlerine ayrılır ve (3.4) ifadesi

$$J_{s \rightarrow m} = 2e \left(\frac{m_n^*}{h} \right)^3 \exp \exp \left(\frac{-e\Phi_n}{kT} \right) \int_{V_{ox}}^{\infty} V_x \exp \left(\frac{m_n^* V_x^2}{2kT} \right) dV_x \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(\frac{-m_n^* V_y^2}{2kT} \right) dV_y \\ \times \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(\frac{-m_n^* V_z^2}{2kT} \right) dV_z \quad (3.12)$$

olarak yazılabilir. Burada x doğrultusuna doğru harekette elektronun potansiyel engeli aşabilmesi için gerekli olan hız V_{ox} olarak gösterilmiştir. Bunlarla beraber aşağıdaki şekilde dönüşümler yapılırsa

$$\frac{m_n^* V_x^2}{2kT} = \alpha^2 + \frac{e(V_{bi} - V_a)}{kT} \quad (3.13.a)$$

$$\frac{m_n^* V_y^2}{2kT} = \beta^2 \quad (3.13.b)$$

$$\frac{m_n^* V_z^2}{2kT} = \gamma^2 \quad (3.13.c)$$

$$\frac{1}{2} = m_n^* V_{ox}^2 = e(V_{bi} - V_a) \quad (3.14)$$

İfadesi elde edilir, $V_a \rightarrow V_{ox}$ için $\alpha=0$ olur. Ayrıca $V_x dV_x = \frac{2kT}{m_n^*} \alpha d\alpha$ olarak yazılabilir. Bu ifadeler kullanılarak (3.12) eşitliği tekrar düzenlenirse

$$J_{s \rightarrow m} = 2e \left(\frac{m_n^*}{h} \right)^3 \left(\frac{2kT}{m_n^*} \right)^2 \exp \left(\frac{-e\Phi_n}{kT} \right) \exp \left(\frac{-e(V_{bi} - V_a)}{kT} \right) \\ \times \int_0^{\infty} \alpha \exp(-\alpha^2) d\alpha \int_{-\infty}^{\infty} (-\beta^2) d\beta \int_{-\infty}^{\infty} (-\gamma^2) d\gamma \quad (3.15)$$

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left(\frac{-e\Phi_b}{kT} \right) \exp \left(\frac{eV_a}{kT} \right) \quad (3.16)$$

olarak bulunur.

Şekil 3.6'da da $\Phi_{bn} = \Phi_n + V_{bi}$ durumu vardır ve uygulanan gerilim sıfır olarak alınır

$J_{s \rightarrow m}$ ve $J_{m \rightarrow s}$ birbirine eşit olacaktır. Buradan

$$J_{m \rightarrow s} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_{bn}}{kT}\right) \quad (3.17)$$

olacaktır. Bu durumda eklemde oluşacak net akım yoğunluğu $J = J_{s \rightarrow m} - J_{m \rightarrow s}$ olur. Eklemde oluşan net akım daha açık ifadeyle

$$J = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_{bn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.18)$$

olur. A^* Richardson sabitidir ve

$$A^* = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) \quad (3.19)$$

şeklinde gösterilir.

J_0 ters doyma akım yoğunluğu (sızıntı akımı) olarak

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_{bn}}{kT}\right) \quad (3.20)$$

şeklinde ifade edilir. Buradan akım yoğunluğu ifadesi yeniden düzenlenirse

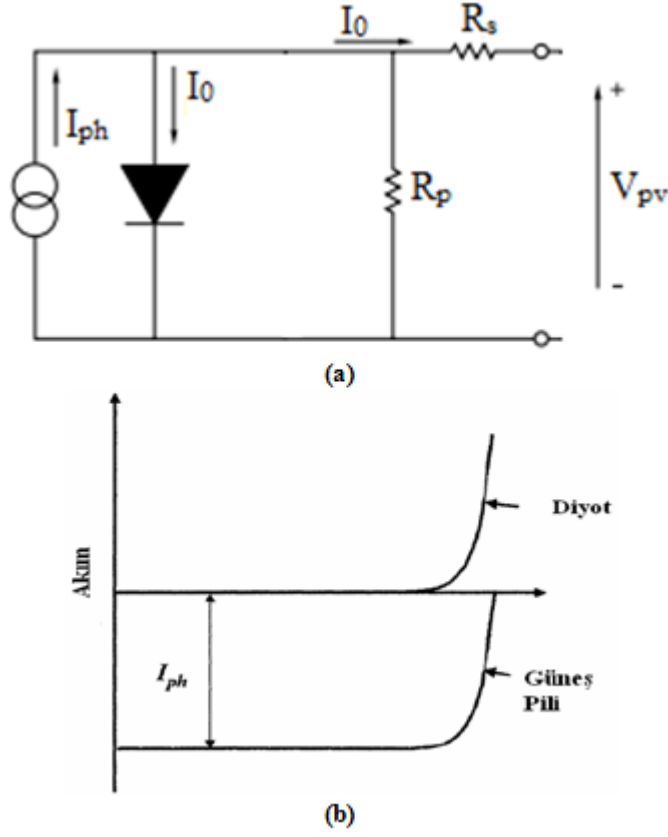
$$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.21)$$

elde edilir.

3.2. Fotovoltaik Aygıtların Karakterizasyonu

Güneş pilleri yapı itibarıyla iki adımda fotovoltaik enerji dönüşümünü sağlarlar. Bu adımlar sırasıyla; fotonların soğurularak elektron-boşluk çiftlerinin oluşması ve elektronların güneş pilinin negatif terminaline, boşlukların ise güneş pilinin pozitif terminaline doğru gitmesidir. Şekil 3.5. (a)'da bir güneş pili doğrultucu diyota bağlanmış

bir akım kaynağıyla gösterilmiştir. Şekil 3.5 (b)'de ise diyot ve güneş pilinin akım-gerilim grafiği tasvir edilmiştir.

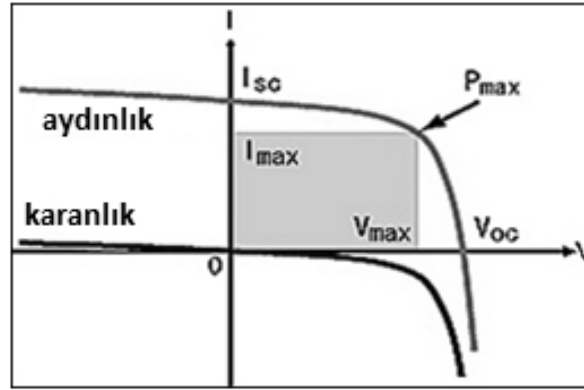


Şekil 3.5. a) Güneş piline ait eşdeğer devrenin gösterimi b) diyot ve güneş piline ait akım-gerilim grafiği

Bir güneş pilinin akım-gerilim karakteristiği aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Shockley, 1950).

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{eV_{oc}}{kT} \right) - 1 \right] \quad (3.22)$$

Bu durumda k Boltzmann sabitini, T mutlak sıcaklığı, e elektron yükünü ve V pilin iki terminali arasına uygulanan gerilimi ifade eder. I_0 doyma akımını ifade eder ki, bu da karanlıkta güneş pilinin klasik bir doğrultucu görevi gördüğünü gösterir. I_{ph} ışıqla beraber oluşan akımdır ve pil üzerine düşen foton akışına bağılı olarak değişiklik göstermektedir.



Şekil 3.6. Güneş piline ait akım-gerilim grafiği

Şekil 3.6.'da verilen I_{max} ve V_{max} ifadeleri sırasıyla maximum gücün elde edilmesi için gereken akım ve gerilim ifadeleridir. Bu durumda pilden elde edilen maximum güç,

$$P_{max} = I_{max} V_{max} \quad (3.23)$$

olarak ifade edilir. Güneş pilinin enerji dönüşümü (η), pil devreye bağlandığında soğrulan ışık enerjisinin elektrik enerjisine çevrilme yüzdesini belirtir. Bu ifade pilden elde edilen maximum gücün pil üzerine düşürülen ışığın gücüne oranlanmasıyla bulunur. Buna göre güneş pilinin verimi

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}A} \quad (3.24)$$

olarak yazılabilir. Bu ifadeye göre P_{in} pil yüzeyine düşürülen yapay ışığın gücü, A pilin etki alanını belirtir. Bundan dolayı yaptığımız deneysel çalışmalarda net gücü bulmak için uygulanan ışık gücü ile pilin etki alanı çarpılmasıyla elde edildi. Güneş pillerinin karakterizasyonunda kullanılan bir diğer parametre de doluluk oranıdır. Bu terim, elde edilen maksimum gücün açık devre gerilimi ve kısa devre geriliminin çarpımına oranı olarak

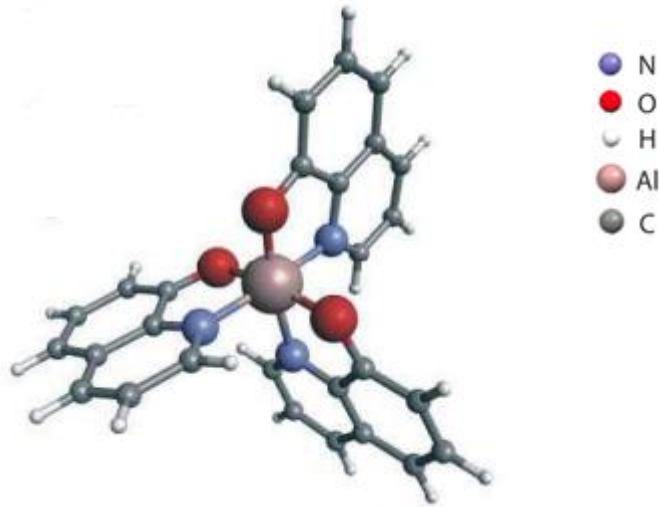
$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc}I_{sc}} = \frac{P_{in}}{V_{oc}I_{sc}} \quad (3.25)$$

şeklinde ifade edilir.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Tris-(8-hydroxyquinoline) Alüminyum Molekülü

Şekil 4.1’de Alq₃ organik arayüzey malzemesinin moleküler yapısı gösterilmiştir. Bu şekil incelendiğinde, moleküler yapının Al, H, C, O, N elementlerinden oluştuğu görülür. Alq₃ molekülü hem elektron taşıma (ETL) hem de emisyon (EML) tabakası özelliği göstermesinden dolayı organik elektronik yapılarda sıklıkla kullanılmaktadır. ETL-EML özelliği gösteren moleküler yapılar fazla miktarda elektron (e^-) az miktarda hol (h^+) taşırlar (Shinar 2004).



Şekil 4.1. Alq₃’ün moleküler yapısı

Alq₃ moleküler yapısı, yüksek elektrolüminans (EL) etkinliğinden dolayı özellikle organik ışık yayıcı cihazlarda (OLED), elektron taşıma ve ışık yayıcı materyal olarak etkin şekilde kullanılır (Tang vd. 1987). OLED yapılar, bir seri organik ince film tabakası ve 2 iletkenin bir araya gelerek oluşturduğu ışık yayan yassı yapılardır (Ulukan 2017).

Alq₃ için bazı kristal fazlar tanımlanmıştır (Braun vd. 2001). Alq₃ α , β , δ ve γ olmak üzere dört farklı fazda bulunur ve bu fazların oluşumu sıcaklığa bağlıdır (Colle vd. 2003). Alq₃ için bilinmeyen kristal fazlar için çalışmalar hala devam etmektedir.

4.2. p-Si Kristalinin Temizlenmesi

(100) yönelimine sahip ve öz direnci 1-10 Ω -cm olan p-Si kristaline uygulanan temizleme prosedürleri aşağıda verilmiştir. Ayrıca organik arayüzey malzemesi Alq₃'ün AFM ve SEM görüntülerini elde etmek amacıyla kullanılan cam alt tabakaya da aynı temizleme prosedürleri uygulanmıştır.

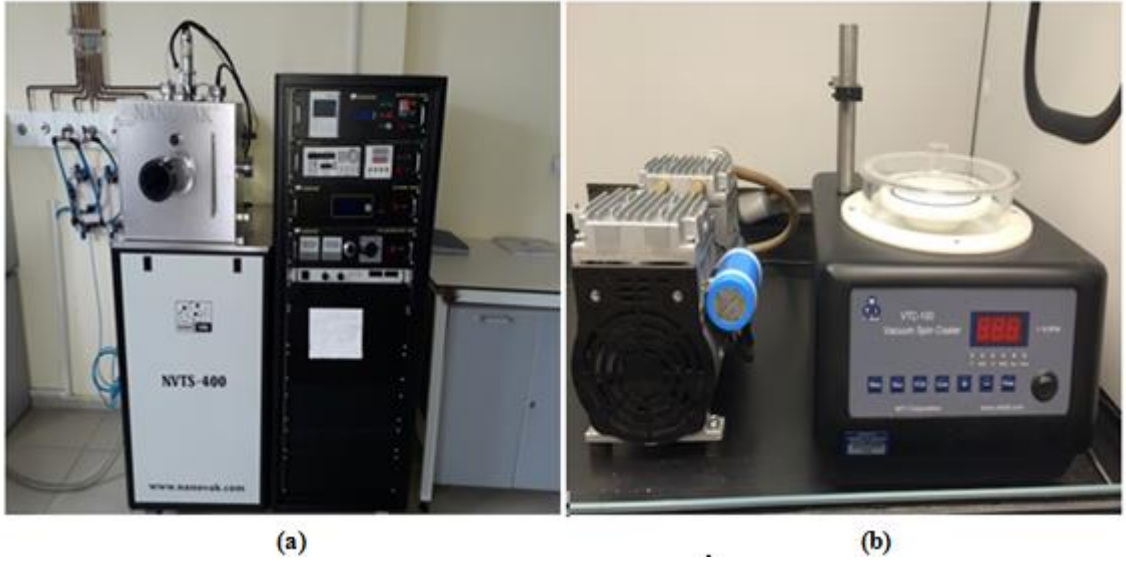
Silisyum kristali temizleme prosedürleri:

1. Aseton içerisinde ultrasonik olarak 10 dakika yıkandı
2. İzopropanol içerisinde ultrasonik olarak 10 dakika yıkandı
3. Deiyonize suda ultrasonik olarak 2-3 dakika yıkandı.
4. Seyreltilmiş HF (H₂O:HF:10:1) ile 10 saniye yıkandı.
5. Deiyonize su ile iyice yıkandı.
6. Azot gazı(N₂) ile kurutuldu.

4.3. Referans ve Organik Arayüzey Malzemelerin Fabrikasyonu

Organik arayüzey malzemesi olarak kullanılan Tris-(8-hidroksikuinolato) alüminyum malzemesinin fotovoltaiik performansını anlayabilmek amacıyla Al/p-Si/Al ve Al/Alq₃/p-Si/Al diyot yapıları oluşturuldu. Arayüzey malzemenin kullanılmadığı Al/p-Si/Al diyot yapısı referans numunesi olarak kabul edildi.

Şekil 4.2'de omik ve doğrultucu kontak yapımında kullanılan termal buharlaştırma ve sputter cihazı ile organik arayüzey malzemeyi ince film şeklinde yüzeye kaplama aşamasında kullanılan spin coater cihazı görülmektedir.



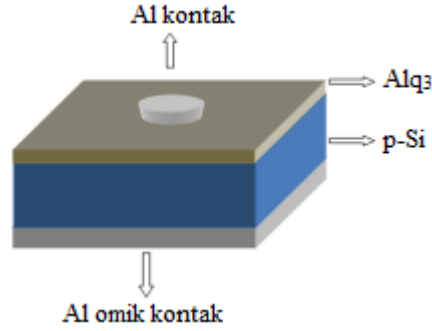
Şekil 4.2. a) Termal Buharlaştırma ve Sputter cihazı b) Spin coater cihazı

Temizleme prosedürleri tamamlanmış olan p-Si kristali ve buharlaştırılacak yüksek saflıkta Al metali termal buharlaştırma cihazına yerleştirilerek vakuma alındı. Vakum işlemi başlatıldıktan sonra basınç 6×10^{-6} Torr seviyesine ulaştığında buharlaştırma işlemi başlatıldı. Buharlaştırma işlemi bittikten sonra bir yüzeyine Al buharlaştırılmış wafer 1 cm x 1 cm'lik parçalara ayrıldı. Böylece referans ile organik arayüzey malzemeli numune için omik kontak işlemi tamamlanmış oldu.

Omik kontak yapım safhası tamamlandıktan sonra organik arayüzey malzemesi olarak kullanılacak Alq_3 molekülü kaplanması işlemine geçildi. Alq_3 , kloroform ve türevleri gibi organik çözücülerle belirli bir konsantrasyonda (1×10^{-2} M) çözülebilir (Sajjda 2013, Ağar 2015). Kloroform kullanılarak elde edilen 1×10^{-2} M Alq_3 çözeltisi, Şekil 4.2 (b)'de gösterilen spin coater cihazıyla 1000 rpm'de 30 saniye boyunca düzgün bir şekilde p-Si kristalinin yüzeyine dağıtıldıktan sonra oda ortamında kurumaya bırakıldı.

Daha sonra doğrultucu kontak yapımında referans ve organik arayüzey malzemeli numuneler termal buharlaştırma cihazına yerleştirildi. Kontak işlemine başlamadan önce kullanılan maske, temizleme prosedürleri izlenerek fiziksel kirlerden arındırıldı. Daha sonra organik arayüzey malzemeli numune ve referans numunesi termal buharlaştırma cihazına yerleştirilerek vakuma alındı. Vakum işlemi başlatıldıktan sonra basınç 6×10^{-6} Torr basınçta Al buharlaştırıldı.

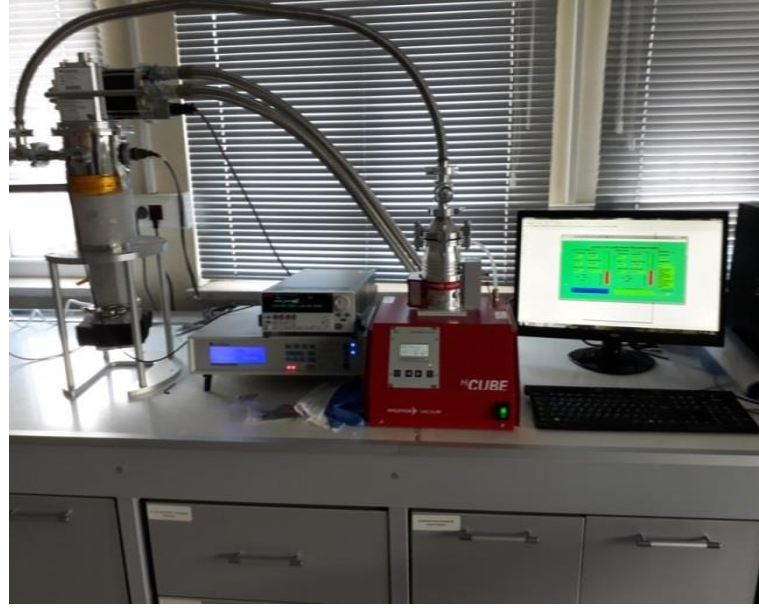
Buharlaştırma işlemi sonunda Al/p-Si/Al (referans) ve Al/Alq₃/p-Si/Al diyot yapıları elde edildi (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Al/Alq₃/p-Si/Al diyotunun şematik gösterimi

4.4. Elektriksel Ölçüm

Hazırlanmış olan diyotların karanlık ve 30-100 mW/cm² ışık şiddeti altında akım-gerilim (I-V) ölçümlerini belirlemede güneş simülatörü ve Keithley 2400 güç kaynağı kullanılmıştır. Keithley güç kaynağıyla uygulanan gerilim ve ölçülen akım Labview programıyla kontrol edilmiştir. Sıcaklığa bağlı olarak değişen I-V ölçümlerini belirlemede ise Kyrostat cihazı ve buna bağlı olan sıcaklık kontrol ünitesi kullanılmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Sıcaklığa bağlı ölçümlerin alındığı Kryostat Cihazı ve Sıcaklık Kontrol Ünitesi

4.5. Kristal Analiz Yöntemleri

4.5.1 Taramalı Elektron Mikroskobu

Bilindiği gibi insan gözünün çok ince ayrıntıları görme olayı sınırlıdır. Bu yüzden küçük ayrıntıları görebilmek için çeşitli cihazlar geliştirilmiştir. Bu amaç için geliştirilen cihazlardan biri olan Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), en yaygın olarak kullanılan yarıiletken karakterizasyon araçlarından biridir. İlk ticari SEM 1965 yılında Cambridge Scientific Instrument Company tarafından geliştirilmiş ve teknik gelişmeler ile birlikte farklı özellikler kazanmaya devam etmiştir.

SEM, yüksek voltajda hızlandırılmış elektronlar ile numune yüzeyinin taranması prensibiyle çalışır. Numune üzerine çarpan birincil elektronlar enerjilerini esnek olarak diğer atomik elektronlara ve örgüye transfer ederler. Birçok rastgele saçılma işlemi ile yüzeyi terk eden bazı elektronlar numuneye bakan bir dedektör ile kaydedilirler. Dedektör tarafından kaydedilen bu elektronlar genellikle birkaç angströmden daha büyük olmayan derinlikten gelen ikincil elektronlardır. SEM’de görüntü oluşturmak için en çok, elektron demeti tarafından uyarılan numune atomlarının yaydığı ikincil elektronlardan (SE) faydalanılır. Numunenin farklı bölgelerinden kopan ikincil elektronların sayısındaki

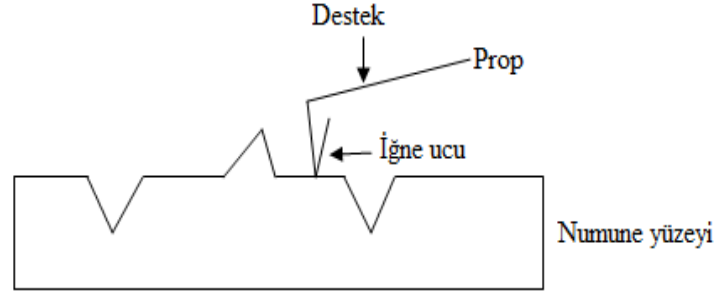
değişim öncelikle elektron demetin yüzeyle buluşma açısına, yani yüzeyin morfolojisine bağlıdır. İkincil elektronların yanında geri saçılan elektronlar (BSE), karakteristik X-ışınları, ışık (katot ışını), numune akımı ve aktarılan elektronlarla da numuneden çeşitli sinyaller elde edilerek amaca uygun gerekli yüzey morfolojisi analizleri yapılır. Bu çalışmada numunelerin yüzey morfolojisinin incelenmesi için Jeol Jsm-6510 SEM cihazı kullanılmıştır.

4.5.2. X-Işınları Kullanılarak Enerji Ayırmalı Analiz (EDX)

EDX yöntemi SEM’de kullanılan bir yöntemdir. Atom numarası (proton sayısı) değiştikçe atomların enerji düzeyleri de değişir. İki enerji düzeyi arasındaki fark, bu düzeyler arasında geçiş yapan elektronun yayacağı X-ışınının enerjisine eşittir. Sadece, ilgi duyulan elementin sahip olduğu piklerin temsil ettiği X-ışınlarının seçilmesiyle ve sadece X-ışınlarının EDX detektöründe sayılmasıyla, numune yüzeyindeki her bir nokta için o elementin göreceli oranı tespit edilebilir. Bu sayımların iki boyutlu dağılımının gösterimi o elementin X-ışınları haritasını verir.

4.5.3. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

1986 yılında IBM laboratuvarındaki çalışmalar sırasında geliştirilen AFM, ticari olarak 1989 yılında piyasaya sürüldü. AFM’de araştırılan materyaller; ince veya kalın film şeklindeki kaplamalar, seramikler, kompozitler, camlar, yapay ve biyolojik zarlar, metaller, polimerler, ve yarı iletkenlerdir. AFM, atomik boyutlara kadar sivriltilmiş bir iğne ucunun yüzeyi yüksek çözünürlükte, üç boyutlu olarak taraması ilkesine dayanır (Aydoğan 2011).

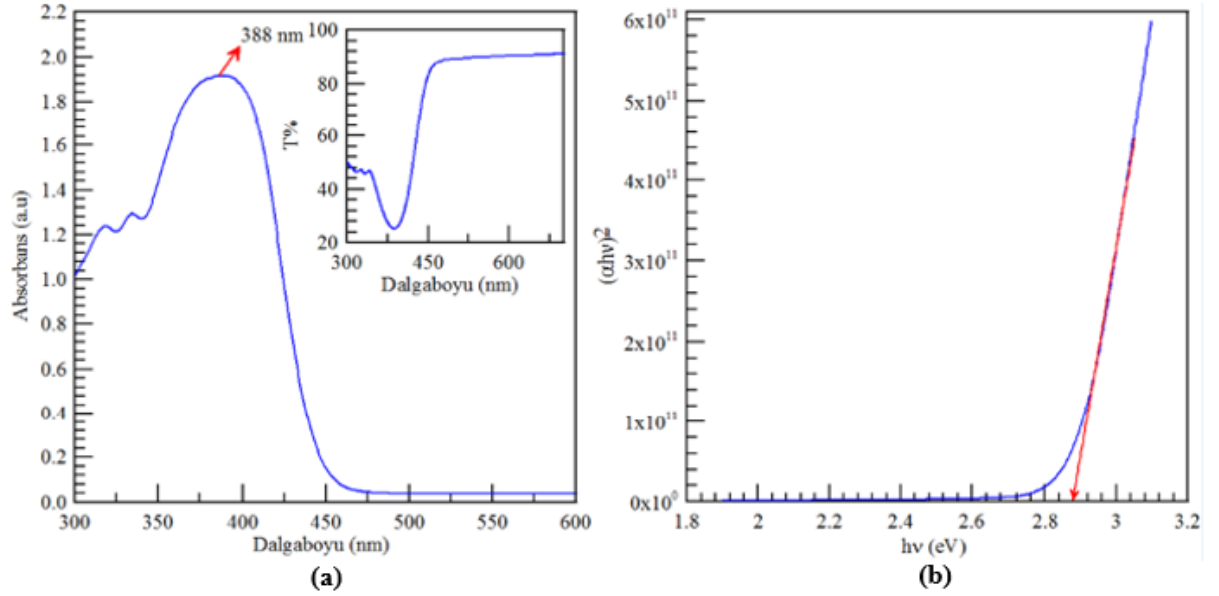


Şekil 4.5. AFM'nin basit şeması (Aydoğan, 2011)

Şekil 4.5'te bir AFM cihazının basit çalışma mantığı gösterilmiştir. İğne ucu ile yüzey arasında bir etkileşme kuvveti oluşur. Oluşan bu etkileşme kuvveti; numunenin özel yapısına, prop ucu ile yüzey arasındaki mesafeye bağlıdır. Böylece nanoboyutta kaplanan numunenin yüzey düzgünlüğü, faz farklılıkları, elektriksel iletkenlik farklılıkları ve manyetik alan yönü farklılıkları incelenebilmektedir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. UV-Görünür Bölge Absorbsiyon Spektrumları



Şekil 5.1. Alq₃ organik tabakanın a) UV-görünür bölge spektrumu ve b) yasak enerji bant aralığı

Alq₃ organik tabakanın bant aralığı değerinin elde etmek için, öncelikle absorbsiyon katsayısı belirlenir. Absorbsiyon katsayısı

$$\alpha = \frac{\ln(1-T)}{d} \quad (5.1)$$

denklemiyle bulunur (Turgut vd. 2013). Burada T yüzdece optik geçirgenlik değerini, d ise film kalınlığını belirtir. Alq₃ organik tabakanın optik bant aralığı

$$\alpha h\nu = K(h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (5.2)$$

denklemiyle bulunur (Serin vd. 2006). Burada $h\nu$ foton enerjisi, K malzeme sabitidir. E_g yasak bölge enerji aralığıdır.

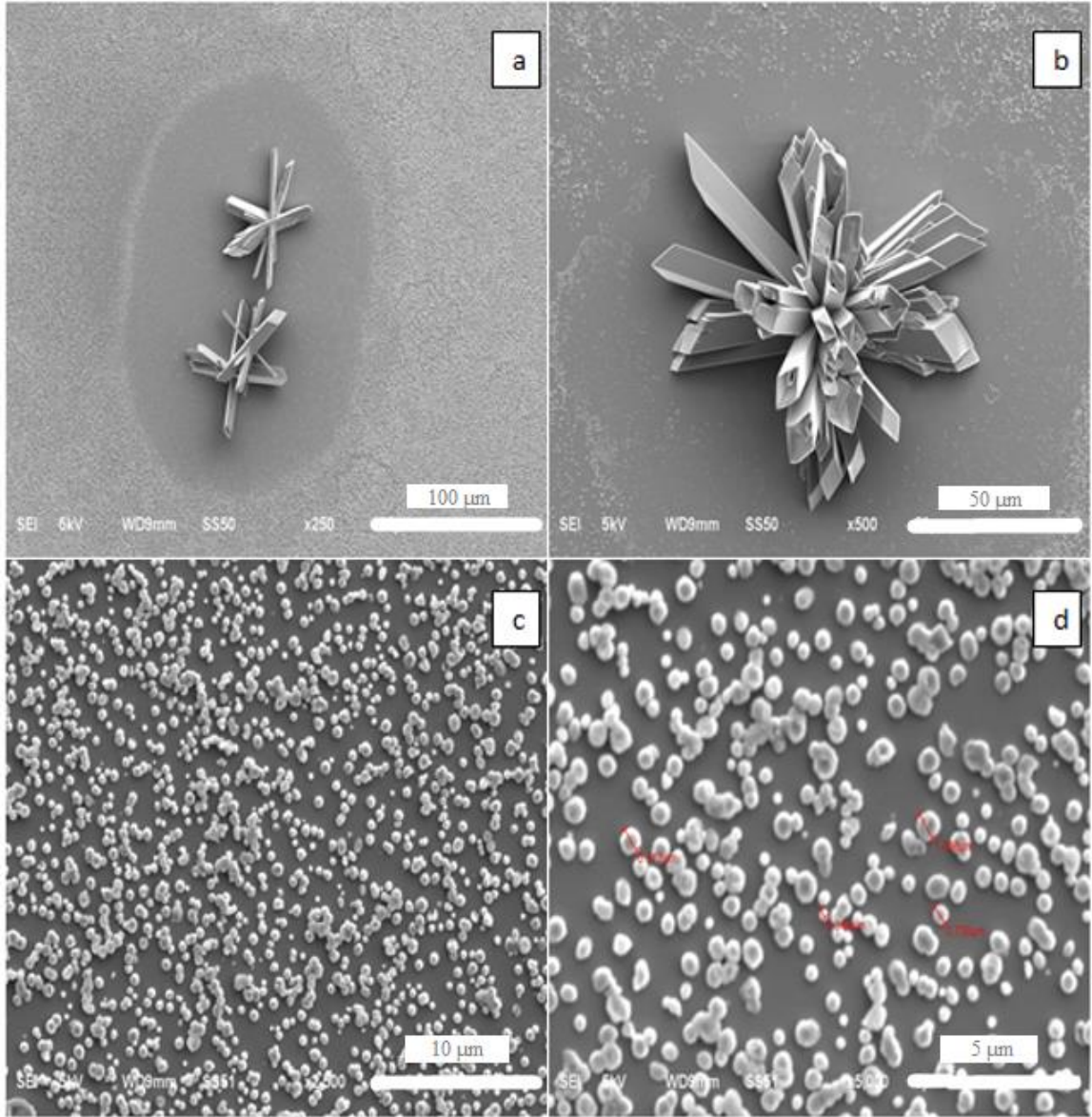
Şekil 5.1 a’da absorbands UV pikleri incelendiğinde 388 nm’de kullanmış olduğumuz malzemenin maksimum pik yaptığı görülmüştür. Yüzdece optik geçirgenlik değerinin yaklaşık %90 olduğu görülmektedir. Buradan malzemenin şeffaf bir görünüme sahip olduğu söylenebilir.

Şekil 5.1 b’de UV ölçümlerinden kullanmış olduğumuz malzemenin bant aralığı hesaplanmıştır. Alq_3 organik tabakasının bant aralığı değeri $(\alpha h)^2 - h\nu$ grafiğine göre 2,88 eV olarak bulunmuştur. Bu durum literatürle uyumluluk göstermektedir (Mori vd. 1998, Li vd. 2015). Bu sonuçlar Alq_3 organik malzemesinin yarı iletken özelliklere sahip olduğunu ve optoelektronik uygulamalarda kullanılabileceğini göstermektedir (Knupfer vd. 2002).

5.2. Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri

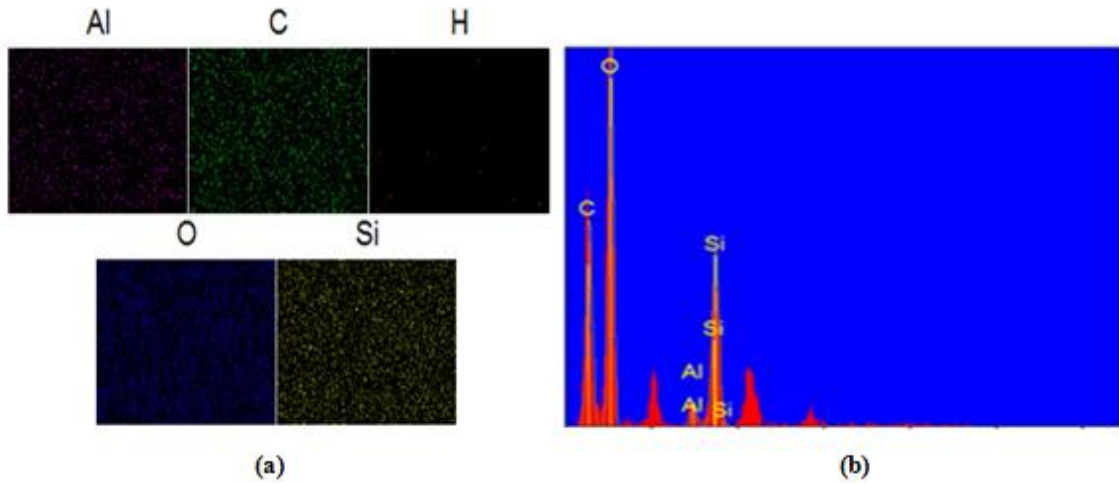
Şekil 5.2’de cam altlık üzerine kaplanarak hazırlanan Alq_3 organik molekülünün SEM görüntüsü verilmiştir. Alq_3 organik malzemesinin SEM görüntüleri incelendiğinde yüzeyin belirli bölgelerinde tanecikli yapı, belirli bölgelerinde mikrokemer yapılar ve belirli bölgelerinde de çiçeksi kristal yapılar olduğu görülmüştür. Sadece tanecikli yapının olduğu (c) ve (d) filmlerinde taneciklerin yüzeye düzgün olarak dağıldığı, mikrokemer ve çiçeksi kristal yapıların görüldüğü (a) ve (b) filmlerinde ise tanecikler arasında belirgin boşlukların olduğu görülmektedir. Oluşan bu belirgin boşluklar mikrokemer ve çiçeksi kristal yapıların etrafında artış göstermiştir.

Alq_3 ’ün kristal yapısıyla alakalı yapılmış literatür çalışmaları incelendiğinde; Alq_3 filmlerinde sıcaklık ve malzeme yoğunluğunun kademeli olarak arttırılması durumunda, tanecikli yapının önce mikrokemer yapılara, daha sonra da çiçeksi kristal yapılara dönüştüğü görülmüştür (Yamaguchi vd. 2017). Bu veriler ışığında (a) ve (b) filmlerinde oluşan mikrokemer ve çiçeksi kristal yapıların, malzeme yayılımının yoğun olduğu bölgelerde olduğu söylenebilir.



Şekil 5.2. a) Tanecikli yapıdan oluşan birbirine geçmiş kristal yapılar b) İçinde boşluklar barındıran çiçeksi kristal yapı c) Yüzeye dağılmış tanecikler d) 0.344μm, 0.748μm, 0.912μm boyutunda tanecikler

SEM’de EDX yöntemiyle taranan bölgede var olan elementlerin yüzeysel dağılımları ve yoğunluk oranları Şekil 5.3’te gösterilmiştir. Bu ölçümlerden, organik malzemenin içerisinde Al, C, O, H ve Si elementlerinin olduğu görülür.

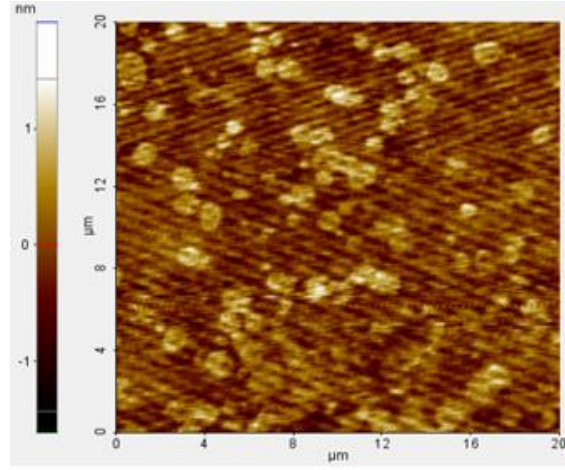


Şekil 5.3. SEM’de görüntülenen elementlerin a) yüzeyssel dağılımları ve b) yoğunluk oranları

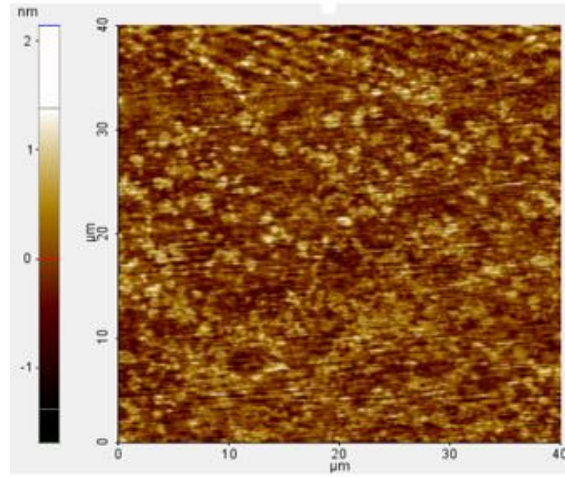
5.3. Atomik Kuvvet Mikroskopu Görüntüleri

Cam altlık üzerine kaplanan Alq₃ organik molekülünün yüzey morfolojisi atomik kuvvet mikroskopu kullanılarak incelendi. Alq₃ molekülünün yüzey pürüzlülük değerleri Park System XEI programı kullanılarak elde edildi.

Şekil 5.42’te hazırlanan Alq₃ filminin (1D) boyutlu ve (3D) boyutlu görüntüleri gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde organik arayüzey malzemesi Alq₃ molekülünün yüzeye homojen olarak dağıldığı görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 5.4. Cam üzerine kaplanan Alq3 ince filminin a) $20\mu\text{m}^2$ 'lik alanda 1D b) $40\mu\text{m}^2$ 'lik alanda 1D boyutlu AFM görüntüleri

5.4. Akım-Gerilim Ölçümleri ve Diyot Parametrelerinin Hesaplanması

Hazırlanmış olan Al/p-Si/Al ve Al/Alq₃/p-Si/Al diyot yapıları için I-V karakteristikleri ölçümleri yapıldıktan sonra, bu karakteristiklerden idealite faktörü ve engel yüksekliği gibi Schottky diyot parametreleri hesaplandı.

İdealite faktörü, diyodun ideallikten sapmasını gösteren boyutsuz bir parametre olup ideal durumda bu faktör 1'e eşit olur. İdealite faktörü hesaplanırken (3.3) eşitliği kullanıldı.

Düz beslem durumunda $eV \gg kT$ olduğundan, bu eşitlikteki 1 terimi ihmal edilebilir. Bu durumda eşitlik (3.3)

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \right) \quad (5.3)$$

olarak yeniden yazılabilir. Bu eşitliğin her iki tarafın tabii logaritmasının alınıp, V 'ye göre türevinin alınmasıyla, idealite faktörü

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d \ln(I)} \quad (5.4)$$

olarak elde edilir.

Elde edilen yarı logaritmik I-V grafiğinin düz beslem tarafında yer alan lineer kısmına bir doğru fit edilir ve bu doğrunun eğiminden $dv/d(\ln I)$ bulunarak, fit edilen doğrunun $V=0$ 'da düşey eksenini kestiği nokta I_0 doyma akım yoğunluğunu verir. (5.1) eşitliğindeki I_0 doyma akım yoğunluğu

$$I_0 = AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \quad (5.5)$$

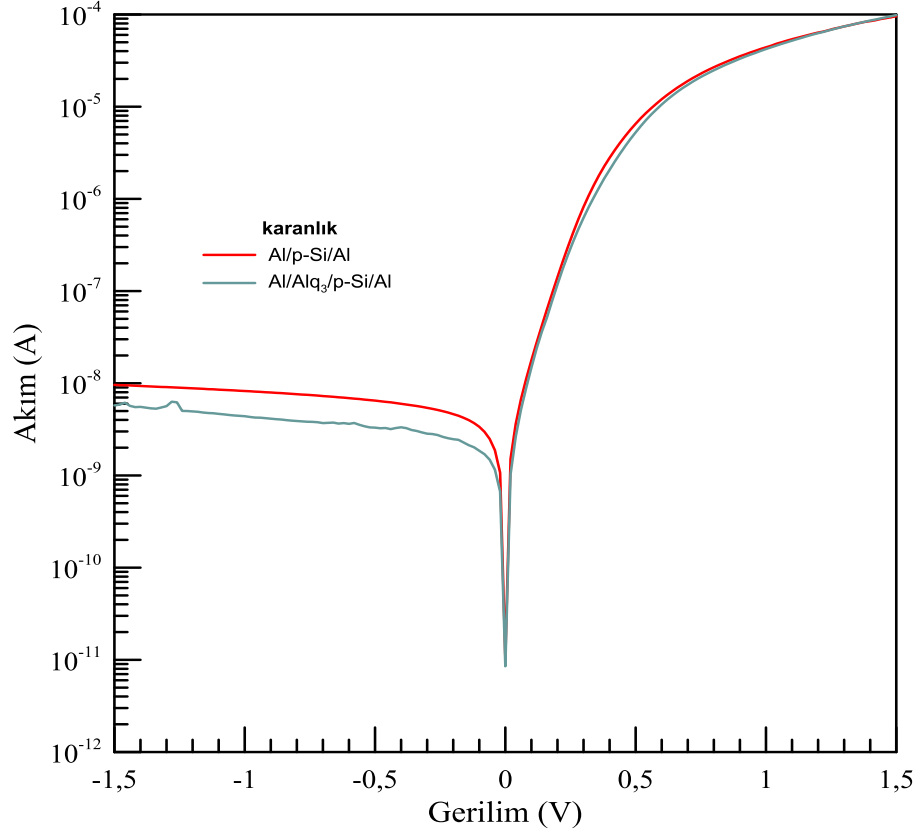
şeklinde bulunur. Burada eşitliğin her iki tarafının tabii logaritması alınarak, (Φ_b) terimine göre çözülürse

$$e\Phi_b = kT \ln\left(\frac{AA^* T^2}{I_0}\right) \quad (5.6)$$

şeklinde engel yüksekliği ifadesi elde edilir. Burada, A diyotun etkin alanını ($7,85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$), A^* Richardson sabitini (p-Si için $32 \text{ A/K}^2 \text{ cm}^2$), k Boltzman sabitini ($8,625 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$), T Kelvin cinsinden sıcaklığı belirtir. Bulunan değerler ve sabit veriler (5.4) ve (5.6) denklemlerinde yerine yazılarak idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri hesaplanmıştır.

Şekil 5.5'te referans ve Al/Alq3/p-Si/Al Schottky diyot yapılarının karanlık ortamda, oda sıcaklığındaki yarı logaritmik I-V grafiği gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde

fabrikasyonu yapılan referans ve Al/Alq₃/p-Si/Al diyot yapılarının klasik Schottky diyot karakteristiği sergilediği sonucuna varılabilir.



Şekil 5.5. Referans numunesi ve Al/Alq₃/p-Si/Al diyot yapısının karanlık ortamda, oda sıcaklığında lnI-V grafiği

Tablo 5.1’de referans numunesi ve Al/Alq₃/p-Si/Al diyot yapısı için oda sıcaklığında hesaplanan engel yüksekliği ve idealite faktörleri verilmiştir. Oda sıcaklığında, referans numunesi için engel yüksekliği ve idealite faktörü sırasıyla 0,81, 1,44 ; Al/Alq₃/p-Si/Al diyot yapısı için 0,83 ve 1,63 olarak hesaplanmıştır. İdeal bir diyot için idealite faktörü değeri 1’e eşit olur (Sze 1981). Dolayısıyla daha ideal olan diyotların idealite faktörü daha düşük, yani 1’e daha yakın olacaktır. Engel yüksekliğinin inhomojenliğinden dolayı idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri farklılık gösterebilmektedir. Hesaplanan değerler incelendiğinde Alq₃ organik arayüzey malzemesinin diyotun idealite faktörünü referans diyota kıyasla arttırdığı, engel yüksekliği değerini ise azalttığı görülür. Referans ve organik arayüzey malzemeli diyotlar için idealite faktörü ve engel yüksekliği

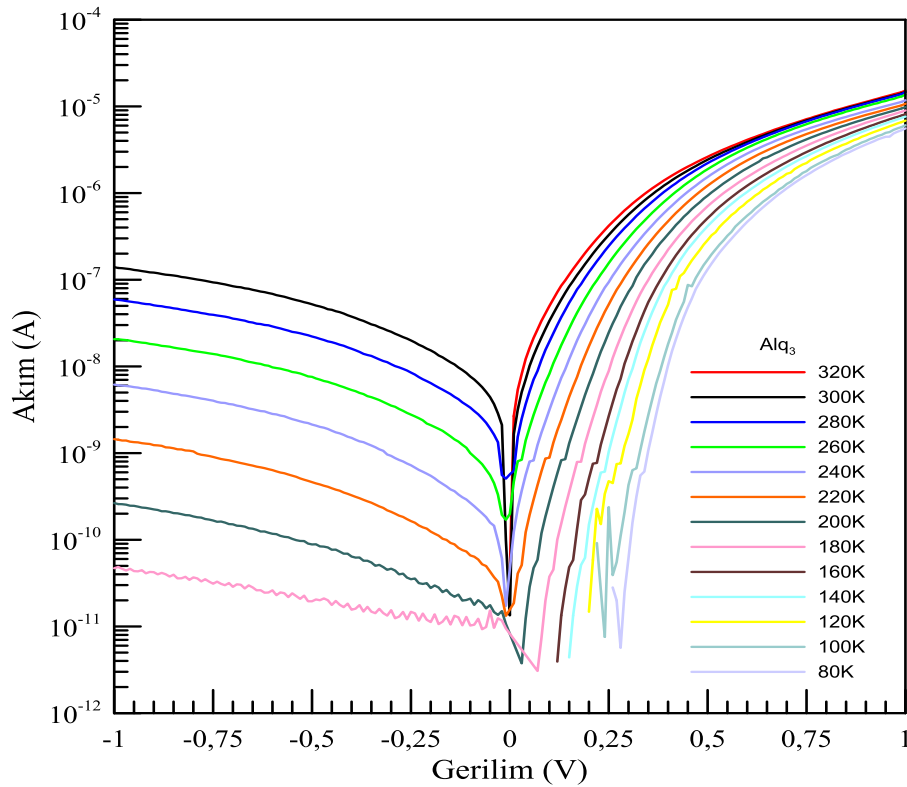
değerlerinin farklı çıkmasının nedeni engel yüksekliğinin inhomojenliğine bağlanabilir (Mönch 1987).

Tablo 5.1. Al/p-Si/Al ve Al/Alq₃/p-Si/Al diyot yapılarının oda sıcaklığında (300 K) hesaplanan engel yüksekliği ve idealite faktörü değerleri

Numune Adı	Engel Yüksekliği (eV)	İdealite Faktörü (n)
Al/p-Si/Al	0,81	1,44
Al/Alq ₃ /p-Si/Al	0,79	1,61

5.4.1. Sıcaklığa Bağlı Parametreler

Referans ve organik malzeme arayüzeyli diyotlar aynı zamanda sıcaklığa dayanıklılık noktasında test edilmiştir. Şekil 5.6'da Al/Alq₃/p-Si/Al diyot yapısının karanlık ortamda numune sıcaklığına bağlı olarak 80-320 K aralığında 20 K'lık adımlarla yarı logaritmik akım-gerilim grafiği çizilmiştir.



Şekil 5.6. Al/Alq₃/p-Si/Al diyot yapısının karanlık ortamda 80-320 K sıcaklık altında lnI-V grafiği

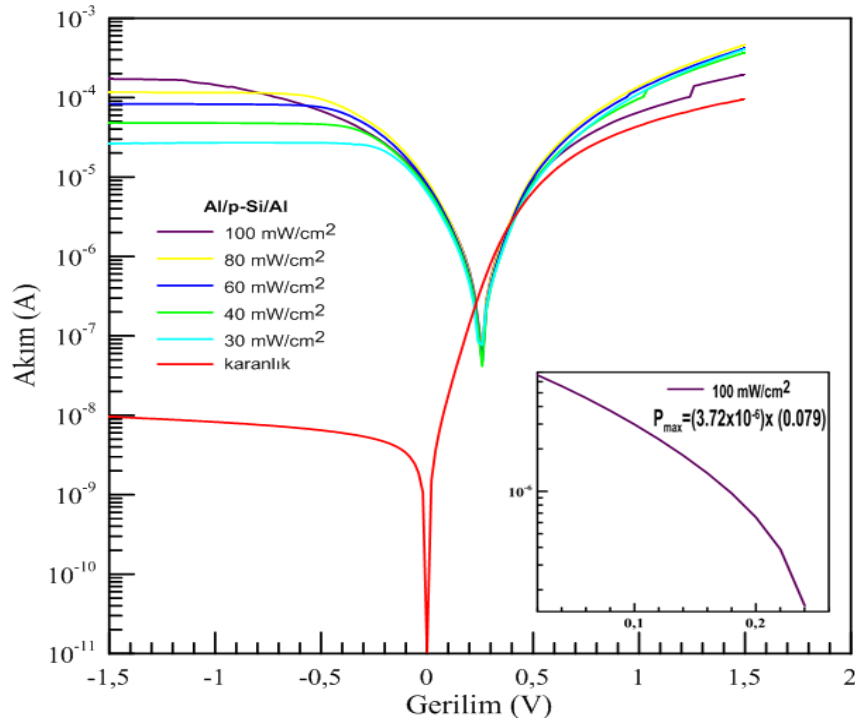
Tablo 5.2’de fabrikasyonu yapılan referans ve organik arayüzey malzemeli diyot yapılarının idealite faktörleri ve engel yükseklikleri, elde edilen I-V grafiklerinin eğimlerinden hesaplanarak verilmiştir. Al/Alq3/p-Si/Al Schottky diyotlar için engel yüksekliği ve idealite faktörünün 80-320 K aralığında değişen numune sıcaklığına göre hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalarda sıcaklık azaldıkça engel yüksekliğinin azaldığı, idealite faktörünün ise arttığı gözlemlenmiştir. Engel yüksekliğinin azalan numune sıcaklığı ile azalmasına karşı idealite faktörü değerinin artması engel yüksekliğinin yanal inhomojenliğine göre açıklanabilir (Yıldırım 2009). Engel yüksekliği yanal inhomojenliğinin nedeni arayüzey yükleri, arayüzey oksit tabaka kalınlığı ve oksit tabakanın inhomojen özellik göstermesidir (Song vd. 1986). Sıcaklık arttıkça Ayrıca artan numune sıcaklığıyla beraber engel yüksekliği değerinin artması, idealite faktörü değerinin azalması daha önce yapılan literatür çalışmaları ile benzerlik göstermektedir (Biber 2003, Özdemir vd. 2006, Yıldırım 2009, Vural vd. 2010, Korucu ve Duman 2013).

Tablo 5.2. Al/Alq3/p-Si/Al Schottky diyotlar için engel yüksekliği ve idealite faktörünün numune sıcaklığına göre değişimi

Numune Sıcaklığı (K)	Engel Yüksekliği (Φ_b)	İdealite Faktörü (n)
320	0,83	1,47
300	0,79	1,61
280	0,75	1,62
260	0,71	1,71
240	0,68	1,76
220	0,64	1,84
200	0,61	1,89
180	0,56	2,01
160	0,52	2,12
140	0,47	2,29
120	0,42	2,41
100	0,36	2,97
80	0,31	3,19

5.4.2. Fotovoltaik Ölçümler

Fotovoltaik aygıtlar, üzerlerine düşen ışık şiddeti arttırıldıkça ters beslem bölgesindeki akımlarını arttıran bir yapıya sahiptir (Bhataccharya 1997). Şekil 5.7’de Referans numunesinin karanlık ve 30-100 mW/cm² ışık şiddeti altında elde edilen yarı logaritmik akım-gerilim grafiği gösterilmiştir. Işık şiddeti arttırıldıkça ters beslem bölgesindeki akımın arttığı görülür.



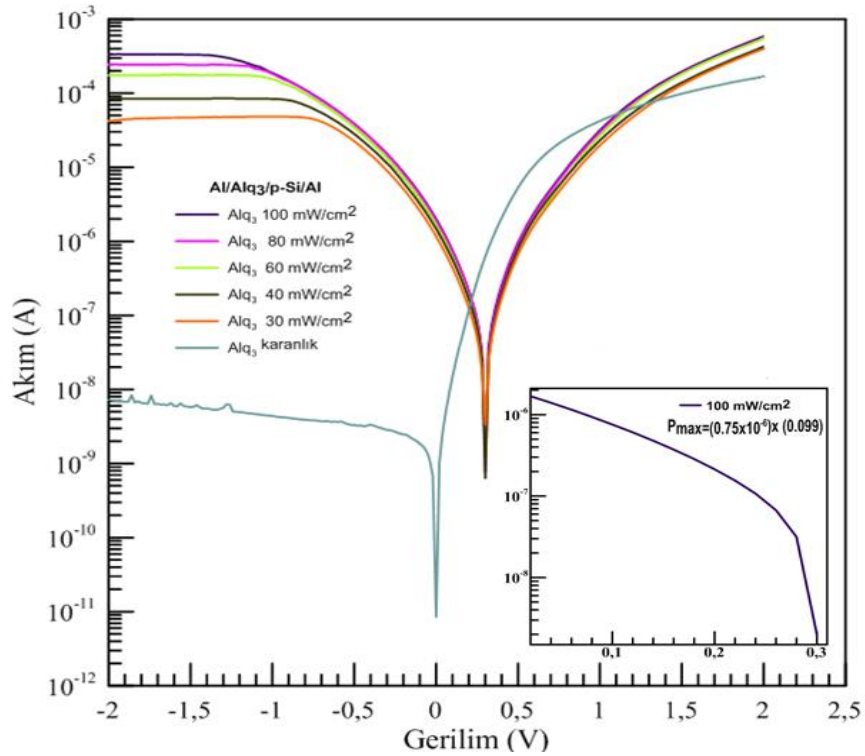
Şekil 5.7. Referans numunesinin (Al/p-Si/Al) karanlık ve 30-100 mW/cm² ışık şiddeti altında lnI-V grafiği

Tablo 5.2’de Referans numunesinin 30-100 mW/cm² ışık şiddeti altında akım-gerilim ölçümlerinden elde edilen I_{sc} , V_{oc} , I_{max} , V_{max} , doluluk oranı (FF) ve güneş enerji verimi değerleri verilmiştir. 100 mW/cm² ışık şiddeti altında Al/p-Si/Al diyot yapısının kısa devre akımı $6,66 \times 10^{-3}$ mA, açık devre voltajı 260 mV, fill faktörü %17,1, güneş enerji verimi %0,037 olarak hesaplanmıştır. Tablo incelendiğinde ışık şiddeti arttırıldıkça diyotun ışığa karşı duyarlılığının, yani veriminin azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni donör-akseptör konsantrasyonundan kaynaklı elektronların uyarılma sürelerinin çok kısa olmasıdır (Jayakrishnan vd. 2011, Kanda vd. 2016).

Tablo 5.3. Al/p-Si/Al diyodunun 30-100 mW/cm² ışık şiddeti altında lnI-V grafiğinden elde edilen I_{sc}, V_{oc}, I_{max}, V_{max}, Doluluk oranı (FF) ve Güneş enerji verimi (n) değerleri

Işık Şiddeti (mW/cm ²)	I _{sc} (mA)	V _{oc} (mV)	I _{max} (mA)	V _{max} (mV)	Doluluk Oranı (FF)	Güneş Enerji Verimi (n)
30	6,43E-03	260	2,83E-03	79,92	13,52	0,096
40	5,95E-03	260	3,18E-03	79,92	16,4	0,080
60	6,67E-03	260	3,52E-03	79,92	16,2	0,059
80	7,37E-03	260	3,88E-03	79,92	16,2	0,049
100	6,66E-03	260	3,72E-03	79,92	17,1	0,037

Şekil 5.8’de Al/Alq₃/p-Si/Al diyot yapısının karanlık ve 30-100 mW/cm² ışık şiddeti altında elde edilen yarı logaritmik akım-gerilim grafiği gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde Al/Alq₃/p-Si/Al diyot yapısı üzerine düşen ışık şiddeti arttırıldıkça ters beslem bölgesindeki akımın arttığı görülür. Bu durumdan hazırlanmış diyot yapısının fotodiyot özelliği gösterdiği anlaşılr.



Şekil 5.8. Al/Alq₃/p-Si/Al diyot yapısının karanlık ve 30-100 mW/cm² ışık şiddeti altında lnI-V grafiği

Tablo 5.4’de Al/Alq₃/p-Si/Al diyot yapısının 30-100 mW/cm² ışık şiddeti altında akım-gerilim ölçümlerinde elde edilen I_{sc} , V_{oc} , I_{max} , V_{max} , doluluk oranı (FF) ve Güneş enerji verimi değerleri verilmiştir. 100 mW/cm² ışık şiddeti altında Al/Alq₃/p-Si/Al diyot yapısının kısa devre akımı $0,97 \times 10^{-3}$ mA, açık devre voltajı 300 mV, fill faktörü %14,97, güneş enerji verimi %0,031 olarak hesaplanmıştır. Tablo incelendiğinde ışık şiddeti arttıkça diyotun güneş enerji verimi artmıştır.

Tablo 5.4. Al/Alq₃/p-Si/Al diyodunun 30-100 mW/cm² ışık şiddeti altında lnI-V grafiğinden elde edilen I_{sc} , V_{oc} , I_{max} , V_{max} , Doluluk oranı (FF) ve Güneş enerji verimi (η) değerleri

Işık Şiddeti (mW/cm²)	I_{sc} (mA)	V_{oc} (mV)	I_{max} (mA)	V_{max} (mV)	Doluluk Oranı (FF)	Güneş Enerji Verimi (η)
30	0,97E-03	300	0,44E-03	99,90	15,01	0,018
40	1,23E-03	300	0,56E-03	99,90	15,22	0,024
60	1,39E-03	300	0,62E-03	99,88	14,77	0,026
80	1,61E-03	300	0,73E-03	99,88	15,05	0,030
100	1,67E-03	300	0,75E-03	99,88	14,97	0,031

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada yarıiletken malzeme olarak (100) yöneliminde 1-10 Ω -cm öz dirence sahip p-Si yarıiletkeni kullanıldı. Fabrikasyonu yapılan organik arayüzey malzemeli ve arayüzeysiz (referans) diyot yapılarının deneysel I-V (akım-gerilim) karakteristiklerinden sıcaklığa ve ışığa bağlı parametreler hesaplanarak karşılaştırıldı. Ayrıca organik arayüzey malzemesi olarak kullanılan Tris-(8-hydroxyquinoline) alüminyum molekülünün optik özellikleri UV cihazı kullanılarak, yüzey morfolojisi ise SEM ve AFM cihazları kullanılarak incelendi.

Fabrikasyonu yapılan referans ve organik arayüzey malzemeli diyot yapılarının idealite faktörleri ve engel yükseklikleri, elde edilen I-V grafiklerinin eğimlerinden hesaplandı. Yapılan hesaplamalar sonucu fabrikasyonu yapılan tüm diyot yapıları (referans ve organik arayüzeyli) için $n > 1$ olduğundan, ideal olmayan davranış gösterdikleri söylenebilir. İdealite faktörünün 1'den büyük olmasının nedeni metal-yarıiletken yüzeyde oluşan oksit tabaka ve arayüzey yüklerinin varlığından kaynaklanabilmektedir (Ejderha vd. 2010). Al/Alq₃/p-Si/Al diyot yapısı için artan numune sıcaklığıyla beraber engel yüksekliği değeri artmış, idealite faktörü değeri azalmıştır. Bu durum daha önce yapılan literatür çalışmaları ile uyumluluk içerisindedir (Biber 2003, Özdemir vd. 2006, Yıldırım 2009, Vural vd. 2010, Korucu ve Duman 2013). Organik arayüzey malzemesi kullanılan Al/Alq₃/p-Si/Al diyot yapısı, referans numunesine göre kıyaslandığında ideallikten daha fazla uzaklaşmıştır.

Fotodiyotlar üzerlerine düşen ışık şiddeti arttırıldıkça, ters beslem bölgesindeki akımları arttıran bir yapıya sahip olduklarından (Bhataccharya 1997), fabrikasyonu yapılan referans ve organik arayüzey malzemeli diyotların ışık şiddetini elektriksel sinyallere dönüştürdüğünü, dolayısıyla fotodiyot özelliğe sahip olduğunu gösterir. Işık şiddeti 30-100 mW/cm² aralığında arttırıldığında her iki diyotunda doğru akım bölgesindeki akım fazla değişmemesine rağmen, ters beslem bölgesindeki akım artış göstermektedir.

Al/Alq₃/p-Si/Al diyot yapısı referans numunesine kıyasla ters beslem bölgesindeki akımı daha fazla arttırmıştır. Buradan Alq₃ organik arayüzey malzemesinin fotodiyot özelliği arttırdığı sonucuna varılabilir.

Sonuç olarak organik arayüzey malzemesi Alq₃ kullanılarak fabrikasyonu yapılan Al/Alq₃/p-Si/Al diyot yapısı, referans numunesine göre kıyaslandığında her ne kadar diyotu ideallikten uzaklaştırmışsa da fotodiyot özelliğini arttırdığı görülmüştür. Bu sonuçlar neticesinde organik tabanlı fotodiyot üretiminde Alq₃ organik molekülünün araştırma ve geliştirme çalışmalarında kullanılabileceği sonucuna varılmakla birlikte, organik Alq₃ arayüzey malzemesinin farklı sıcaklıklarda ve yoğunluklarda kontrollü bir şekilde uygulanması durumunda daha verimli sonuçlar elde edileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Ağar M (2015) Sıvılardaki ağır metal iyonlarının ve bakterilerinin algılanması için biyosensörlerin geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

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

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

Baraz N, Yücedağ İ, Azizian-Kalandaragh Y, Altındal Ş (2017) Determining electrical and dielectric parameters of dependence as function of frequencies in Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) structures. Journal of Materials Science: Materials in Electronics 28(2): 1315–1321

Bhattacharya P (1997) Semiconductor Optoelectronic Devices. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey

Biber M (2003) Low-temperature current-voltage characteristics of MIS Cu/n-GaAs and inhomogeneous Cu/n-GaAs Schottky diodes. Physica B: Condensed Matter 325: 138-148

Bolognesi A, Botta C, Cecchinato L, Fattori V, Cocchi M (1999) Poly(3-pentylmethoxythiophene)/Alq3 heterostructure light emitting diodes. Synthetic Metals 106(3): 183–186

Braun F (1874) Über die stromleitung durch scwefelmetalle. Ann. Phys. Chem. 229: 556-563

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

Card HC, Rhoderick EH (1971) Studies of tunnel MOS diodes II. Thermal equilibrium considerations. *Journal of Physics D: App. Physics* 4: 10

Cerniuke I, Sliuziene K, Grigaliunaite G, Lisauskas V, Maneikis A, Vengalis B (2013) Influence of preparation conditions on electrical properties of the Al/Alq₃/Si diode structures. *Materials Science* 19(4): 363-366

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

Crowel CR, Sze SM, Spitzer WG (1964) Equality of the temperature dependence of gold-silicon surface barrier and silicon energy gap in Au n-type Si diode. *Appl. Phys. Lett.* 4: 91-92

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

Dediu V, Murgia M, Maticotta FC, Taliani C, Barbanera S (2002) Room temperature spin polarized injection in organic semiconductor. *Solid State Communications* 122(3–4): 181–184

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

Dinek T (2006) CdO yarıiletken bileşiminin spray pyrolysis yöntemi ile elde edilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı, Eskişehir

Duman S, Ejderha K, Yiğit Ö, Türüt A (2012) Determination of contact parameters of Ni/n-GaP Schottky contacts. *Microelectronics Reliability* 52(6): 1005-1011

Ejderha K, Yıldırım N, Türüt A, Abay B (2010) Influence of interface states on the temperature dependence and current-voltage characteristics of Ni/p-InP Schottky diodes. *Super lattices and Microstructures* 47: 241-252

Frederik CK, Jon EC, Nicolaj CB, Andersen M, Mathilde RL, Mark AH, Soren H (2005) Lifetimes of organic photovoltaics: photochemistry, atmosphere effects and barrier layers in ITO-MEHPPV:PCBM-aluminium devices. *Solar Energy Material and Solar Cells* 86: 499-516

Göndük M (2017) Au/n-Si/Al Schottky diyotlarda arayüzey hallerinin akım-voltaj karatersitiklerine etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Bingöl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bingöl

Greenwood NN, Earnshaw A (1995) Chemistry of the elements, Pergamon Press, Oxford, London

Hovel HJ (1975) Solar Cells, Semiconductors and Semimetals, Vol. 11 (Eds., R.K. Willardson ve A.C. Beer), Academic Press, New York

Jayakrishnan R, Gandhi S, Suratkar P (2011) Correlation between solar cell efficiency and minority carrier lifetime for batch processed multicrystalline Si wafers, Mater. Sci. Semicond. Process. 14:223–228

Kanda H, Uzum A, Harano, N, Yoshinaga S, Ishikawa Y, Uraoka Y, Fukui H, Harada T, Ito S (2016) Al₂O₃/TiO₂ double layer anti-reflection coating film for crystalline silicon solar cells formed by spray pyrolysis. Energy Sci. Eng. 4: 269–276

Kavcar N (1985) İnce filmlerde optik yöntemlere kısa bir bakış. Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Edebiyet Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi, Sivas

Kim SG, Kim KW, Park EW, Choi D (2002) Silicon-induced cell wall fortification of rice leaves: A possible cellular mechanism of enhanced host resistance to blast, Phytopathology 92: 1095-1103

Knupfer M, Peisert H, Schweieger T (2002) Band-gap and correlation effects in the organic semiconductor Alq₃, Phys. Rev. B. 65, 33204

Korucu D, Duman S (2013) Current-voltage-temperature characteristics of Au/p-InP barrier diode. Thin Solid Films 531: 436-441

Krebs FC (2008) Polymer Photovoltaics: A Practical Approach. Spie, Washington-USA, p. 315

Li X, Li J, Li Y, Xia K (2015) Surface modification and characterization of 8-hydroxyquinoline aluminum/nano-TiO₂. Journal of Luminescence 171: 131–137

Lonergan M (2004) Charge transport at conjugated polymer-inorganic semiconductor and conjugated polymer-metal interfaces. Annual Review Physical Chemistry 55: 257-298

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

Mott NF (1938) Note on contact between a metal and an insulator or semi-conductor. *Proc. Camb. Phil. Soc.* 34: 568-572

Mönch W (1987) Role of virtual gap states and defects in metal-semiconductor contacts. *Phys. Rev. Lett.* 58(12): 1260-1263

Orak İ (2013) Saçtırma yöntemiyle elde edilen Co/n-GaP schottky diyotların tavlama ve numune sıcaklığına bağlı elektriksel karakterizasyonu. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum

Osvald J, Burian E (1997) C-V Dependence of inhomogeneous Schottky Diodes. *Solid-State Electronics* 42(2): 191-195

Özdemir AF, Türüt A, Kökçe A (2006) The double Gaussian distribution of barrier heights in Au/n-GaAs Schottky diodes from I-V-T characteristics. *Semicond. Sci. Technol.* 21: 298-302

Raven JA (1983) The transport and function of silicon implants. *Biol Rev.* 58: 179-207

Rhoderick EH (1978). *Metal-Semiconductor Contacts*. Oxford University, Clarendon Press, Oxford

Rhoderick EH, Williams RH (1988) *Metal-Semiconductor Contacts*. 2nd ed., Oxford University Press, Clarendon, Oxford. 1-257

Saçak M (2002) İletken polimerler. *Polimer Kimyası*, Ankara Üniversitesi, Gazi Kitabevi, Ankara

Sajjad S (2013) Organik tabanlı güneş pili üretimi ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

Serin T, Serin N, Karadeniz S, Sari H, Tuğlioğlu N, Pakma O (2006) Electrical structural and optical properties of SnO₂ thin films prepared by spray pyrolysis. *Journal of Non-Crystalline Solids* 352: 209-215

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

Schottky W (1938) The development of silicon crystal rectifiers for microwave radar receivers. *Z. Phys.* 113: 367-414

Song YP, Van Meirhaeghe RL, Lafle're WH, Cardon F (1986) On the difference in apparent barrier height as obtained from capacitance–voltage and current–voltage–temperature measurements on Al/p-InP Schottky barriers. *Solid-State Electron* 29: 633–638

Sze SM (1981) *Physics of Semiconductor Devices*. 2nd ed., Wiley, New York

Tagaya M, Shinozaki K, Maruko Y (2017) A Simple Incorporation Route of Tris (8-hydroxyquinoline) aluminum (III) into Transparent Mesoporous Silica Films and Their Photofunctions. 2017, Li W, *Journal of Applied Chemistry*, www.hindawi.com

Tang CW, Vanslyke SA (1987) Organic electroluminescent diodes. *Applied Physics Letters* 51(12): 913–915

Tung, R. T. (2001) Recent advances in Schottky barrier concepts. *Materials Science and Engineering R Reports* 35(1–3): 1–138

Turgut G, Keskenler EF, Aydın S, Sönmez E, Doğan S, Düzgün B, Ertuğrul M (2013) Effect of Nb doping on structural, electrical and optical properties of spray deposited SnO₂ thin films. *Superlattices Microstructure* 56 (2013): 107–116

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

Uzun S (2006) Anilin, 3-Metiltiyofen Ve Pirel Monomerlerinin Asidik Ortamlardaki Davranışları Ve Kimyasal Polimerizasyonları. Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı, Tokat

Vural Ö, Şafak Y, Altındal Ş, Türüt A (2010) Current-voltage characteristics of Al/Rhodamine-101/n-GaAs structures in the wide temperature range. *Current Applied Physics* 10: 761-765

Yamaguchi S, Iida T, Matsui K (2017) Formation of flower-like crystals of Tris (8-hydroxyquinoline) aluminum from 8-Hydroxyquinoline on anodic porous alumina. 2017, Tashiro K, *Advanced in Materials Science and Engineering*, www.hindawi.com

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, Farooq WA (2011) Electrical characterization of p-Si/fullerene-C₆₀ heterojunction photodiode. Optoelectronics and Advanced Materials 5(2): 153–156

Yakuphanoglu F, Kandaz M, Yarařır MN, řenkal BF (2007) Electrical transport and optical properties of an organic semiconductor based on phthalocyanine. Physica B. 393: 235-238

Yazıcı E (2011) Organik pil elektrodu tasarımı için elektronik yapı teorisi. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze

Yıldırım N (2009) Saçtırma Yöntemiyle Hazırlanan Ni/n-GaAs Schottky engel diotların karakteristik parametrelerinin tavlama ve numune sıcaklığına bağılı değışimleri. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum

Yıldız M (2012) Çinko Ftalosiyanın tabanlı heteroeklemin elektriksel özelliklerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır

Ziel AV (1968) Solid State Physical Electronics. Prentice-Hall, Inc., New-Jersey, 245

ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında Bingöl’de doğdu. İlk ve ortaöğretimini Bingöl’de tamamladı. 2007 yılında Kahramanmaraş Sütçü imam Üniversitesi Elektrik-Elektronik Bölümünü kazandı, 2011 yılında mezun oldu. 2013 yılında Bingöl Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığında Elektrik-Elektronik Mühendisi olarak çalışmaya başladı. 2014 yılında Bingöl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans eğitimine başladı. Evli ve iki çocuk babasıdır.