

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ORGANİK TABANLI GÜNEŞ PİLİ ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

SAEEDULLAH SAJJAD

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI
FİZİK PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. AHMET ALTINDAL**

İSTANBUL, 2013

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORGANİK TABANLI GÜNEŞ PİLİ ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Saeedullah SAJJAD tarafından hazırlanan tez çalışması 23.08.2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Ahmet ALTINDAL

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ahmet ALTINDAL

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Mustafa OKUTAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Fatih Dumludağ

Marmara Üniversitesi



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, güvenin ve desteğini bana her zaman hissettiren değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet ALTINDAL'a samimi teşekkürlerimi bildiririm.

Yüksek lisans eğitimim sırasında gösterdikleri her türlü destek ve yardımlarından dolayı değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Zeynel YALÇIN, Prof. Dr. Orhan İÇELLİ ve Doç. Dr. Mustafa OKUTAN'a şükranlarımı sunarım.

Değerli arkadaşlarım Hüsnü KARA, Hidayet GÖK ve Özlem YAĞCI'ya desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca, Lisans ve Yüksek Lisan öğrenimim boyunca karşılaştığım zorlukları aşmamda maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen değerli aileme teşekkürlerimi sunarım.

Ağustos, 2013

Saeedullah SAJJAD

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	5
1.3 Hipotez	6
BÖLÜM 2	
GENEL BİLGİLER.....	7
2.1 Yarıiletken / Metal Eklemler	7
2.2 Organik Güneş Pillerinin Fiziği	7
2.3 Organik Güneş Pillerinin Performans Parametreleri	9
2.3.1 Güç Dönüşüm Verimi	9
2.3.2 Açık Devre Gerilimi	11
2.3.3 Kısa Devre Akımı	14
2.3.4 Dış Kuantum Verimi	14
2.4 Güneş Pillerinde Kayıp Mekanizmaları	15
2.4.1 Yansıma Kayıpları	16
2.4.2 Yeniden Birleşme Kayıpları	16
2.4.3 Seri Direnç Kayıpları	18
2.4.4 Isıl Kayıpları	19
BÖLÜM 3	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	20
3.1 İnorganik / Organik Foto-Voltaik Hücrelerin Üretilmesi	20
3.1.1 İnorganik Yarıiletkenlerin Hazırlanması	21

3.1.2	Si Kristallerin Temizlenmesi	21
3.1.3	Ohmik Kontaktların Yapılması.....	22
3.1.4	Gözenekli Si'ların Hazırlanması.....	23
3.1.5	Organik Filmlerin Kaplanması	24
3.1.6	Fitalosyanin İnce Filmlerin Hazırlanması	24
3.1.7	C ₆₀ İnce Filmlerin Hazırlanması	26
3.1.8	Alq3 İnce Filmlerin Hazırlanması.....	27
3.2	Organik Tabanlı Foto-Voltaik Hücrelerin Üretilmesi.....	27
3.2.1	Metal Elektrotların Kaplanması	28
3.3	Foto-Voltaik Hücrelerin Elektriksel Karakterizasyonlarında Kullanılan Deneysel Düzenekler.....	28
BÖLÜM 4		
ELDE EDİLEN SONUÇLAR		30
4.1	İnorganik / Organik Tabakalı Yapılardan Elde Sonuçlar	30
4.2	Organik Tabakalı Yapılardan Elde Sonuçlar	35
BÖLÜM 5		
SONUÇ VE ÖNERİLER		40
KAYNAKLAR.....		42
ÖZGEÇMİŞ.....		46

SİMGE LİSTESİ

Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
Φ_M	Metalin iş fonksiyonu
q	Elektronun yükü
I	Akım
V	Gerilim
α	Absorpsiyon katsayısı
λ	Dalga boyu
η	Güç dönüşüm verimi
I_{sc}	Kısa devre akımı
V_{oc}	Açık devre gerilimi
P_{max}	Maksimum çıkış gücü
P_{GI}	Işığın gücü
I_L	Güneş pili tarafından üretilen akım
R_{sh}	Şönt direnci
R_L	Yük direnci
n	İdealite faktörü
k	Boltzman sabiti
T	Sıcaklık
I_0	Doyum akımı
J_{sc}	Kısa devre durumunda akım yoğunluğu
Φ	Birim alan başına ışık şiddeti
η_{DKV}	Dış kuantum verimi
η_{IKV}	İç kuantum verimi
η_A	Absorpsiyon verimi
η_{ED}	Eksiton difüzyon verimi
η_{YT}	Yük transfer kuantum verimi
η_{YA}	Ayrışma verimi
η_{Ytop}	Yük toplama verimi

KISALTMA LİSTESİ

Alq3	tris(8-hydroxyquinolino)aluminium
C ₆₀	Fullerene
FF	Dolgu faktörü
HOMO	Doldurulmuş en yüksek enerjili moleküler orbital
İTO	İndiyum kalay oksit
LUMO	Doldurulmamış en düşük enerjili moleküler orbital
PEDOT	poly(3,4-ethylenedioxythiophene)
P3HT	Poly (3-hexylthiophene)
SR	Spektral cevap
UV	Ultraviyole (morötesi)

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	İki Tabakadan Oluşan Bir Organik Güneş Pilinin Çalışma Prensibi.	8
Şekil 2.2	Bir Güneş Pilinin Karanlık ve Aydınlik Ortamlardaki I- V karakteristikleri	10
Şekil 2.3	Organik tabanlı Güneş Pilinin Elektriksel Eşdeğer Devresi	11
Şekil 3.1	Gözenekli Si'ların Oluşturulmasında Kullanılan Deneyesel Düzenek	24
Şekil 3.2	Foto-voltaik Hücrelerde Kullanılan Fitalosyanin Molekülü.....	25
Şekil 3.3	C ₆₀ 'ın Moleküler Yapısı.....	26
Şekil 3.4	I-V Karakteristiklerinin Ölçülmesinde Kullanılan Deneyesel Düzenek.....	29
Şekil 4.1	Aşındırma Süresinin n-GS/C ₆₀ /Al Yapıların I-V Karakteristiklerine Etkisi	31
Şekil 4.2	Aşındırma Süresinin n-GS/Pc/Al Yapıların I-V Karakteristiklerine Etkisi	32
Şekil 4.3	Organik Tabakanın n-GS/OT/Al Yapıların I-V Karakteristiklerine Etkisi	32
Şekil 4.4	Aşındırma Süresinin p-GS/C ₆₀ /Al Yapıların I-V Karakteristiklerine Etkisi	34
Şekil 4.5	ITO/Alq3/C ₆₀ /Al Tabakalarından Oluşan Yapının I-V Karakteristikleri.....	36
Şekil 4.6	ITO/C ₆₀ /Pc/Al Tabakalarından Oluşan Yapının I-V Karakteristikleri.....	37
Şekil 4.7	ITO/Pc/Alq3/Al Yapının I-V Karakteristikleri.....	38

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1	Kullanılan Si'un Oda Sıcaklığındaki Bazı Özellikleri	21
Çizelge 4.1	İnorganik/Organik Tabakalı Yapılardan Elde Performans Parametreleri..	35
Çizelge 4.2	Organik Tabanlı yapılardan Elde Edilen Parametreler	39

ORGANİK TABANLI GÜNEŞ PİLİ ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Saeedullah SAJJAD

Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet ALTINDAL

Organik elektronik malzemeler, hem optik absorpsiyonun hemde yük iletiminin kısmen π ve π^* orbitalleri tarafından kontrol edildiği konjuge katılardır. Organik yarıiletkenleri inorganik yarıiletkenlerden ayıran en önemli özellikleri, fotonlar tarafından oluşturulan eksitonların bağlanma enerjilerinin büyük olması, yük iletiminin bir band vasıtasıyla değilde yerelleşmiş durumlara arasındaki hoplamalarla sağlanması, absorpsiyon katsayılarının yüksek olması sayılabilir. Tek boyutlu bir yarıiletken olarak organik yarıiletkenlerin elektronik ve optik özellikleri anizotropi gösterebilir. Organik yarıiletkenlerin bu özelliği aygıt tasarımında oldukça yararlıdır. Organik yarıiletkenlerin bu özellikleri ve üretim işlemlerinin kolaylığı, esnek altlıklar için uygun olması gibi nedenlerden dolayı elektronik alanında oldukça ilgi çeken malzeme grubudur.

Alışılmış enerji kaynaklarının sınırlı olması, üretim maliyetlerinin yüksek olması gibi nedenlerden dolayı, yenilenebilir enerji kaynakları son yıllarda en büyük ilgiyi gören alanlardan birisidir. Bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak foto-voltaik aygıtlar Dünya enerji sorunun çözülmesinde üzerinde en çok çalışılan alanlardandır. Mükemmel yük iletim özelliği, yüksek güç dönüşüm verimi ve kararlılığından dolayı bugün, foto-voltaik aygıtların üretiminde büyük oranda silisyum (Si) tek kristalleri kullanılmaktadır. Foto-voltaik aygıt üretimi konusunda Si'ü gallium arsenide (GaAs) ve germanyum (Ge) diğer yarıiletkenlerden öne çıkaran diğer bir önemli nedende Si teknolojisinin oturmuş olması ve Si ile çalışmanın iyi biliniyor olmasıdır. Şu anda, Si gibi inorganik tabanlı foto-voltaik aygıtların veriminin organik tabanlı foto-voltaik aygıtlardan yüksek olmasına rağmen inorganik tabanlı aygıtların, üretim maliyetlerinin yüksek olması (yüksek

safılıkta Si tek kristallerinin üretimi oldukça pahalı sistemler gerektirmektedir), esnek altlıklar üzerine üretilmemeleri ve ulaşılacak verimin Si'un fiziksel özellikleri ile sınırlı olması gibi dezavantajları vardır. Dolayısıyla, ucuz ve verimli foto-voltaik aygıtların üretimi araştırmacıları organik malzemelere yönlendirmiş durumdadır. Hem iletken hemde yarıiletken özellik gösteren organik malzemeleın geliştirilmesi bu malzemelerin opto-elektronik alanlarda da kullanılmalarının yolunu açmıştır. Organik tabanlı foto-voltaik aygıtların geliştirilmesi, inorganik tabanlı aygıtlarla karşılaştırıldığında, birçok bakımdan büyük bir önem taşımaktadır. Bunlar; üretim esnasında malzeme kaybı ve enerji tüketiminin düşük olması dolayısıyla maliyetlerinin düşük olması, üretim işlemlerinin yüksek sıcaklıklar gerektirmemesi, esnek taşıyıcılar üzerine üretilebilmeleri olarak sıralanabilir. Ayrıca, organik malzemeler genelde yüksek absorpsiyon katsayısına sahiptirler. Bu, oldukça ince filmlerle yeterli miktarda ışığın absorplanabilmesi demektir. Tüm bu özellikleri, organik malzemeleri foto-voltaik aygıt üretimi konusunda araştırmaların odağına taşımaktadır. Organik tabanlı foto-voltaik aygıtların verimi konusunda dikkate değer ilerlemelerin kaydedilmesine rağmen hala inorganik tabanlı aygıtlarla karşılaştırılabilir seviyede değildir. Organik tabanlı aygıtlarda en temel problemlerden birisi, elektrot/organik malzeme ara yüzündeki yük taşıyıcıların iletimidir. Bu sorunu çözmek için gerek verici/katot gerekse alıcı/anot ara yüzündeki metal/organik eklemlerinde değişik yöntemler uygulanmaktadır. Bu ara yüzeylere bir yada daha fazla malzemeden oluşan tampon tabakaların kaplanması en sık başvurulan yöntemdir. Bu yöntemle aygıt performansında ciddi ilerlemelerin sağlandığı rapor edilmiştir.

Bu Yüksek Lisans tez çalışmasında, birisi inorganik/organik diğeri tamamen organik tabakalardan oluşan iki grup foto-voltaik aygıtların üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen gerek inorganik/organik gerekse organik/organik tabakalarından oluşan foto-voltaik aygıtlarda verici olarak fitalosiyenin bileşikleri alıcı tabaka olarak birisi fullerene (C₆₀) diğeri tris(8-hydroxyquinolino) aluminium (Alq₃) olan üzere iki farklı malzeme kullanılmıştır. İnorganik/organik tabakalarından oluşan aygıtlarda inorganik malzeme olarak özenekli hale getirilmiş p-tip ve n-tip Si tek kristalleri kullanılmıştır. Gözenekli Si'lar, p-tip ve n-tip Si tek kristallerinin sabit bir akım yoğunluğunda elektrokimyasal aşındırmaları suretiyle elde edilmişlerdir. Gözenek yarıçapı ve derinliğine bağlılığı incelemek amacıyla, Si'ların gözenekli hale getirilmelerinde akım yoğunluğu sabit tutulmuş aşındırma süreleri değiştirilmiştir. Aşındırma süresi 5, 10, 15 ve 20 dakika olarak seçilmiştir. Üretilen foto-voltaik aygıtların elektriksel özellikleri karanlık ve aydınlık ortamlarda akım-gerilim (I-V) karakteristikleri ölçülmek suretiyle belirlenmiştir. Bu ölçümlerden temel güneş pili parametreleri olan kısa devre akımı, açık devre gerilimi ve üç dönüşüm verimi gibi parametreler belirlenmiştir. Bu yapılar arasında maksimum güç dönüşüm verimi ITO/Alq₃/C₆₀/Al tabakalarından oluşan yapıda gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Organik elektronik, foto voltaik olay, yenilenebilir enerji, eksiton, açık devre gerilimi, kısa devre akımı

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF ORGANIC-BASED SOLAR CELLS

Saeedullah SAJJAD

Department of Physics

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Ahmet ALTINDAL

Organic electronic materials are conjugated solids where both optical absorption and charge transport are dominated by partly delocalised π and π^* orbitals and differ from inorganic semiconductors in the following important respects. Photogenerated excitations are strongly bound and do not spontaneously dissociate into charge pairs. Charge transport proceeds by hopping between localised states, rather than transport within a band. Absorption coefficients are high so that high optical densities can be achieved. As one-dimensional semiconductors, their electronic and optical properties can be highly anisotropic. This is potentially useful for device design. Due to their above special properties and ease of fabrication and compatibility with flexible substrates, organic materials have long attracted wide spread attention in the field of electronics.

Renewable, clean energy sources are gaining importance due to increase demand, cost and failure of conventional energy sources to meet the energy requirements of various sectors. Photovoltaic cells are considered as an important source of renewable energy to solve the world's energy shortage today. Silicon solar cells currently dominate the PV market, as they have demonstrated high power conversion efficiencies (PCE), due to the excellent charge transport properties and environmental stability of high purity silicon. Advantage of Si over other semiconductor devices is due to well developed microelectronics industry which has considerable knowledge of working with Si. This makes Si a better candidate for solar cells as compared to other semiconductor

material such as gallium arsenide (GaAs) or germanium (Ge). Currently, inorganic photovoltaic devices perform with higher photoelectric conversion efficiency and stability, than organic photovoltaic (OPV) devices. However, inorganic photovoltaic devices still have deficiencies, such as high manufacturing cost and solid construction, which hampers their application as cheap consumables and flexible electronic products. The methods used to manufacture high efficiency silicon solar cells are costly. Purification techniques used to produce high quality silicon, coupled with high temperature, low throughput manufacturing techniques lead to high energy costs, which is hindering the progress of PV. The search for low cost photovoltaics has led researchers to organic materials as possible candidates. The discovery of organic materials which have both conducting and semiconductor properties has led to new and exciting possibilities in the field of optoelectronic devices. The development of organic photovoltaic devices may play a key role in overcoming the deficiencies of inorganic photovoltaic devices, because they offer several advantages such as: Lower energy and material consumption during the manufacturing process, low cost, low temperature process compatible with flexible substrates, and extremely lightweight. Additionally, organic semiconductors have very high absorption coefficients, which allow very thin films to be used, whilst still absorbing a sufficient portion of the solar spectrum. This reduction in material used, coupled with low cost manufacturing techniques, implies that organic semiconductors have the potential to make a significant impact on the PV market. Hence, OPV devices with these significant advantages have attracted a great deal of attention, forcing researchers to invest a great deal of effort in pursuing higher photoelectric conversion efficiency. With more increase in power conversion efficiency and progress of stability, OSCs could be promising to make cost-effective devices as an alternative to the silicon-based solar cells. Although significant improvement in power conversion efficiency has been obtained, the efficiencies attained so far are still comparatively low and there is scope for further improvement in all three factors that impact power conversion efficiency namely, short-circuit current, open-circuit voltage and fill factor. A general problem in organic electrical devices is the transport of charge carriers at the interfaces electrode/organic material. A variety of interfacial treatments have been applied to both the cathode/organic and the anode/organic interfaces, different more or less thin buffer layers have been placed at these interfaces, resulting in varying degrees of devices improvement in terms of charge exchange.

In this thesis, organic and organic/inorganic photovoltaic devices based on solution processed phthalocyanine donor layer, fullerene (C_{60}) and: tris(8-hydroxyquinolinato)aluminium (Alq3) acceptor have been fabricated. For comparison, porous silicon and tin oxide coated glass were used as anode electrode materials and their effects on device characteristics were studied. Porous silicon (PS) was obtained by electrochemical etching of p-type and n-type Si wafers in hydrofluoric acid solution at a current density of 15 mA/cm^2 , the etching time being varied from 5 min to 20 min. for both type Si. The electrical properties of the produced photo-voltaic cells under dark and illumination conditions were investigated and different parameters such as open circuit voltage, short circuit current and maximum power efficiency were determined. It was found that the cell parameters depend on the anodization time

and the choice of anod electrode material is critical to cell performance. Maximum power conversion efficiency was obtained with the structure of ITO/Alq3/C₆₀/Al.

Key words: Organic elektronik, photovoltaic effect, renewable energy, exciton, open circuit voltage, short circuit current

1.1 Literatür Özeti

Organik malzemeler maliyetlerinin düşük olması, esnek altlıklar üzerine uygulanabilmeleri, moleküler yapılarında yapılacak küçük değişikliklerle oldukça farklı fiziksel özelliklere sahip malzemelerin elde edilebilmesi, üretim işlemlerinin kolay olması gibi nedenlerden dolayı elektroniğin en ilgi çekici malzeme grubudur [1],[2],[3]. Örneğin organik ışık yayan diyotlar gelecek nesil displayler olarak ticarileşmiş durumdadır [4]. Saf silisyum'un (Si) mükemmel yakın yük iletim özelliği ve sıcaklık, nem gibi çevresel etkilere karşı dayanıklılığının yüksek olması gibi nedenlerden dolayı güneş enerjisini doğrudan elektriğe çeviren foto-voltaik aygıtların üretiminde büyük oranda Si-tek kristali kullanılmaktadır [5] ve Si-tabanlı güneş pillerinde ulaşılmış en büyük verim %25'in üzerindedir [6]. Ancak yüksek verimli Si foto-voltaik aygıtların üretiminde kullanılan teknikler oldukça maliyetlidir. Yüksek saflıkta Si tek kristallerinin üretilmesi özel koşullar gerektirmekte buda, üretim maliyetini artırmaktadır [5]. Dolayısıyla, Si-tek kristaline alternatif olabilecek güneş pili malzemelerinin üretimi ve karakterizasyonu büyük bir ilgi odağı olmuş durumdadır [7]. Foto-voltaik aygıtların üretimi konusunda Si'a alternatif olabilecek malzeme arayışları bu alanda da gözleri organik malzemelere çevirmiş durumdadır [8],[9],[10]. C.W. Tang'ın [11] Cu-ftalosyanin ve perilen tetrakarboksilik türevi içeren iki tabakalı hetero-eklemlerde foto-voltaik etkiyi gözlemlemesinin ardından, organik tabanlı güneş pilleri üzerindeki çalışmalar büyük bir ivme kazanmış ve organik malzemelerin opto-elektronik alanındaki uygulamaları dışında diğer uygulama alanlarının belirlenmesi konusunda yoğun bir çalışma başlamıştır.

En basit haliyle bir organik foto-voltaik aygıt, iki iletken tabaka arasına sandviç edilmiş organik tabaka/tabakalardan oluşur. Bir foto-voltaik aygıtta güneş enerjisinin etkin bir şekilde elektrik enerjisine dönüştürülebilmesi için sırasıyla bazı foto-fiziksel olayların gerçekleşmesi zorunludur. Bunlar; foto-voltaik aygıt üzerine düşen ışığın absorplanması ile başlar. Işığın absorplanması elektronik olarak uyarılmış durumların oluşmasına neden olur. Böylece, inorganik yarıiletkenlerdeki elektron-boşluk çifti yerine eksitonlar oluşur. Bu eksitonların bağlanma enerjisi, inorganik durumla karşılaştırıldığında, oldukça yüksektir ve bu çiftlerin ayrışması aygıt içerisinde yaklaşık olarak 10^6 V/cm mertebesinde elektrik alan oluşturulmasını gerektirir [12]. Bu nedenle tek bir organik tabakanın iki iletken arasına sandviç edilmesinden oluşan foto-voltaik aygıtlarda verim çok düşüktür [13]. Bu uyarılmış durumlar elektron transferinin gerçekleşeceği bir ara yüzeyde oluşmalı ya da ara yüzeye doğru hareket etmelidir. Böylece, yükseltgenmiş ve indirgenmiş türler (boşluklar ve elektronlar) elektrik enerjisinin oluşacağı uçların tersi yönde hareket ederek bu uçlar arasında bir potansiyel farkının oluşmasına neden olur. Dolayısıyla, bir foto-voltaik aygıt en azından üç bileşenden oluşur. Bunlar; ışığın absorplandığı bir tabaka, bir boşluk iletim tabakası ile bir elektron iletim tabakasıdır [14]. Tipik bir Si tabanlı aygıtta olduğu gibi, çoğu durumda bir tabakanın birden fazla fonksiyonu vardır. Organik tabanlı aygıtlarda organik tabakalardan birisi hem absorpsiyon tabakası görevi hemde yük iletim tabakası görevi yapar. Bir organik tabanlı foto-voltaik aygıtın performansı ışık absorplayıcı maddenin moleküler yapısının yanı sıra yük iletim tabakası görevi yapacak malzeme ile bu malzemelerin ince filmlerinin hazırlanmasında kullanılan yöntem ve koşullara, ısıtma sıcaklığı ve süresine [15] ayrıca arayüzeyin elektronik ve morfolojik özelliklerine bağlıdır [16]. Organik foto-voltaik aygıtlar üzerinde yoğun olarak çalışılıyor olmasına ve bu aygıtların verimleri konusunda dikkate değer ilerlemelerin kaydedilmiş olmasına rağmen hala çözüm bekleyen birçok problemi vardır.

Organik tabanlı aygıtların en temel problemlerinden birisi elektrot/organik malzeme ara yüzeyinde yük taşıyıcılarının iletimidir [17]. Bu sorunu aşmak için anot/organik malzeme ve katot/organik malzeme ara yüzeylerine değişik türde ince tampon filmlerin kaplanması farklı yüzey işlemlerinin uygulanmasına kadar oldukça farklı yöntemler uygulanmıştır. Örneğin, anot olarak indiyum kalay oksit'in (ITO) kullanıldığı bir foto-

voltaik aygıtta ITO yüzeyine bir çeşit iletken polimer olan polystyrenesulfonik asit katkılanmış poly(3,4-ethylene dioxythiophene) (PEDOT: PSS) kaplanmasının elde edilen sonuçların tekrarlanabilirliğini artırdığı gözlemlenmiştir [17]. Bu nedenle, ITO yüzeyinin pasivasyonu ve istenen özellikte ITO yüzeyi elde edebilmek için tampon tabakası olarak değişik moleküler yapılara sahip organik ve inorganik (metal-oksitler gibi) malzemelerin kullanıldığı foto-voltaik aygıtlar üretilmiş ve bu tampon tabakalarının organik foto-voltaik aygıtların performansına etkisi incelenmiştir [18],[19],[20],[21]. Organik foto-voltaik aygıtlarda anot malzemesi olarak en yaygın kullanılan malzeme ITO'dur. Anot ile organik tabaka arasındaki seri direnci düşürmek için, organik tabanlı foto-voltaik aygıtlarda kullanılan anot malzemesinin iş fonksiyonunun yüksek olması istenir. ITO yüzeyinin O₂ plasma veya UV ozon ile oksitlemesinin ITO'nun iş fonksiyonunu 5 eV'a kadar artırdığı rapor edilmiştir [22].

Bugün, organik tabanlı foto-voltaik aygıtların diğer bir önemli problemi de atmosfer koşullarındaki kararsızlıklardır. Organik tabanlı foto-voltaik aygıtların kararsızlığı birçok grup tarafından ayrıntılı olarak incelenmiş ve tampon olarak kullanılan tabakada su moleküllerinin absorpsiyonunu, metal/organik malzeme ara yüzeyindeki reaksiyonları ve organik malzemenin oksitlenmesini içeren karmaşık bir mekanizma olduğu sonucuna varılmıştır [23],[24],[25]. Kawano vd. [26] çalışmalarında, organik tabanlı foto-voltaik aygıtlarda gözlemlenen bozulmaların en azından bir kısmının yapıda, tampon tabaka olarak kullanılan PEDOT: PSS'de absorplanan su moleküllerinden kaynaklandığını rapor etmişlerdir. Reese vd. [23] regioregular poly (3-hexylthiophene) (P3HT)/phenyl-C₆₁-butyric acid methyl ester (PCBM) tabakalarından oluşan foto-voltaik hücrelerde bozulma mekanizmalarını incelemişler ve gözlemlenen bozulmanın ana kaynağının metal/organik malzeme ara yüzeyinin olduğunu rapor etmişlerdir. Gevorgyan vd. [24] polimer foto-voltaik hücrelerde atmosfer koşullarında gözlemlenen performans kayıplarının yapıda aktif tabaka olarak kullanılan malzeme ile metal elektrotların O₂ ve H₂O ile kimyasal reaksiyonlarından kaynaklandığı sonucuna varmışlardır. Norrman vd. [27] yapıda elektrot olarak kullanılan Alüminyum'daki (Al) çok ince delikler vasıtasıyla difüze olduğunu ve aydınlatmanın bu difüzyonu hızlandırıldığını dolayısıyla aygıtın bozulmasını hızlandırıldığını gözlemlemişlerdir. Organik tabanlı aygıtlarda gözlemlenen bu kararsızlık problemini çözmek için çok

elektriksel özellikleri iyileştirilmiş organik malzemelerin kullanılması ve kılıflama gibi oldukça değişik yöntemler uygulanmaktadır. Son zamanlarda, Lee çalışma arkadaşları [28] P3HT/PCBM tabakalarından oluşan foto-voltaik aygıtlarda aktif tabakanın yüzeyinin ince bir TiO_x tabakası ile kaplanmasının yapının atmosferik koşullardaki kararlılığını artırdığını rapor etmişlerdir.

Mevcut organik tabanlı foto-voltaik aygıtların bir diğer temel problemide düşük verimleridir. Dolayısıyla, organik malzemelerin kullanıldığı yapılarda verimin artırılması yönünde de oldukça yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Bu konudaki çalışmaların en dikkat çekici tarafı, özellikle son yıllarda, farklı substitute gruplara sahip fitalosyanin bileşiklerinin yaygın olarak kullanılmaya başlanmasıdır. Mükemmel kimyasal kararlılıkları, yüksek boşluk hareketlilikleri, güneş spektrumunun maksimumuna yakın bölgede doğrusal absorpsiyon katsayıları gibi nedenler fitalosyanin bileşiklerini foto-voltaik aygıtlar konusunda ideal adaylar arasına sokmuştur [29]. Kushto ve çalışma arkadaşları [29] 10. grup fitalosyanin bileşiklerinin kullanıldığı metalli fitalosyaninler (MPc) ve C₆₀ tabakalarından oluşan foto-voltaik aygıtlar üretmişler ve bunların performanslarını karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar, kullanılan fitalosyanin bileşiğinin merkezinde bulunan metal türü ile MPc'nin iyonizasyon potansiyeli ve gözlemlenen açık devre gerilimi arasında sıkı bir ilişki olduğunu gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar, en büyük güç dönüşüm verimini ve açık devre gerilimini merkezinde ağır geçiş metallerinin bulunduğu Pc'lerin kullanıldığı aygıtlarda olduğunu rapor etmişlerdir. H.S. Soliman ve çalışma arkadaşları [30] p-Si /Kobalt Fitalosyanin (CoPc) tabakalarından oluşan hetero yapıların elektriksel iletim mekanizması ve foto-voltaik özelliklerini incelemişler ve 80 Mw/cm² aydınlatma altında açık devre geriliminin 0.46 V, kısa devre akım yoğunluğunun 18.67 mA/cm², güç dönüşüm veriminde %3.76 olduğunu rapor etmişlerdir. G.D. Sharma ve diğerleri [31], elektron transfer tabakası olarak TiO₂ ve foto-aktif tabaka olarak PbPc'nin kullanıldığı Al/TiO₂/PbPc/İTO ve Al/PbPc/TiO₂/İTO tabakalarından oluşan yapıların foto-voltaik özelliklerini incelemişler ve Al/TiO₂/PbPc/İTO tabakalarından oluşan yapının hem kısa devre akım yoğunluğu ve dolgu faktörünün hem de güç dönüşüm oranının daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. D. Y. Kim ve çalışma arkadaşları [32] AlPc/C₆₀ ve CuPc /C₆₀ yapılarının foto-voltaik özelliklerini incelemişler ve çalışmalarında, her iki yapısında kısa

devre akımlarının aynı (4.4 mA/ cm^2) fakat AlPc'nin kullanıldığı yapının güç dönüşüm oranının yaklaşık olarak iki kat daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Yazarlar çalışmalarında organik foto-voltaik aygıtların açık devre voltajları ile HOMO seviyeleri arasında oldukça sıkı bir ilişki olduğunu rapor etmişlerdir. ZnO/ZnPc hibrit güneş hücrelerinin foto-voltaik özelliklerinin incelendiği çalışmada araştırmacılar gözlemlenen foto akımın ZnO'nun uyarılmasından kaynaklandığını ve dolayısıyla ZnPc'nin uyarılmasının gözlemlenen foto-akıma hiçbir katkısının olmadığını rapor etmişlerdir [33]. G.D. Sharma ve diğer araştırmacılar [34] elektron verici olarak SnPc'nin kullanıldığı, alıcı malzemedeki fonksiyonel grupların hetero-eklem foto-voltaik aygıtlarının cevap karakteristiklerine etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar, üretilen aygıtlarda gözlemlenen açık devre gerilimi ve kısa devre akımının kökenini vericinin iyonizasyon potansiyeli ile alıcının elektron afinitesini göz önüne alarak açıklamaya çalışmışlar ve gözlenen foto-akımın alıcı malzemeyle bağlanan alıcı gruplarının sayısına bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir [35]. p-tip organik yarıiletken olarak ZnPc ve CuPc'nin ve n-tip tabakalar olarak tetrapiridin porfirin, PCM (4-(dicyano-methylene)-2-methyl-6-(4dimethylaminostyryl)-4Hpyron), Kumarin 6, N,N''-bis(2,5-di-tert-butylphenyl)-3,4,9,10-Perylene dicarboximide(BP-PTCD) ve C₆₀ olmak üzere beş farklı malzemenin kullanıldığı organik p-n eklemlerinin foto-voltaik özelliklerini incelemişlerdir. Yazarlar n-tip tabaka olarak Kumarin 6'nın kullanıldığı aygıtlarda foto-voltaik etki gözlemlemişler ve bunu Kumarin 6'nın LUMO seviyesinin yüksek olmasına bağlamışlardır. En büyük kısa devre akım yoğunluğunun C₆₀'ın kullanıldığı aygıtta, en büyük açık devre voltajında İTO/TiO₂/ C₆₀/CuPc/Au yapısında gözlemlemişlerdir. Burada kısa bir literatür özeti verilen ve her birinin burada tek tek özetlenmesi mümkün olmayan çalışmalar göstermektedir ki ftaloyanin bileşikleri alternatif malzeme arayışlarının odağı durumunda ve dolayısıyla fotovoltaik aygıt üretiminde Si'a alternatif olabilecek en ümit verici malzeme grubudur [36].

1.2 Tezin Amacı

Bu Yüksek Lisans tez çalışmasında temel olarak iki farklı yapıda foto-voltaik hücreler üretilerek bu yapılarda açık devre gerilimi, kısa devre akımı ve maksimum güç gibi temel parametreler incelenmiştir. Üretilen birinci grup foto-voltaik aygıtlar

inorganik/organik tabakalardan oluşurken ikinci grup aygıtlar tamamen organik tabakalardan oluşmaktadır. İnorganik/organik tabakalardan oluşan yapılarda inorganik malzeme olarak gözenekli hale getirilmiş n ve p tip Si'lar kullanılırken her iki yapıda organik tabaka olarak C₆₀, Pc ve tris(8-hydroxyquinolato)aluminium (Alq3) kullanılmıştır. İnorganik olarak gözenekli Si'ların kullanıldığı yapılarda gözenekli Si'lar elektrokimyasal aşındırma yöntemiyle elde edilmiştir.

1.3 Hipotez

Elde edilen verilerin analizinden, inorganik/organik tabakalardan oluşan foto-voltaik aygıtlarda temel güneş pili parametrelerinin Si'ların aşındırma süresine bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Bu yapılarda maksimum kısa devre akımı 20 dakika süreyle aşındırma işlemine tutulan n-GS/C₆₀/Al yapısında gözlemlenirken maksimum açık devre gerilimi 5 dakika süreyle aşındırma işlemine tutulan p-GS/Alq3/Al yapıda gözlemlenmiştir. Tamamen organik tabakalardan oluşan foto-voltaik aygıtlarda ise maksimum kısa devre akımı da maksimum açık devre gerilimide ITO/Alq3/C₆₀/Al tabakalarından oluşan foto-voltaik aygıtlarda gözlemlenmiştir.

BÖLÜM 2

GENEL BİLGİLER

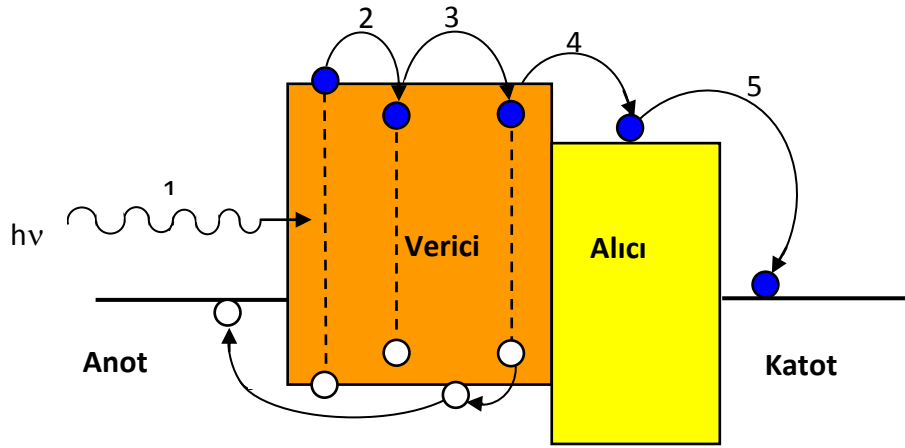
2.1 Yarıiletken / Metal Eklemler

En basit haliyle bir organik güneş pili, biri anot diğeri de katot görevi yapacak olan iki elektrot arasına sandviç edilmiş bir elektron alıcı tabaka ile bir elektron verici tabakadan oluşur. Dolayısıyla, bir güneş pilinde en azından üç eklem bulunur. Bir yarıiletken ile bir metal ya da iki yarıiletken malzeme arasındaki eklem doğası eklemdaki malzemelerin iş fonksiyonları tarafından belirlenir. Escklemi oluşturan malzemelerin iş fonksiyonları arasındaki farka bağlı olarak kontakt ohmik kontak veya Schottky kontakt olarak adlandırılır. Eğer n-tip bir yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s metalin iş fonksiyonu Φ_M 'den küçük ise böyle iki malzeme arasında bir doğrultucu (Schottky) kontakt oluşur. Böyle bir eklemden ulaşılabilecek en büyük foto voltaj $q(\Phi_M - \Phi_s)$ dir. Aksi durumda, n-tip yarıiletkenin iş fonksiyonunun metalin iş fonksiyonundan büyük olması durumunda, oluşan kontakt ohmik kontakt olarak adlandırılır.

2.2 Organik Güneş Pillerinin Fiziği

Bu bölümde kısaca, anot ve katot arasına sandviç edilmiş verici ve alıcı tabakalardan oluşan bir güneş pilinin fiziksel işleyişi açıklanacaktır. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi bir organik güneş pilinde aktif tabaka verici adı verilen düşük iyonizasyon potansiyeline sahip bir organik malzeme ile alıcı adı verilen yüksek elektron afinitesine sahip başka bir organik malzemedan oluşur. Tipik bir organik güneş pilinde toplam aktif tabaka kalınlığı 100 nm mertebesinde dir. Organik tabanlı güneş pillerinde anot olarak kullanılacak malzemenin hem elektriksel olarak iletken hemde optik olarak özellikle, görünür bölgedeki ışık için, geçirgen olması gerekir. Bu nedenle organik tabanlı güneş

pillerinde ITO (İndiyum Kalay Oksit) en çok kullanılan anot malzemesidir. Katot malzemesi olarak da Ca, Ag gibi düşük iş fonksiyonlu malzemeler kullanılmaktadır.



Şekil 2.1 İki Tabakadan Oluşan Bir Organik Güneş Pilinin Çalışma Prensibi.

Bu şekildeki bir güneş pilinde güneş enerjisinin elektriğe dönüştürülmesi beş aşamada gerçekleşen bir süreçtir. Bunlar; **(1)** güneş enerjisinin aktif tabaka tarafından absorplanması ile başlar. Böylece, hem verici hemde alıcı tabaka uyarılmış olur. Bir elektron, doldurulmuş en yüksek moleküler orbitalde (HOMO) bir boşluk bırakarak doldurulmamış en düşük moleküler orbitale (LUMO) geçiş yapar. Organik yarıiletken durumunda, inorganik yarıiletkenlerde olduğu gibi, bu elektron ve boşluk serbest halde değildir. Bunlar adına *eksiton* denilen birbirine Coulomb kuvvetiyle bağlı bir elektron-boşluk çifti şeklindedir. Absorpsiyon sonucu elektron-boşluk çiftlerinin oluşması ancak gelen ışığın enerjisinin optik band aralığından (HOMO ve LUMO enerji seviyeleri arasındaki fark) daha büyük olması durumunda gerçekleşir. **(2)** Fotonlar tarafından oluşturulan bu elektron-boşluk çiftlerinin bir kısmı ısımalı ya da ışımasız olarak birleşmeden verici malzeme ile alıcı malzemenin ara yüzeyine doğru hareket ederler. İdeal bir güneş pilinde oluşan eksitonların tamamının verici-alıcı ara yüzeyine ulaşması istenir. Dolayısıyla, aktif tabakanın kalınlığı üzerine düşen ışığın büyük bir kısmını soğurabilecek kadar kalın oluşan eksitonların yeniden birleşmeden ara yüzeye ulaşabilecekleri kadar da ince olmalıdır. Çoğu organik malzemede eksitonların difüzyon uzunluğu 10 nm [37] mertebesinde. Belirli bir dalga boyundaki ışığın bir madde

tarafından ne kadar hızlı ve etkin olarak absorplandığını ifade etmek için genellikle absorpsiyon katsayısı terimi kullanılır. Absorpsiyon katsayısı ışığın, absorplanmadan önce madde içerisine ne kadar girebildiğinin bir göstergesidir. Şiddeti I_0 olan belirli bir dalga boyundaki ışığın kalınlığı t olan bir ortamdan geçtikten sonraki şiddeti Beer-Lambert yasasına göre,

$$I = I_0 e^{-\alpha t} \quad (2.1)$$

ifadesi ile verilir. Burada, I_0 gelen ışığın şiddeti, t ışığın ilerlediği ortamın kalınlığı, α absorpsiyon katsayısı I ise, gelen ışığın madde içerisinde t kadar yol aldıktan sonraki şiddetidir. **(3)** Birleşmeden verici-alıcı arayüzeyine ulaşabilen eksitonlar, hem elektronlar ve boşluklar için bir potansiyel engelinin varlığından hemde dışarıdan uygulanan bir elektrik alanının varlığından dolayı elektron boşluk çiftlerine ayrışırlar. **(4)** Ara yüzeyde ayrışan yüklerden elektronlar, alıcı malzemenin elektron afinitesinin yüksek olmasından dolayı alıcı malzemeye aktarılırlar. Böylece, verici malzemenin doldurulmuş en yüksek enerjili orbitalinde (HOMO) bir boşluk alıcı tabakanın doldurulmamış en yüksek enerjili orbitalinde (LUMO) ise bir elektron bulunur. Şayet verici malzemenin iyonizasyon potansiyeli ile alıcı görevi yapan malzemenin elektron afinitesi arasındaki fark yeterli değil ise eksitonlar arayüzeyde elektron ve boşluk olarak ayrışmadan alıcı malzemeye geçebilir. **(5)** Organik tabanlı bir güneş pilinde elektrik enerjisinin elde edilmesindeki son aşamada, ayrışan yükler anot ve katot görevi yapan metal elektrotlarda toplanır ve böylece elektrotlar arasında bir potansiyel farkı oluşur.

2.3 Organik Güneş Pillerinin Performans Parametreleri

Bu bölümde güç dönüşüm verimi, açık devre gerilimi, kısa devre akımı, dolgu faktörü vb. gibi bir güneş pilinin performansını tanımlamada kullanılan parametrelerin kısa bir tanımı verilecektir.

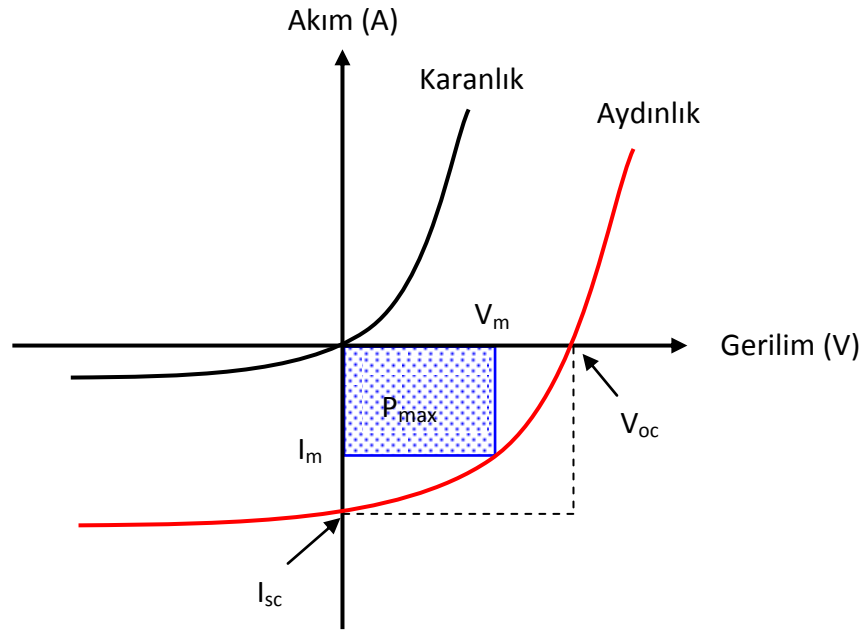
2.3.1 Güç Dönüşüm Verimi

Yukarıda oluşum mekanizması kısaca açıklanan foto elektronlar alıcı tabakanın LUMO seviyesine ulaşıncaya kadar enerjilerini fononlara aktarmak suretiyle potansiyel enerji kaybederler. Bu olay termalizasyon olarak bilinir. Termalizasyon olayı sonucu

yariletkenin band aralığı bir güneş pilinde elde edilebilecek gerilimin bir göstergesi olarak alınabilir. Büyük band aralığı daha yüksek gerilim demektir. Diğer yandan, düşük band aralıklı bir malzeme daha fazla foton absorplar ve böylece fotonlar tarafından oluşturulan yük taşıyıcılarının sayısı dolayısıyla foto akım artar. Dolayısıyla, bir güneş pilinin güç dönüşüm verimi kullanılan yariletkenin band aralığına bağlıdır. Bir güneş pilinin güç dönüşüm verimi η ,

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{GI}} \quad (2.2)$$

olarak tanımlanır. Burada $P_{\max}$ maksimum, pilden elde edilebilecek maksimum güç P_{GI} ise gelen ışığın gücüdür. Maksimum çıkış gücü $P_{\max}$, ölçülen akım-gerilim (I-V) karakteristiğinden bulunur. Şekil 2.2’de tipik bir güneş pilinin karanlık ve aydınlık ortamdaki I-V karakteristikleri gösterilmiştir. Maksimum çıkış gücü, aydınlık ortamda ölçülen I-V karakteristiğinin IV. bölgesinde elde edilebilecek en büyük alan ile belirlenir (taralı alan).



Şekil 2.2 Bir Güneş Pilinin Karanlık ve Aydınlık Ortamlardaki I-V karakteristikleri

Buna göre,

$$P_{\max} = I_m \cdot V_m \quad (2.3)$$

olacaktır. I_m ve V_m tarafından sınırlanan alanın kısa devre akımı I_{sc} ile açık devre gerilimi V_{oc} tarafından sınırlanan alana oranı da dolgu faktörü (FF) olarak tanımlanır. Yani,

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}} = \frac{P_{max}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (2.4)$$

olarak tanımlanır.

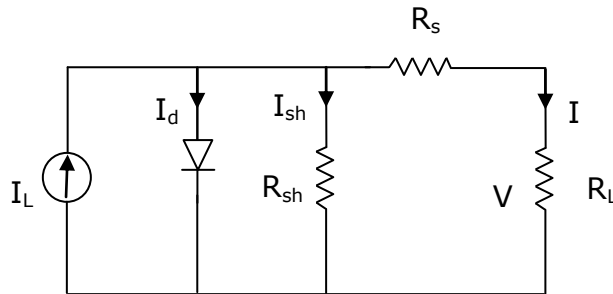
Buna göre λ dalga boylu ışık için güç dönüşüm verimi $\eta(\lambda)$,

$$\eta(\lambda) = \frac{I_{sc}(\lambda) \cdot V_{oc}(\lambda) \cdot FF(\lambda)}{P_{GI}} \quad (2.5)$$

olarak verilir.

2.3.2 Açık Devre Gerilimi

Yarıiletken tabanlı aygıtların elektriksel davranışını açıklamak için yapıyı, elektriksel bir eşdeğer devre ile temsil etmek sık kullanılan yöntemlerden biridir. Bu bölümde, elektriksel eşdeğer devresi kullanılarak bir güneş pili elde edilebilecek açık devre gerilimi için bir ifade elde edilecektir. Organik tabanlı bir güneş pili Şekil 2.3'deki gibi bir elektriksel eşdeğer devre ile temsil edilebilir. Elektriksel eşdeğer devrede, I_L ile gösterilen akım kaynağı aydınlatma sonucu güneş pili tarafından üretilen akımı temsil eder. I_L akımı, herhangi bir yeniden birleşme olmadan, birim zamanda ayrılan elektron-boşluk çiftlerinin sayısına eşittir.



Şekil 2.3 Organik tabanlı Güneş Pili'nin Elektriksel Eşdeğer Devresi

R_{sh} direnci (R_{sh} direncine şönt direnci denir), yük taşıyıcılarının verici-alıcı ara yüzeyindeki yeniden birleşmelerini temsil eder. Seri konumdaki R_s direnci, verici-alıcı

arayüzeyinden uzaktaki örneğin elektrotlar civarındaki yeniden birleşmeleri temsil eder. R_s direnci aynı zamanda, iletim ortamındaki yük taşıyıcıların hareketliliğini de içerir. Eşdeğer devrede bulunan diyot ideal bir diyot olup, gerilime bağlı direnç gibi davranır ve iletkenliğin, alıcı-verici arayüzeyindeki oluşum alanının (alıcının LUMO seviyesi ile vericinin HOMO seviyesi arasındaki fark) etkisini hesaba katmak için ve I-V karakteristiğinin doğrusal olmamasından dolayıdır. R_L yük direncinin uçları arasında oluşan V gerilimi, güneş pili tarafından üretilen gerilimi temsil eder ve değeri R_L yük direncinin değerine bağlı olarak 0 ile V_{oc} arasında değişir. Şekil 2.3'deki eşdeğer devrede bulunan dirençlerle akımların değeri aydınlatılan alana bağlıdır. Şimdi, Şekil 2.3'deki eşdeğer devreyi göz önüne alarak ve Kirchoff yasalarını kullanarak,

$$(I_L - I_d - I)R_s = V + IR_s \quad (2.6)$$

eşitliği yazılabilir. Bu ifade yeniden düzenlenerek,

$$I \left(\frac{R_s}{R_{sh}} + 1 \right) = I_L - I_d - \frac{V}{R_{sh}} \quad (2.7)$$

olarak yazılabilir. Devrede bulunan diyodun akımının gerilime bağlılığının Schokley denklemleriyle verileceğini varsayarsak yani,

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V - IR_s}{nkT/q}} - 1 \right) \quad (2.8)$$

olduğunu kabul eder ve I_d 'nin bu değerini Denklem (2.7)'de yerine yazarak yeniden düzenlersek,

$$I = \left(I_L - \frac{V}{R_{sh}} \right) \frac{R_{sh}}{R_{sh} + R_s} - I_0 \frac{R_{sh}}{R_{sh} + R_s} \left(e^{\frac{V - IR_s}{nkT/q}} - 1 \right) \quad (2.9)$$

ve $\frac{R_{sh} + R_s}{R_{sh}} = 1 + \frac{R_s}{R_{sh}}$ olduğu kullanılarak (2.9) ifadesi,

$$I = \frac{I_L - \frac{V}{R_{sh}}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} - \frac{I_0}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \left(e^{\frac{V - IR_s}{nkT/q}} - 1 \right) \quad (2.10)$$

olarak yazılabilir. İnorganik tabanlı güneş pillerinde R_s direncini değeri 0.3Ω ile birkaç Ω arasında değişirken R_{sh} direnci genelde 1000Ω 'dan büyüktür. Dolayısıyla, $\frac{R_s}{R_{sh}}$ oranı çok küçüktür. Organik tabanlı güneş pillerinde ise genelde, R_s direncinin değeri R_{sh} direncinden daha büyüktür.

Şimdi, öncelikle ideal bir güneş pili durumunda (bu durumda karanlık ortamdaki eşdeğer devre sadece ideal bir diyottan oluşur, $R_s = 0$ ve $R_{sh} = \infty$ dur) açık devre gerilimi için bir ifade elde edilebilir. Bu durumda Denklem (2.10),

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{qV_s}{nkT}} - 1 \right) \quad (2.11)$$

olarak ifade edilebilir. Aydınlatma ile birlikte ışık, diyodun I-V karakteristiğinin üzerine bindirilmiş bir I_L foto akımı oluşturacaktır. Bu durumda I akımı,

$$I = I_0 (e^{\frac{qV}{nkT}} - 1) - I_L \quad (2.12)$$

olacaktır. Bu durumda, elektrotlar arasında elde edilebilecek gerilimin en büyük değeri foto akımın karanlık akımını yok ettiği durumda elde edilir. Foto akımın karanlık akımını yok etmesi Denklem (2.12)'de $I = 0$ alınması olarak düşünülebilir. Denklem (2.12)'de $I = 0$ alınarak V çözülürse, buradan elde edilecek olan V değeri bir güneş pilinde elde edilebilecek açık devre gerilimi olacaktır. Bu yapılırsa,

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (2.13)$$

bulunur. Burada, n diyodun idealite faktörü, k Boltzman sabiti T ise sıcaklıktır. Denklem (2.13)'den açık bir şekilde görülmektedir ki I_L/I_0 oranının açık devre gerilimi üzerindeki etkisi çok küçüktür. Örneğin, I_0 akımının 10 kat düşürülmesi açık devre gerilimi V_{oc} 'yi sadece 25 mV kadar artırır. R_{sh} direncinin etkisini de hesaba katılması durumunda açık devre geriliminin ifadesi denklem (2.10)'da çıkış akımının değeri sıfıra eşitlenerek bulunabilir [38]. Bu yapılırsa V_{oc} ,

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_L - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.14)$$

olarak bulunur. V_{oc} için bulunan bu ifade elde edilebilecek maksimum çıkış gerilimini sadece ışık tarafından oluşturulan I_L akımı cinsinden değil aynı zamanda doyum akımı ve şönt direnci cinsinden ifade eder.

2.3.3 Kısa Devre Akımı

Kısa devre akımı I_{sc} , kısa devre koşullarındaki (Kısa devre koşulları elektriksel eşdeğer devrede $R_L = 0$ olması demektir) akımdır ve denklem (2.10)'da $V = 0$ alınarak bulunur. Şekil 2.3'de verilen elektriksel eşdeğer devrede R_L direncinin kısa devre yapılmasıyla açıktır ki kısa devre akımı I_{sc} ,

$$I_{sc} = I_L - I_{sh} - I_d \quad (2.15)$$

olacaktır. Denklem (2.15) bir güneş pilinden elde edilebilecek en büyük akımın ifadesidir. I_L ile gösterilen ışık akımı aydınlatma şiddeti ile doğrusal olarak artar. Fotonların hangi verimle dış devrede yüklere dönüştüğünü ifade etmek için kısa devre akımı ışık şiddeti cinsinden ifade edilmelidir. Bu, spektral cevap (SR) olarak adlandırılan bir büyüklük tanımlanarak yapılır. Spektral cevap,

$$SR(\lambda) = \frac{J_{sc}}{\Phi(\lambda)} \quad (2.16)$$

olarak tanımlanır. Burada, J_{sc} kısa devre durumundaki akım yoğunluğu Φ ise birim alan başına düşen ışık şiddetidir. Spektral cevap, güneş pili üzerine düşen ışığın birim gücü başına dış devrede oluşan akımı ifade eder.

2.3.4 Dış Kuantum Verimi

Kesim 2.2'de "Organik Güneş Pillerinin Fiziği" başlığı altında kısaca açıklanan basamakların her birisi belirli bir verimle gerçekleşir. Bir güneş pilini karakterize etmekte kullanılan parametrelerden biriside dış kuantum verimidir (η_{DKV}). Dış kuantum

verimi, güneş pili üzerine düşen fotonların ne kadarının foto akıma dönüştüğünün bir göstergesidir ve,

$$\eta_{DKV} = \frac{\text{Dış devredeki elektronların sayısı}}{\text{Gelen fotonların sayısı}}$$

olarak tanımlanır. Dış kuantum verimi, bir güneş pilinde ışık enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi esnasında gerçekleşen beş olayın her birindeki verimlerin çarpımına eşittir. Buna göre η_{DKV} ,

$$\eta_{DKV} = \eta_A \cdot \eta_{ED} \cdot \eta_{YT} \cdot \eta_{YA} \cdot \eta_{Ytop}$$

olarak ifade edilebilir. Burada η_A absorpsiyon verimi, η_{ED} eksiton difüzyon verimi, η_{YT} yük transfer kuantum verimi, η_{YA} ayrışma verimi η_{Ytop} ise yük toplama verimidir. Dış kuantum verimi, bir fotonun enerjisinin hc/λ olduğu göz önüne alınarak, spektral cevaptanda elde edilebilir. Bu durumda dış kuantum verimi,

$$\eta_{DKV}(\lambda) = SR(\lambda) \cdot \frac{hc}{q\lambda} \quad (2.17)$$

şeklinde ifade edilir. Yarıiletken malzemelerde gerçekleşen fiziksel olayların tam olarak anlaşılabilmesi için özellikle, organik tabanlı güneş pillerinde dış kuantum veriminden çok daha faydalı bir kavram iç kuantum verimidir (η_{IKV}). İç kuantum verimi, gelen toplam foton sayısından daha ziyade absorblanan foton sayısını dikkate alır ve

$$\eta_{IKV} = \frac{\eta_{DKV}}{1 - R(\lambda) - T(\lambda)} \quad (2.18)$$

şeklinde tanımlanır. Burada, $R(\lambda)$ ve $T(\lambda)$ sırasıyla ışığın yansıyan ve geçen kısımlarını gösterir.

2.4 Güneş Pillerinde Kayıp Mekanizmaları

Tezin bu bölümünde, bir güneş pilinin performans parametrelerini olumsuz yönde etkileyen kayıp mekanizmaları tanıtılacaktır. Bu kayıpların nedenlerinin bilinmesi, malzeme seçiminden kullanılan üretim tekniğine ve güneş pilinin tasarımına kadar bir çok konuda yön gösterici olacaktır. Bir güneş pilinde gözlemlenen kayıplar,

- Yansıma kayıpları
- Yeniden birleşme kayıpları
- Seri direnç kayıpları
- Isıl kayıplar

olmak üzere başlıca dört ana başlık altında toplanabilir. Burd listelenenkayıp mekanizmalarının her biri aşağıda kısaca açıklanmıştır.

2.4.1 Yansıma Kayıpları

Yansıma kayıpları, güneş pilinin ışığın düştüğü yüzeyde gözlenir. Adından da anlaşılacağı gibi, güneş pili üzerine düşen ışığın tamamının absorplanamay bir kısmının yüzeyden yansımından dolayıdır. Yüzeydeki yansılardan dolayı absorplanan foton sayısı dolayısıyla da foto elektronların sayısının azalmasına neden olur. Buda, kısa devre akımında bir azalmaya neden olur. Örneğin, Si tabanlı bir güneş pilinde yansımadan kaynaklanan kayıplar % 30 civarındadır. Güneş pillerinde yansımadan kaynaklanan kayıplar aktif tabakanın kırma indisine ve sönüm katsayısına bağlıdır. Bu parametrelerin her ikisi de dalga boyunun fonksiyonudur. Güneş pillerinde gözlemlenen yansıma kayıplarının azaltılması için yaygın olarak kullanılan yöntem güneş pilinin ışık düşen yüzeyinin yansımaları minimuma indirecek bir malzeme ile kaplanmasıdır. Bu yöntemle, Si tabanlı güneş pillerinde yansıma kayıpları %50 oranında azaltılabilmektedir. Kullanılacak anti-yansıtıcı malzemenin kırma indisi ve kalınlığı güneş pilinin performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

2.4.2 Yeniden Birleşme Kayıpları

Daha önce de bahsedildiği gibi, aktif tabakada absorplanan fotonlar adına eksiton denilen elektron-boşluk çiftlerinin oluşmasına neden olurlar. Oluşan bu elektron-boşluk çiftleri verici-alıcı arayüzeyine ulaştıklarında yeniden birleşmeden birbirlerinden ayrılmaları gerekir. Elektron-boşluk çiftleri birbirinden ayrılarak serbest haldeki yüklere dönüştürülemezlerse bu, güneş pilinde elektrotlar arasında potansiyel farkı oluşmasına neden olacak olan yüklerin kaybedilmesi demektir. Buda, güneş pilinde gözlemlenecek açık devre geriliminin azalması demektir. Güneş pillerinde, yeniden birleşme kayıpları yukarıda listelenen kayıp mekanizmaları arasında en baskın olanıdır. Elektron-boşluk

çifflerinin yeniden birleşmesi şeklinde orataya çıkan bu yeniden birleşme kayıplarına birçok mekanizmadan katkı gelir. Bunlar; (1) Band'dan band'a yeniden birleşme (2) Tuzaklar yardımıyla yeniden birleşme (3) Yüzeydeki yeniden birleşmeler (4) Auger yeniden birleşmeleri olarak sıralanabilir. Band'dan band'a yeniden birleşme direk band yapılı yarıiletkenlerde gözlemlenen bir mekanizmadır. Bu birleşmede, iletkenlik bandında bulunan bir elektronun valans bandında bulunan bir boşluk ile enerji salmak suretiyle birleşmesidir. Tuzaklar yardımıyla yeniden birleşme güneş pillerindeki en baskın yeniden birleşmedir ve güneş pilinde kullanılan malzemenin safsızlıklar içermesinden kaynaklanır. Bu safsızlıklar, yarıiletkenin band aralığında enerji seviyelerinin oluşmasına neden olur. Oluşan bu enerji seviyeleri elektron ve boşlukları yakalayarak bunların yeniden birleşmesine neden olan bir tuzak görevi yapar. Tuzaklar yardımıyla yeniden birleşme iki aşamalı bir süreçtir. Önce elektron ve boşluklar bu tuzaklarda yeniden birleşirler sonra da valans bandına dönerler. Yüzeydeki yeniden birleşmeler, kullanılan yarıiletken malzemenin yüzeyinin çok sayıda tamamlanmamış bağlar içermesinden kaynaklanır. Bu tamamlanmamış bağların her birisi bir yeniden birleşme merkezi görevi görür. Yüzeyde oluşturulan yükler bu tamamlanmamış bağlara düşerler ve orada boşluklarla birleşirler. Auger yeniden birleşmeleri özellikle güneş pili yüksek şiddette ışığa maruz bırakıldığında gözlemlenen bir yeniden birleşme mekanizmasıdır. Auger yeniden birleşmeleri üç parçacık içeren bir süreçtir. Valans bandında bulunan bir boşluk iletim bandındaki bir elektron ile birleştiğinde açığa çıkan enerji iletim bandında bulunan diğer bir komşu elektron tarafından absorplanarak elektronun daha yüksek bir enerji seviyesine çıkmasına neden olur. Bu elektron tekrar enerji salarak iletim bandına geri döner.

Bir güneş pilinde gözlemlenen yeniden birleşme kayıpları, elektron-boşluk çiftlerinin yeniden birleştiği bölgelere görede, (1) Yüzeydeki yeniden birleşmeler (2) Hacimdeki (Bulk) yeniden birleşmeler (3) Tükenim bölgesindeki yeniden birleşmeler (4) Metal-yarıiletken ara yüzeyindeki yeniden birleşmeler olarak sınıflandırılabilir. Yüzeydeki yeniden birleşmeler, yukarıda açıklandığı gibi, yüzeydeki tamamlanmamış bağların bir yeniden birleşme merkezi görevi görmesinden dolayıdır. Hacimdeki yeniden birleşmeler daha çok tuzak yardımcı yeniden birleşme kökenlidir. Hacimdeki yeniden birleşmeler organik güneş pillerinde alıcı ve verici görevi yapan malzemelerdeki azınlık

taşıyıcıların ömrüne bağlıdır. Tükenim bölgesinde gerçekleşen yeniden birleşmeler, bu bölgede bir elektrik alanının varlığından dolayı, yüzeydeki yeniden birleşmelerle karşılaştırıldığında daha az önemlidir. Tükenim bölgesindeki elektron-boşluk çiftleri yeniden birleşmeye fırsat bulamadan bu bölgedeki elektrik alan tarafından ayrıştırılırlar. Bu gölge meydana gelen yeniden birleşme ya band'dan band'a birleşme ya da tuzak yardımcı yeniden birleşmedir. Metal-yarıiletken ara yüzeyleri (güneş pilinde genelde iki tane metal-yarıiletken kontakt bulunur) oldukça büyük bir yeniden birleşme merkezleri oluştururlar. Tükenim bölgesindeki elektrik alan tarafından ayrıştırılan yüklerin dış devrede bir güç oluşturabilmesi için metal elektrotlar tarafından toplanması gerekir. Şayet, bu yükler metal elektrotta bulunan kusurların oluşturduğu yeniden birleşme merkezlerinde yeniden birleşirlerse bu kısa devre akımında bir kayıp demektir.

2.4.3 Seri Direnç Kayıpları

Bir güneş pilinde seri direnç kayıpları, (1) yayıcı tabakanın direnci (2) ön ve arka tarafta bulunan metal-yarıiletken kontaklarının direnci (3) yarıiletken tabakanın bulk direnci ve (4) metal parmakların direnci olmak üzere genelde bu dört bileşenden oluşur. Bu etkilerden kaynaklanan seri dirençten kaynaklanan kayıplar %20 civarındadır ve ışık şiddeti arttıkça artar. Yayıcı tabakanın direnci bu katkılar arasında en baskın olanıdır. Yayıcı tabakanın kalınlığı ve yayıcı tabakadaki akımın yönü bu tabakadan kaynaklanan kayıpları etkileyen faktörlerdir. Seri dirence bir diğer katkıda meta-yarıiletken kontaklarından gelir. Metal-yarıiletken hontakları, daha öncede bahsedildiği gibi, birisi doğrultucu diğeride ohmik kontakt olmak üzere iki farklı şekilde olabilir. Metal-yarıiletken arasındaki kontağın ne şekilde olacağı metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farka bağlıdır. Gerek doğrultucu gerekse ohmik kontakt durumunda eklemler arasında bir potnsiyel engeli oluşur ve doğrultucu kontakt durumunda bu potansiyel engeli elektrik alandan etkilenir. Ohmik kontakt durumunda mevcut potansiyel engeli her iki yöndeki yük akışlarını engellemez. Güneş pillerinde hem ön yüzey hemde arka yüzey, yüklerin toplanarak dış devreye aktarılması için metal ile kaplanır. Arka yüzeyde kullanılan metal kontaklar tüm yüzeyi kaplayacak şekilde iken ön yüzeydeki metal kontaklar genelde, parmaklı bir yapıya sahiptir. Parmaklar şeklinde

kaplanan metal elektrotlarda her bir parmak seri dirence bir katkıda bulunur. Güneş pillerinde kullanılan malzemelerin yüksek iletkenliklerinden dolayı genelde, bulk dirnci dolayısıyla bu dirnçten kaynaklanan kayıplar ihmal edilebilecek kadar küçüktür.

2.4.4 Isıl Kayıpları

Bir güneş pilindeki kayıpların en önemli bileşenlerinden birisi ısı kayıplardır. Genelde, güneş pilinin aktif tabakası tarafından absorplanan ışığın enerjisi bir elektron-boşluk çiftinin oluşması için gereken enerjiden daha fazladır. Bu fazlalık enerji, ısı olarak ortama bırakılır ve buda güneş pilinin ısınmasına neden olur. Band aralığı, difüzyon uzunluğu, azınlık taşıyıcıların ömrü ve katkısız taşıyıcı yoğunluğu güneş pilinin sıcaklığının artmasından etkilenen parametrelerden bazılarıdır. Güneş pilinin sıcaklığındaki artış ile, difüzyon uzunluğu, azınlık taşıyıcı konsantrasyonu ve katkısız taşıyıcı yoğunluğu artarken band aralığı azalır. Difüzyon uzunluğunun, azınlık taşıyıcı konsantrasyonunun ve katkısız taşıyıcı yoğunluğunun artması band aralığının azalması doyum akımı I_0 'ın artması demektir. I_0 'ın artmasında açık devre gerilimi V_{oc} 'nin azalması demektir (Bkz. Denklem (2.14)).

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmaları boyunda temelde iki farklı grup foto-voltaik hücre üretilmiş karakterizasyonları yapılmıştır. Üretilen foto-voltaik hücrelerin bir grubu tamamen organik tabakalardan oluşurken bir grubu inorganik/organik tabakalardan oluşmaktadır. Tezin bu bölümünde, gerek inorganik/organik tabakalardan oluşan gerekse tamamen organik tabakalardan oluşan foto-voltaik hücrelerin üretim basamakları ile üretilen foto-voltaik hücrelerin karakterizasyonlarının yapılmasında kullanılan deneysel düzenekler tanıtılacaktır.

3.1 İnorganik / Organik Foto-Voltaik Hücrelerin Üretilmesi

Tez çalışmaları boyunca, inorganik malzeme olarak temelde biri n-tip Si diğeri p-tip Si olmak üzere iki farklı inorganik yarıiletken kullanılmıştır. Daha sonra, hem n-tip Si hemde p-tip Si yarıiletkenler gözenekli hale getirilerek inorganik yarıiletken olarak kullanılmıştır. Dolayısıyla, gözenekli hale getirilmiş n-tip ve p-tip Si yarıiletkenlerin gözenekli hale getirilmemiş hallerinden farklı fiziksel özelliklere sahip olduklarından, tez çalışmalarında toplam dört farklı inorganik malzeme kullanılmıştır. Çalışmalarda, organik malzeme olarak biri fitalosyanin bileşikler diğeri karbon 60 (C₆₀) ve bir diğeri tris-(8 hydroxyquinoline)aluminum (Alq3) olmak üzere üç farklı organik malzeme kullanılmıştır. Bu kısımda, inorganik yarıiletken olarak kullanılan malzemelerin temizlenmesi aşamasından başlayarak foto-voltaik hücrelerin üretilmesi ve karakterizasyonlarının yapılması aşamasına kadarki aşamalarda kullanılan deneysel yöntemler tanıtılacaktır.

3.1.1 İnorganik Yarıiletkenlerin Hazırlanması

Tez çalışmaları boyunca üretilmesi planlanan inorganik/organik foto-voltaik hücrelerin oluşturulmasında biri n-tip diğeri p-tip Si olmak üzere iki farklı inorganik yarıiletken kullanılmıştır. Tez çalışmaları boyunca kullanılan Si yarıiletkenin bazı özellikleri aşağıdaki Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3. 1 Kullanılan Si’un Oda Sıcaklığındaki Bazı Özellikleri

KRİSTAL	Si
KATKI	Bor
KATKI YOĞUNLUĞU	$2 - 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
YÖNELİM	(100)
ÖZDİRENÇ	$2 - 10 \Omega\text{-cm}$
YÜK HAREKETLİLİĞİ	$1.5 \text{ cm}^2/\text{V.sn}$
ETKİN ELEKTRON KÜTLESİ	$1.18 m_0$
ETKİN BOŞLUK KÜTLESİ	$0.81 m_0$
KRİSTAL YAPI	Elmas
YASAK ENERJİ ARALIĞI	1.11 eV

3.1.2 Si Kristallerin Temizlenmesi

İnorganik yarıiletkenlerin yüzey temizlik aşamalarının yarıiletkenin birçok yüzey kusurunu ortadan kaldıracığı için, inorganik tabanlı aygıtların performansının kullanılan yarıiletkenin yüzeyinin temizliğine çok bağlıdır. Tez çalışmaları boyunca kullanılan inorganik yarıiletkenlerin bir yüzeyi üretim esnasında parlatılmış olduklarından mekanik parlatma/temizleme işlemi uygulanmamıştır. Kullanılan gerek n-tip gerekse p-tip Si yarıiletkenlerin yüzeylerindeki organik kirleri ve yüzeydeki pürüzleri ortadan kaldırmak için kimyasal temizleme işlemi uygulanmıştır. Kimyasal temizlik işlemlerinin ayrıntıları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Gerek n-tip gerekse p-tip Si tek kristalleri önce aseton (CH_3COOH_3) içerisinde 30 dakika yıkandıktan sonra öz direnci $18.2 \text{ M}\Omega\text{.cm}$ olan deiyonize su ile durulandı.
- Kristaller süreyle %48 $\text{HF:H}_2\text{O}$ (1:3) içerisinde tutulup daha sonra deiyonize su ile durulandı.
- 30 dakika süreyle izopropil alkol ($\text{CH}_3\text{CHOHCH}_3$) içerisinde yıkandıktan sonra

deiyonize su ile durulandı.

- $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ içerisinde 30 dakika yıkandıktan sonra deiyonize su ile durulandı.
- 5 dakika süreyle $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4$ içerisinde yıkandı ve daha sonra deiyonize su ile durulandı.
- $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4$ içerisinde 10 dakika kaynatıldıktan sonra deiyonize su ile durulandı.
- Deiyonize su içerisinde 30 dakika süreyle ultrasonik banyoda yıkandı.
- %48 lik $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ (1:3) içerisinde 1 dakika tutulduktan sonra deiyonize su ile durulanarak son kuru azot gazı (N_2) ile kurularak ohmik kontak yapımı için vakum sistemine yerleştirilmiştir.

3.1.3 Ohmik Kontaktların Yapılması

Ohmik kontakt, metal-yarıiletken temasında metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonlarının farklı olmasından kaynaklanan potansiyel engelini ve dolayısıyla temas noktasındaki direnci ortadan kaldırmak için uygulanan bir işlemdir.

Ohmik kontakt oluşturma işlemi BOC EDWARDS FL 400 vakum sisteminde 1×10^{-5} mbar basınç altında ısıtma buharlaştırma yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Vakum sistemi içerisinde bulunan elektrotlar arasına tungsten bir pota yerleştirilmiştir. Potanın uçlarının bağlı bulunduğu elektrotlar bir sabit akım kaynağı tarafından beslenmektedir. Çalışmalar esnasında Si kristallerine ohmik kontakt yapmak için % 99.9 saflıkta Alüminyum (Al) kullanılmıştır. Buharlaştırılacak olan tel şeklindeki Al metali seyreltik HF içerisinde temizlenerek DI-su ile durulandıktan sonra kuru azot gazı ile kurutularak tungsten potaya yerleştirilmiştir. Daha sonra, Si kristallerinin ohmic kontakt yapılacak olan mat yüzeyleri aynı şekilde, önce Hidroflorik asit (HF, %48) ile temizlendikten sonra deiyonize su (DI-su) ile yıkanıp kuru azot gazı ile kurutulmuştur, temizlendikten sonra üzerinde 1 mm yarıçapında dairesel delikler bulunana metal bir maske üzerine mat yüzeyleri aşağı gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Üzerine Si kristalleri yerleştirilmiş olan

maske tungsten potadan yaklaşık 20 cm yukarıya tam potanın üzerine gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Daha sonra sistemin kapağı kapatılarak Si ve Al'un bulunduğu bölge vakum yapılmıştır. Vakum 1×10^{-5} mbar değerine ulaştığında potanın bağlı bulunduğu elektrotlardan akım geçirilmek suretiyle potadaki Al'un buharlaşması sağlanmıştır.

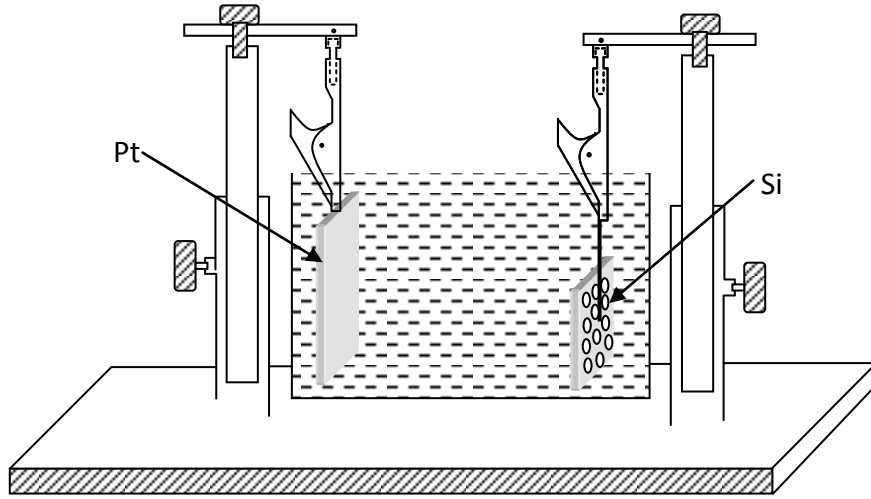
Son olarak, Si kristalleri yaklaşık 400 °C da azot ortamında 5 dakika süreyle ısıtılma işlemine tutularak ohmik kontaktların oluşumu gerçekleştirilmiş oldu.

3.1.4 Gözenekli Si'lerin Hazırlanması

Ohmik kontaktların oluşturulmasından sonra gözenekli Si'lerin hazırlanması işlemine geçilmiştir n-tip ve p-tip Si'lerin gözenekli hale getirilmelerinde;

- 1.) %48 HF: H₂O (1:3, n-tip Si'lar için)
- 2.) %48 HF: Etanol (1:1, p-tip Si'lar için)

çözeltileri kullanılmıştır. Gözenekli Si'lerin oluşturulması anodik aşındırma yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, Şekil 3.1'de gösterilen düzenek kullanılmıştır. Düzenekte, teflon bir kap içerisinde kullanılacak çözelti bulunmaktadır. Çözeltinin içerisine bir krokodil yardımıyla Pt bir elektrot daldırılmış bunun tam karşısınada ohmik kontakt yapılmış yüzeylerine sıvı gümüş ile kablo tutturulmuş Si kristalleri yerleştirilmiştir. Daha sonra, çözelti içerisinden bir sabit akım kaynağı yardımıyla akım geçirilmiştir. Gözenekli Si'lerin oluşturulması esnasında farklı çapta ve derinlikte gözenekler elde etmek amacıyla Si kristalleri farklı sürelerde anodik aşındırma işlemine tutulmuşlardır. Hem n-tip hemde p-tip Si kristallerinin gözenekli hale getirilmelerinde akım yoğunluğu 15 mA/cm² olarak seçilmiştir. Yine her iki tip Si'larda anodik aşındırma süresi 5, 10, 15 ve 20 dakika olarak seçilmiştir. Bu süreler boyunca anodik aşındırma işlemine tutulan kristaller bu sürenin sonunda çözelti içerisinden çıkarılarak önce saf etanol sonrada DI-su içerisine daldırılmış ve azot gazı ile kurutulmuştur. Böylece, Si'lerin gözenekli hale getirilmeleri tamamlanmış olmaktadır.



Şekil 3.1 Gözenekli Si'lerin Oluşturulmasında Kullanılan Deneyesel Düzenek

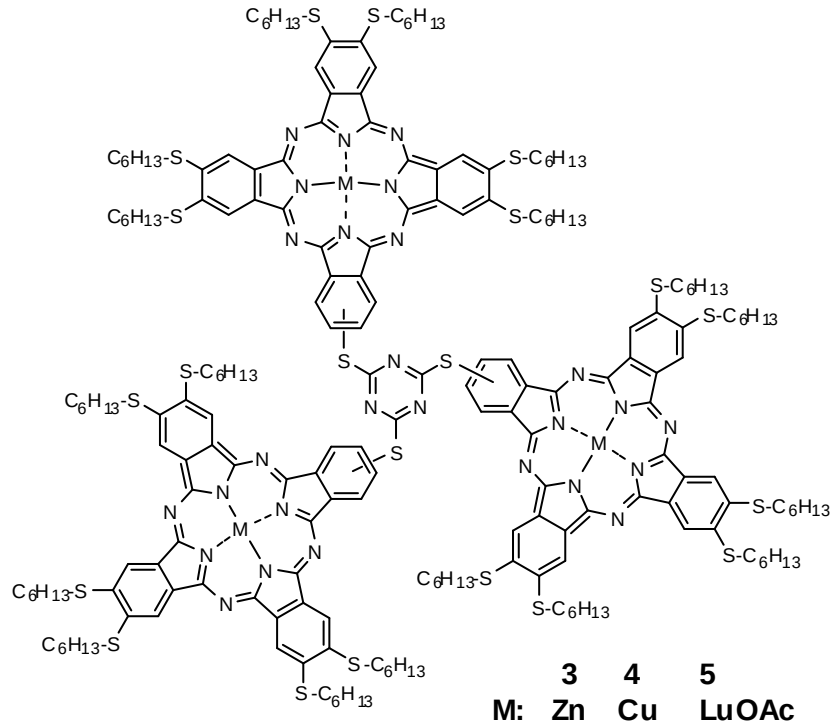
3.1.5 Organik Filmlerin Kaplanması

Çalışmada üretilen foto-voltaik hücrelerde fitalosyanin (Pc), karbon 60 (C_{60}) ve Alq3 olmak üzere üç farklı organik malzeme kullanılmıştır. Foto-voltaik hücrelerin üretiminde kullanılan organik malzemelerin moleküler yapıları ile bu malzemelerin ince filmlerinin hazırlanmasında kullanılan yöntemler aşağıda özetlenmiştir.

3.1.6 Fitalosyanin İnce Filmlerin Hazırlanması

Bir organik yarıiletken olan fitalosyanin ince filmlerin inorganik/organik foto-voltaik hücrelerin performansına etkisinin belirlenmesi amacıyla, farklı moleküler yapılara ve substitute gruplara sahip fitalosyanin bileşikler kullanılmıştır. Bu amaçla yapılan çalışmalardan en ümit verici sonuçlar moleküler yapısı Şekil 3.2'de gösterilen fitalosyanin bileşiklerinin kullanıldığı yapılarda gözlemlenmiştir. Çalışmalarda kullanılan fitalosyanin bileşiklerin gözenekli hale getirilmiş n ve p-tip Si'lerin yüzeyine kaplanmasında spin kaplama yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla, kullanılacak fitalosyanin bileşikleri kloroform, diklorometan ve tetrahidrofuran gibi uygun çözücülerde çözülmek suretiyle belirli bir konsantrasyondaki ($\sim 2 \times 10^{-3}$ M) çözeltileri hazırlanmıştır. Daha sonra, hazırlanmış olan bu çözeltilerden bir damlalıkla alınarak Si'lerin gözenekli hale getirilmiş yüzeylerine damlatılmış ve sonrada spinner 1500 rpm

hızla 60 sn süreyle döndürülmüştür. Böylece, fitalosyanin bileşiklerinin gözenekli Si'ların yüzeyine düzgün olarak dağılımları sağlanmıştır.

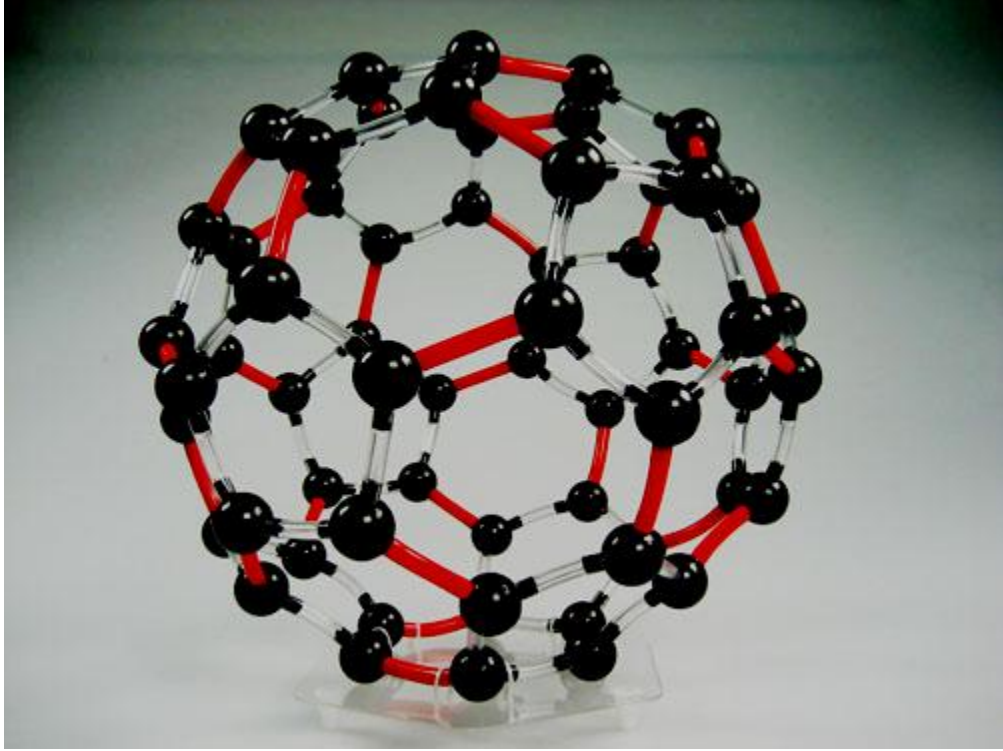


Şekil 3.2 Foto-voltaik Hücrelerde Kullanılan Fitalosyanin Molekülü

Spin kaplama işleminin ardından, çözücünün yüzeyden tamamen buharlaşmasını sağlamak için, filmler kullanılan çözeltilerin türüne göre 60 °C ile 120 °C arasında değişen farklı sıcaklıklarda ısıtılma işlemi tutulmuşlardır. Bu işlem, kaplanan fitalosyanin ince filmlerin üzerine diğer organik malzemelerin (özellikle P3HT'nin) kaplanması esnasında fitalosyanin ince filmlerin yüzeyden kaldırılmasını önlemek amacıyla yapılmıştır.

3.1.7 C₆₀ İnce Filmlerin Hazırlanması

Karbon 60 molekülü çok iyi bir elektron alıcı malzemedir. Bu nedenle, C₆₀ molekülleri organik tabanlı foto-voltaik hücrelerin üretiminde en yaygın kullanılan ve en önemli malzemelerdendir. Tez çalışmalarında kullanılan C₆₀ molekülleri ticari olarak satın alınmıştır. C₆₀ ince filmlerin hazırlanmasında birisi spin kaplama diğeri ısı buharlaştırma olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmıştır. Spin kaplama yönteminde, C₆₀ molaritesi 0.04 M olacak şekilde klorobenzen’de çözülmek suretiyle bir çözelti hazırlanmış ve daha sonra bu çözültiden spin kaplama yöntemiyle ince filmler hazırlanmıştır. Çalışma boyunca üretilen foto-voltaik hücrelerin bazılarında ise C₆₀ tabakasının hazırlanmasında ısı buharlaştırma yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 3.3 C₆₀’ın Moleküler Yapısı

C₆₀ moleküllerinin ısı buharlaştırma yöntemi ile kaplanması Si kristallerine ohmik kontakt oluşturulması esnasında Al kaplama işleminin yapıldığı vakum sisteminde gerçekleştirilmiştir. C₆₀’ın moleküler yapısı Şekil 3.3’de gösterilmiştir.

3.1.8 Alq3 İnce Filmlerin Hazırlanması

Çalışmada kullanılan triaazoquinaluminium ticari bir malzeme olup Sigma-Aldrich Chemical Co., firmasından satın alınmıştır. Alq3 ince filmler spin kaplama yöntemiyle hazırlanmıştır. Önce satın alınan malzemenin, kloroformda çözmek suretiyle belirli bir konsantrasyondaki (1×10^{-2} M) çözeltisi hazırlanmıştır. Söz konusu malzemenin ince filmleri spin kaplama yöntemiyle hazırlanmıştır. Filmler kaplandıktan sonra çözücünün tamamen buharlaştığından emin olmak için $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 10 dakika süreyle ısıtılma işlemi tutulmuştur.

3.2 Organik Tabanlı Foto-Voltaik Hücrelerin Üretilmesi

Organik tabanlı foto-voltaik hücrelerin üretilmesinde altlık olarak bir yüzeyi indiyum kalay oksit (İTO) kaplı cam altlıklar kullanılmıştır. Kullanılan İTO kaplı camların direnci $15\ \Omega\cdot\text{cm}$ olup ticari olarak satın alınmıştır. İlk önce, $2 \times 2\text{ cm}$ boyutlarında kesilen İTO kaplı camların karşılıklı kenarlardan 0.5 cm 'lik kısımlarındaki İTO tabakası soyulmuştur. İTO tabakasının soyulması esnasında, korunmasını istediğimiz İTO tabakası şeffaf bir band ile kapatılmış ve sonra hacimce $4.5 : 1 : 3$ oranlarında $\text{HCl} : \text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{O}$ içeren bir çözelti içerisine daldırılmıştır. Altlıklar bu çözelti içerisinde $\sim 3\text{ dk}$ bekletildikten sonra çözelti içerisinden çıkarılarak DI-su ile durulanmıştır. İstenilen bölgelerdeki İTO tabakasının soyulduğundan emin olmak için bu bölgelerde direnç ölçümleri yapılmıştır. İTO soyma işlemi tamamlandıktan sonra, İTO kaplı yüzey üzerindeki band kaldırılarak altlıkların temizlenmesi işlemine geçilmiştir. Altlıkların temizlenmesinde aşağıdaki işlem basamakları uygulanmıştır.

- $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de ultrasonik banyoda izopropil alkolle yıkama, 15 dakika
- $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de ultrasonik banyoda DI-su ($18\text{ M}\Omega$) ile durulama, 10 dakika
- $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de ultrasonik banyoda Asetonla yıkama, 15 dakika
- $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de ultrasonik banyoda DI- su ile durulama, 15 dakika
- Azot ile kurutma
- UV ışığa tutma, 15 dakika

Bu temizlik aşamalarından geçirilen altlıklar foto-voltaik hücrelerin üretiminde kullanılacak organik tabakaların kaplanması için hazır hale gelmişlerdir.

Tez çalışmaları boyunca ITO/Pc/C₆₀/Al, ITO/Pc/Alq3/Al, ITO/Alq3/C₆₀/Al ve ITO/Alq3/C₆₀/Pc/Al olmak üzere dört farklı tabakalardan oluşan foto-voltaik hücreler üretilmiş ve bu yapıların aydınlık ve karanlık ortamlardaki akım-gerilim karakteristikleri ölçülmek suretiyle karakterizasyonları yapılmıştır.

3.2.1 Metal Elektrotların Kaplanması

Metal elektrot tabakasının kaplanması foto-voltaik hücre üretiminin son aşamasıdır. Bu çalışmada üretilen organik tabanlı foto-voltaik hücrelerde metal elektrot olarak % 99 saflıkta Alüminyum (Al) kullanılmıştır. İnorganik/organik foto-voltaik hücrelerde ise metal elektrot olarak Au ve Cu olmak üzere iki farklı metal kullanılmıştır. Metal elektrot tabakalarının kaplanmasında ısı buharlaştırma yöntemi kullanılmıştır. Isı buharlaştırma işlemi yaklaşık 1×10^{-5} mbar basınç altında gerçekleştirilmiştir. Isı buharlaştırma yöntemi Si kristallerine ohmik kontaktların yapılması kısmında ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Metal elektrotların kaplanmasıyla foto-voltaik hücrelerin üretimi tamamlanmış olmaktadır. Bu aşamadan sonra üretilen hücrelerin karakterizasyonlarının yapılmasına geçilmiştir.

3.3 Foto-Voltaik Hücrelerin Elektriksel Karakterizasyonlarında Kullanılan DeneySEL Düzenekler

Bu bölümde, üretilen foto-voltaik hücrelerin elektriksel karakterizasyonlarının yapılmasında kullanılan deneySEL düzenekler tanıtılacaktır. Farklı tabakalardan oluşan foto-voltaik hücrelerin elektriksel karakterizasyonları her bir yapının oda sıcaklığında ve ortam koşullarında karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım-gerilim (I-V) karakteristikleri ölçülmek suretiyle gerçekleştirilmiştir. Üretilen foto-voltaik hücrelerin karanlık ve aydınlık ortamlarda gerçekleştirilen I-V karakteristiklerinin ölçümlerinde kullanılan deneySEL düzenek Şekil 3.4’de gösterilmiştir. Bu ölçümlerde, üretilen foto-voltaik hücrelerde anot ile katot arasına, bir elektrometre (Keithley 617 model programlanabilir elektrometre) yardımıyla -1 volt ile +1 arasına değişen gerilimler

uygulanmış ve her bir gerilim değeri karşılık gelen akım değeri yine aynı elektrometre ile ölçülerek kaydedilmiştir.



Şekil 3.4 I-V Karakteristiklerinin Ölçülmesinde Kullanılan Deneysel Düzenek

Anot ve katot arasına uygulanan gerilim değeri 50 mV aralıklarla değiştirilmiştir. Tüm aydınlık ortam ölçümlerinde ışık kaynağı ile foto-voltaik hücre arasındaki uzaklık yaklaşık 50 cm'de sabit tutulmuştur. Hazırlanan foto-voltaik hücrelerin gerek karanlık gerekse aydınlık ortamlarda ölçülen I-V karakteristikleri bilgisayar kontrollü bir sistem ile gerçekleştirilmiştir.

ELDE EDİLEN SONUÇLAR

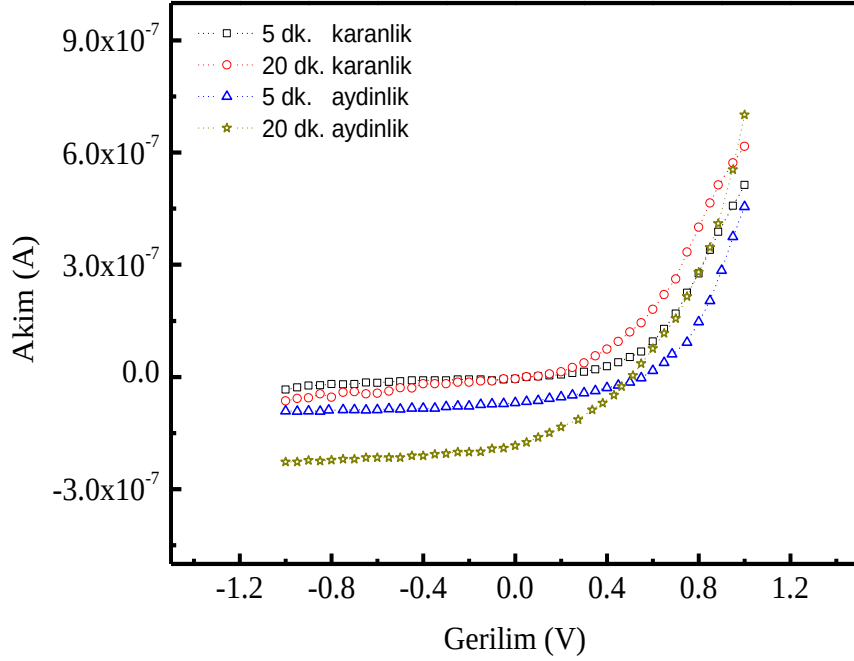
Bu bölümde tez çalışmaları boyunca üretimleri yapılan birisi tamamen organik tabakalardan diğeri inorganik/organik tabakalardan oluşan iki grup foto-voltaik hücrelerin karanlık ve aydınlık ortamlarda ölçülen elektriksel özelliklerinden elde edilen sonuçlar verilecektir. Üretilen tüm foto-voltaik hücrelerin I-V karakteristikleri oda koşullarında ölçülmüştür.

4.1 İnorganik / Organik Tabakalı Yapılardan Elde Sonuçlar

Tez çalışmalarında inorganik tabaka olarak gözenekli hale getirilmiş biri n-tip diğeri p-tip Si olmak üzere iki farklı inorganik yarıiletken kullanılmıştır. Kullanılan gözenekli Si'lerin gözenek çapının ve derinliğinin üretilen foto-voltaik hücrelerin performansına etkisini belirlemek amacıyla, Si tek kristalleri farklı sürelerde anodik aşındırma işlemine tutulmuşlardır.

Şekil 4.1 anodik aşındırma süresinin üretilen foto-voltaik hücrelerin performansına etkisini göstermektedir. Şekil 4.1 inorganik tabaka olarak 5 dakika ve 20 dakika süreyle anodik aşındırma işlemine tutulmuş n-tip gözenekli Si'lerin (n-GS) organik tabaka olarak, C₆₀'ın kullanıldığı foto-voltaik hücrelerin karanlık ve aydınlık ortamlarda ölçülen akım-gerilim (I-V) karakteristiklerini göstermektedir. Şekil 4.1'den açıkça görüleceği gibi, aşındırma süresinin yapıların karanlık ortamdaki I-V karakteristikleri üzerinde fazlaca bir etkisinin olmadığı gözlemlenirken aydınlık ortamdaki I-V karakteristiklerinin aşındırma süresine oldukça bağlı olduğu gözlemlenmiştir. n-GS/C₆₀/Al yapılarda, artan aşındırma süresi ile kısa devre akımının büyük oranda arttığı açık devre geriliminin ise azda olsa azaldığı görülmüştür. 5 dakika süreyle aşındırma

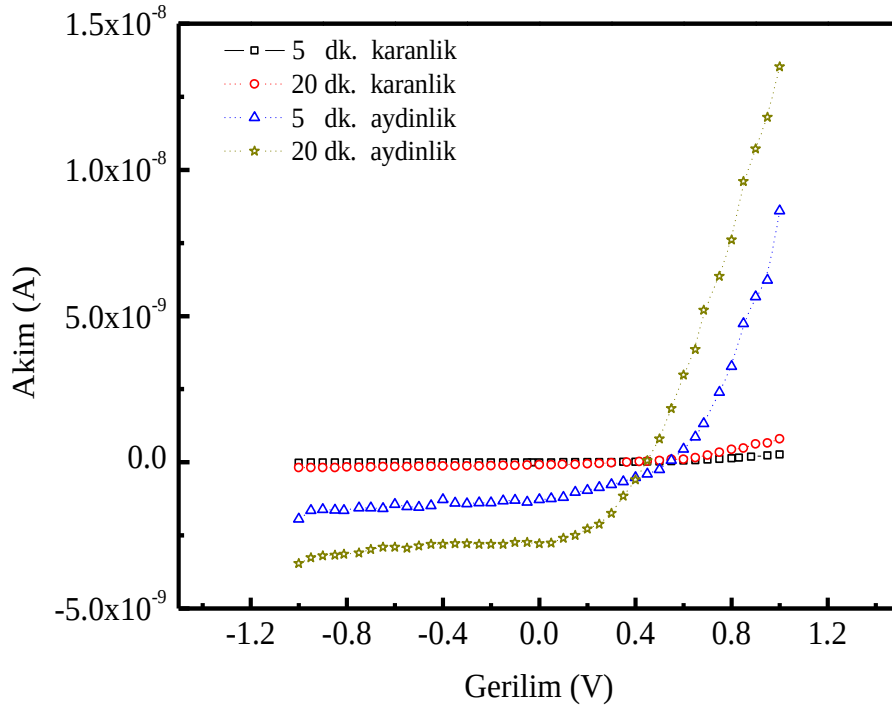
işlemine tutulan n-GS/C₆₀/Al yapılarda kısa devre akımı 7.3×10^{-8} A iken 20 dakika süreyle aşındırma işlemine tutulan yapılarda bu değerin 1.85×10^{-7} A'e yükseldiği gözlemlenmiştir. Aynı yapılarda açık devre geriliminin artan aşındırma süresiyle 0.58 V değerinden 0.51 V değerine düştüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 4.1 Aşındırma Süresinin n-GS/C₆₀/Al Yapıların I-V Karakteristiklerine Etkisi

Anodik aşındırma süresinin üretilen diğer foto-voltaik hücrelerin I-V karakteristiklerine etkisinin incelenmesinde n-GS/C₆₀/Al yapılarındakine benzer etkiler gözlemlenmiştir. Şekil 4.2'de aşındırma süresinin n-GS/Pc/Al yapıların I-V karakteristiklerine etkisi gösterilmiştir. Şekil 4.2'den açık bir şekilde görülmektedir ki, aşındırma süresinin yapıların karanlık ortamdaki I-V karakteristikleri üzerinde fazlaca bir etkisi yoktur. Diğer yandan, aşındırma süresinin aydınlık ortamdaki I-V karakteristikleri üzerindeki etkisi açık bir şekilde görülmektedir. n-GS/Pc/Al yapılarda, n-GS/C₆₀/Al yapılarda olduğu gibi, artan aşındırma süresi ile kısa devre akımının büyük oranda arttığı gözlemlenirken açık devre geriliminde azda olsa azaldığı gözlemlenmiştir. n-GS/Pc/Al yapılarda kısa devre akımının 5 dakika süreyle aşındırma işlemine tutulan yapılarda 1.3×10^{-9} A iken 20 dakika aşındırma işlemine tutulan yapılarda bu değerin 2.8×10^{-9} A'e

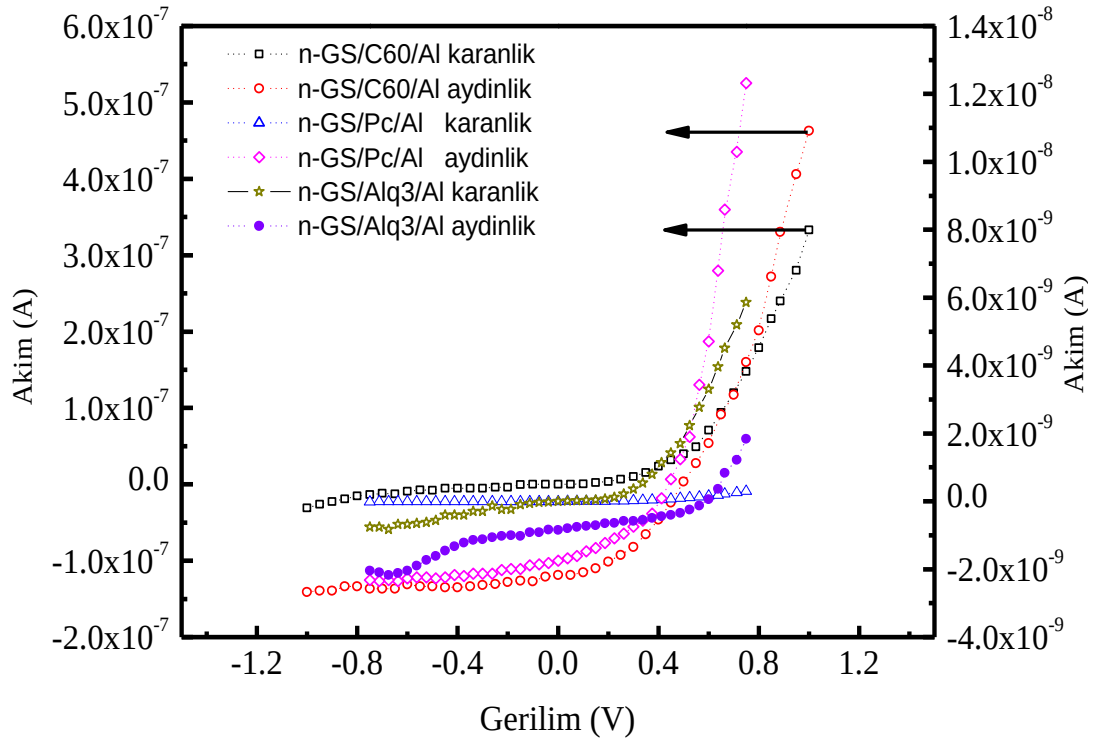
yükseldiği gözlemlenmiştir. Açık devre geriliminin ise artan aşındırma süresiyle 0.55 V değerinden 0.45 V değerine düştüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 4.2 Aşındırma Süresinin n-GS/Pc/Al Yapıların I-V Karakteristiklerine Etkisi

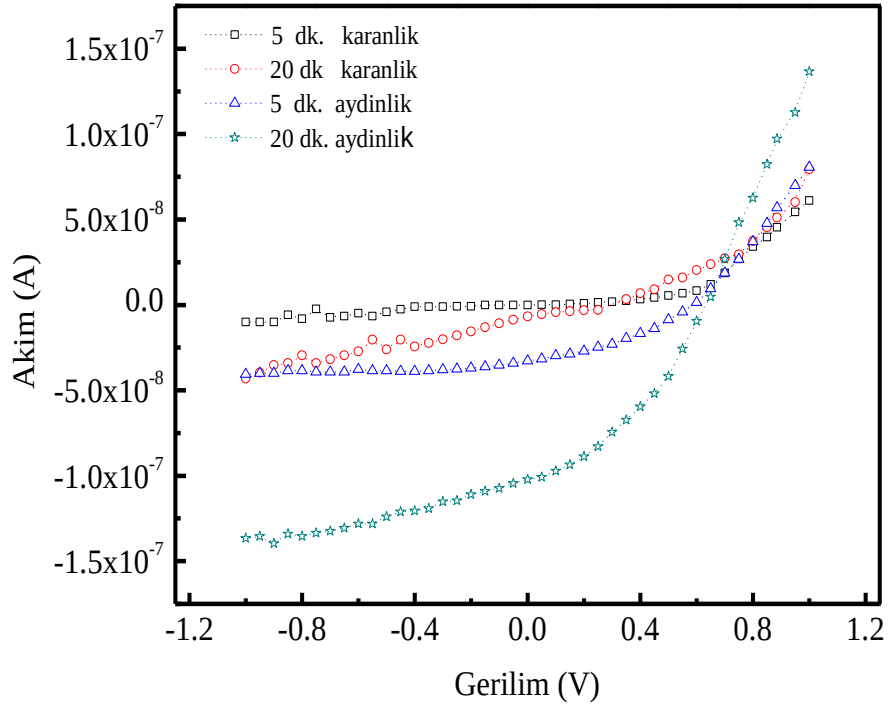
Şekil 4.1 ile Şekil 4.2'nin karşılaştırılmasından görülmektedir ki inorganik tabaka olarak n-GS'un kullanıldığı yapılarda kısa devre akımının kullanılan organik tabakanın türüne oldukça bağlı olduğu görülmüştür. En büyük kısa devre akım değeri n-GS/C₆₀/Al yapılarında gözlemlenmiştir.

İnorganik tabaka olarak GS'ların kullanıldığı yapılarda organik tabakanın (OT) foto-voltaik hücrelerin performansına etkisinin incelenmesinde ise gerek açık devre geriliminin gerekse kısa devre akımının kullanılan organik malzemenin türüne oldukça bağlı olduğu görülmüştür. Organik tabakaların yapıların I-V karakteristiklerine etkisinin karşılaştırması amacıyla, Şekil 4.3'de 15 dakika süreyle kimyasal aşındırma işlemine tutulan n-GS/C₆₀/Al, n-GS/Pc/Al ve n-GS/Alq3/Al yapıların karanlık ve aydınlık ortamlarda ölçülen I-V karakteristikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Organik Tabakanın n-GS/OT/Al Yapıların I-V Karakteristiklerine Etkisi

İnorganik yarıiletken olarak n-tip GS'un kullanıldığı yapılarla p-tip GS'un kullanıldığı yapıların I-V karakteristiklerini karşılaştırmak amacıyla Şekil 4.4'de 5 dakika ve 20 dakika süreyle anodik aşındırma işlemine tutulmuş p-tip GS'ların organik tabaka olarak, C₆₀'ın kullanıldığı foto-voltaik hücrelerin karanlık ve aydınlık ortamlarda ölçülen I-V karakteristikleri gösterilmiştir. Şekil 4.4'ün dikkatlice incelenmesinden hemen görülebileceği p-GS/C₆₀/Al yapıların hem karanlık hemde aydınlık ortamdaki I-V karakteristikleri aşındırma süresine bağlılık göstermektedir. Yine Şekil 4.4'den görüleceği gibi karanlık ortamda ölçülen akım değerleri uygulanan gerilimin her değeri için artan aşındırma süresi ile artmaktadır. Aşındırma süresinin p-GS/C₆₀/Al yapıların aydınlık ortamdaki I-V karakteristiklerine etkisi n-GS/C₆₀/Al yapılarınkine benzemektedir. p-GS/C₆₀/Al yapılarda, artan aşındırma süresi ile kısa devre akımının büyük oranda arttığı açık devre geriliminin ise azda olsa azaldığı görülmüştür. 5 dakika süreyle aşındırma işlemine tutulan p-GS/C₆₀/Al yapılarda kısa devre akımı 3.2×10^{-8} A iken 20 dakika süreyle aşındırma işlemine tutulan yapılarda bu değer 1.0×10^{-7} A'e yükseldiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4 Aşındırma Süresinin p-GS/C₆₀/Al Yapıların I-V Karakteristiklerine Etkisi

Aynı yapılarda açık devre geriliminin artan aşındırma süresiyle 0.6 V değerinden 0.51 V değerine düştüğü gözlemlenmiştir. p-GS/C₆₀/Al yapılarla n-GS/C₆₀/Al yapıların aydınlık ortamda ölçülen I-V karakteristiklerinin karşılaştırılmasında ise açık devre gerilimlerinin her iki yapı içinde yaklaşık olarak aynı iken kısa devre akımının n-GS/C₆₀/Al yapılarda daima p-GS/C₆₀/Al yapılarınkinden daha büyük olduğu gözlemlenmiştir.

İnorganik tabanlı foto-voltaik hücrelerin karanlık ve aydınlık ortamlarda yapılan karakterizasyonlarından hesaplanan performans parametreleri Çizelge 4.1’de toplu olarak verilmiştir. Çizelge 4.1’de verilen sonuçların incelenmesinden gerek n-tip GS gerekse p-tip GS’un kullanıldığı yapılarda kısa devre akımının artan aşındırma süresiyle artarken açık devre geriliminin artan aşındırma süresiyle azalma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen verilerin topluca analizinden, en büyük kısa devre akım değerleri n-GS/C₆₀/Al yapılarında gözlemlenirken en büyük açık devre gerilimi değerleri p-GS/Alq3/Al yapılarında gözlemlenmiştir. Yine Çizelge 4.1’deki verilerin analizinden, tüm yapılar için kısa devre akımı n-GS’un kullanıldığı yapılarda tüm aşındırma süreleri

için p-tip GS'un kullanıldığı yapılardan daha büyük olduğu buna karşılık açık devre geriliminin ise genelde p-GS'un kullanıldığı yapılarda daha büyük olduğu görülmüştür.

Çizelge 4. 2 İnorganik / Organik Tabakalı Yapılardan Elde Performans Parametreleri

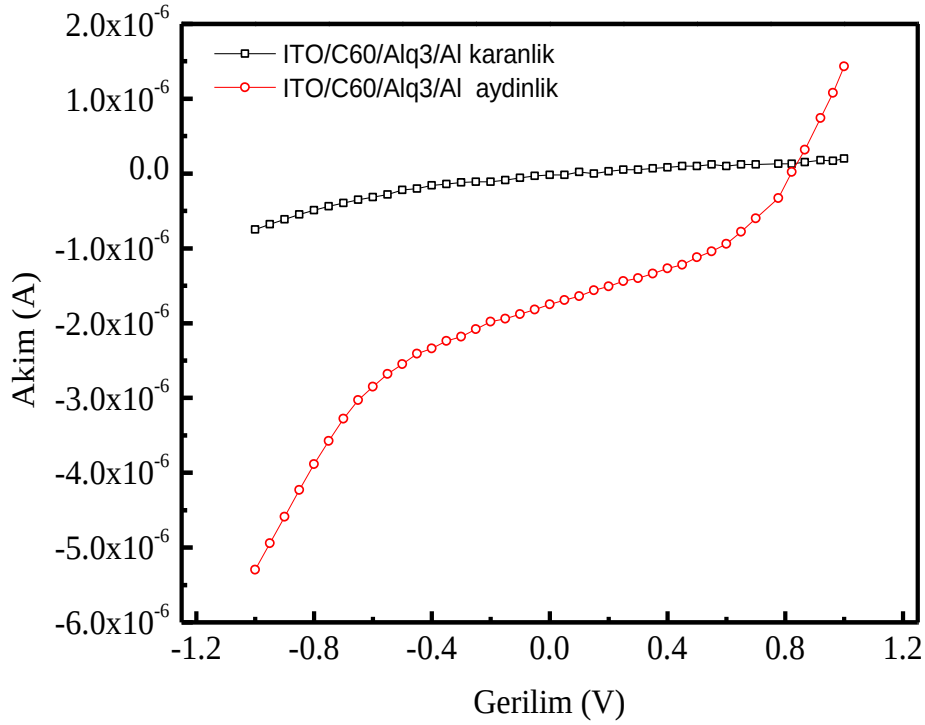
Yapı	Süre (dak.)	I_{kd} (A)	V_{ad} (V)	P_{max} (W)	FF
n-GS/C ₆₀ /Al	5	7.30×10^{-8}	0.58	8.67×10^{-9}	0.21
	10	9.25×10^{-8}	0.54	9.82×10^{-9}	0.20
	15	1.20×10^{-7}	0.51	2.27×10^{-8}	0.30
	20	1.85×10^{-7}	0.50	3.11×10^{-8}	0.34
n-GS/Pc/Al	5	1.30×10^{-9}	0.55	2.33×10^{-10}	0.33
	10	1.50×10^{-9}	0.50	3.45×10^{-10}	0.46
	15	1.75×10^{-9}	0.55	4.40×10^{-10}	0.46
	20	2.80×10^{-9}	0.45	5.33×10^{-10}	0.42
n-GS/Alq3/Al	5	3.35×10^{-10}	0.85	2.47×10^{-10}	0.87
	10	5.60×10^{-10}	0.85	4.50×10^{-10}	0.95
	15	8.47×10^{-10}	0.80	5.75×10^{-10}	0.85
	20	1.00×10^{-9}	0.70	6.90×10^{-10}	0.96
p-GS/C ₆₀ /A	5	3.20×10^{-8}	0.60	1.03×10^{-8}	0.54
	10	5.00×10^{-8}	0.60	2.11×10^{-8}	0.70
	15	8.70×10^{-8}	0.60	2.31×10^{-8}	0.44
	20	1.00×10^{-7}	0.51	2.40×10^{-8}	0.47
p-GS/Pc/Al	5	9.40×10^{-10}	0.65	3.00×10^{-10}	0.49
	10	1.15×10^{-9}	0.65	3.24×10^{-10}	0.43
	15	1.50×10^{-9}	0.60	6.00×10^{-10}	0.67
	20	2.00×10^{-9}	0.50	8.42×10^{-10}	0.84
p-GS/Alq3/Al	5	2.40×10^{-10}	0.90	1.14×10^{-10}	0.53
	10	4.20×10^{-10}	0.90	2.45×10^{-10}	0.65
	15	6.10×10^{-10}	0.85	3.64×10^{-10}	0.70
	20	8.10×10^{-9}	0.85	5.00×10^{-9}	0.73

4.2 Organik Tabakalı Yapılardan Elde Sonuçlar

C₆₀ molekülünün çok iyi bir elektron alıcı olduğu bilinmektedir. Bu özelliğinden dolayı C₆₀, hemen tür organik tabanlı foto-voltaik hücrelerin üretiminde en yaygın kullanılan ve en önemli malzemelerdendir. Bu tez çalışması kapsamında üretilen foto-voltaik hücrelerde de C₆₀ molekülü kullanılmıştır. Tezin bu kısmında, C₆₀ molekülünün yanında kullanılan fitalosyanin bileşiği ve Alq3 gibi organik malzemelerin üretilen foto-voltaik hücrelerin performansına etkisini belirlemek amacıyla, ITO/ C₆₀/ Pc /Al, ITO/Pc/Alq3/Al,

ITO/Alq3/C₆₀/Al ve ITO/Alq3/C₆₀/Pc/Al olmak üzere tamamen organik tabakalardan oluşan foto-voltaik hücrelerin karakterizasyonlarından elde edilen sonuçlar verilmiştir.

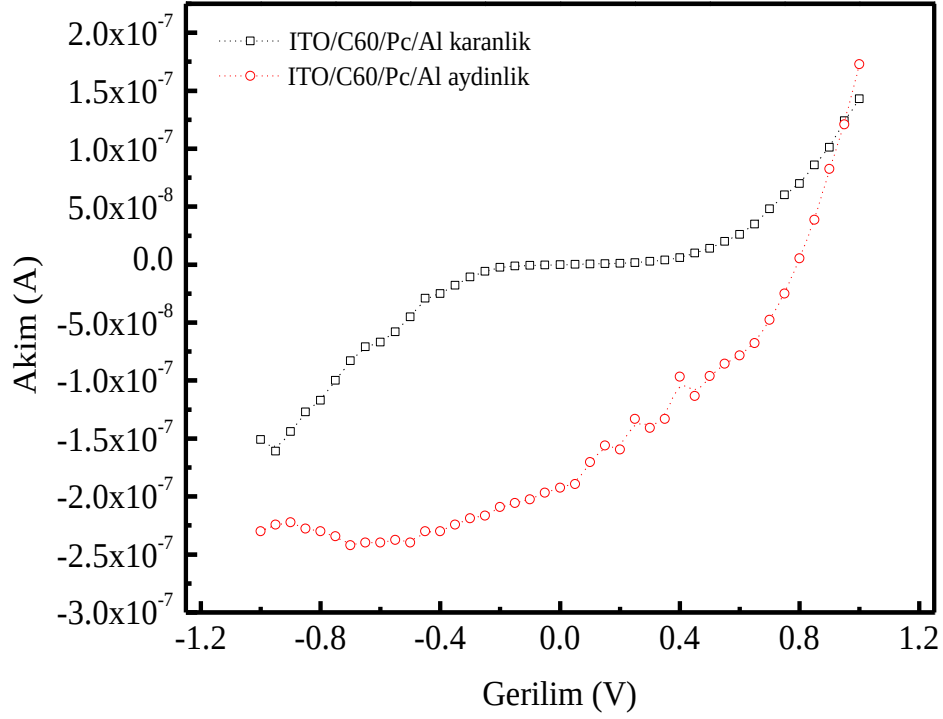
Şekil 4.5’de ITO/Alq3/C₆₀/Al tabakalarından oluşan foto-voltaik hücrenin –1 volt ile +1 volt aralığında karanlık ve aydınlık ortamlarda ölçülen I-V karakteristikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.5 ITO/Alq3/C₆₀/Al Tabakalarından Oluşan Yapının I-V Karakteristikleri

Tamamen organik tabakalardan oluşan yapıların I-V karakteristiklerinin incelenmesinde, yapıya uygulanan gerilimin negatif değerlerine karşılık gelen akım değerlerinin daima gerilimin pozitif değerlerine karşılık gelen akım değerlerinden büyük olduğu gözlemlenmiştir. Organik tabakalardan oluşan yapıların I-V karakteristikleri ile inorganik/organik tabakalardan oluşan yapıların I-V karakteristiklerinin karşılaştırılmasında dikkat çekici bir noktada, özellikle kısa devre akımının organik tabanlı yapılarda daima daha büyük olduğudur. ITO/Alq3/C₆₀/Al tabakalarından oluşan yapıda kısa devre akımının 1.75×10^{-6} A açık devre geriliminin ise 0.83 V olduğu görülmüştür.

Karanlık ve aydınlık ortamlarda I-V karakteristikleri incelenen bir diğer yapıda ITO/C₆₀/Pc/Al tabakalarından oluşmaktadır. Şekil 4.6'da ITO/C₆₀/Pc/Al tabakalarından oluşan foto-voltaik hücrenin karanlık ve aydınlık ortamlarda ölçülen I-V karakteristikleri gösterilmiştir.

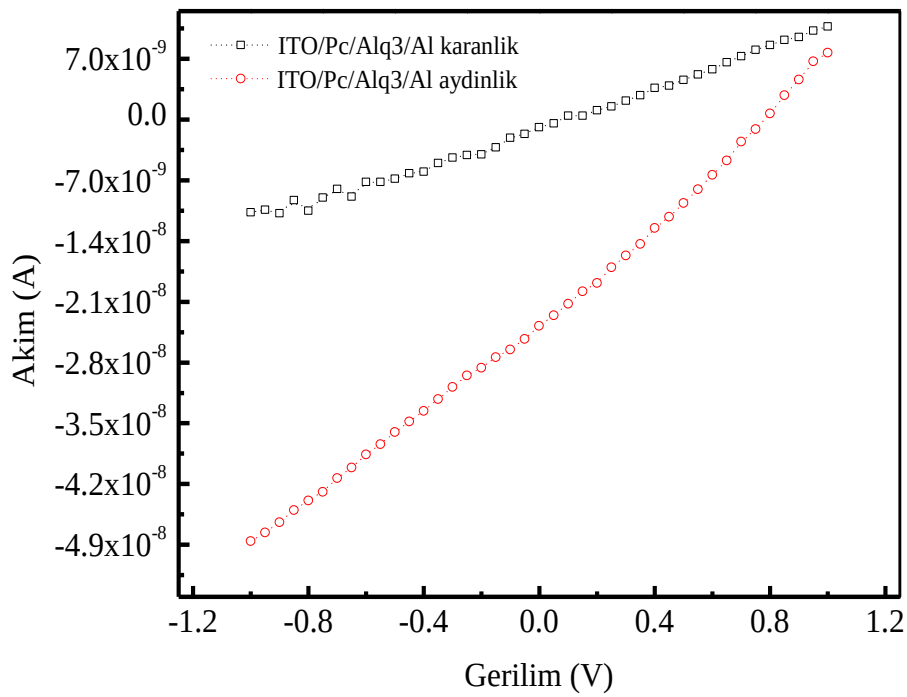


Şekil 4.6 ITO/C₆₀/Pc/Al Tabakalarından Oluşan Yapının I-V Karakteristikleri

Bu yapıda da uygulanan gerilimin negatif değerlerine karşılık gelen akım değerlerinin gerilimin pozitif değerlerine karşılık gelen akım değerlerinden büyük olduğu gözlemlenmiştir. Yapının karanlık ortamda ölçülen I-V karakteristiğinde uygulanan gerilimin negatif değerlerinde, belirli bir gerilim değerinden sonra akımın hızla arttığı görülürken aydınlık ortamdaki ölçümlerde bu durum gözlemlenmemiştir.

ITO/Alq3/C₆₀/Al tabakalarından oluşan yapıda kısa devre akımının 1.95×10^{-7} A açık devre geriliminin ise 0.80 V olduğu görülmüştür. Bu yapının ITO/Alq3/C₆₀/Al tabakalarından oluşan yapı ile karşılaştırılmasında, yapıdaki Alq3 tabakasının Pc molekülü ile değiştirilmesi kısa devre akımında bir düşüşe neden olurken açık devre gerilimini etkilemediği gözlemlenmiştir.

C_{60} 'ın organik tabanlı foto-voltaik hücrelerin performansına etkisini incelemek amacıyla yapıdaki C_{60} molekülünün yerine Pc molekülü kullanmak suretiyle ITO/Pc/Alq3/Al tabakalarından oluşan foto-voltaik hücrede üretilmiştir. Şekil 4.7'de ITO/Pc/Alq3/Al tabakalarından oluşan foto-voltaik hücrenin karanlık ve aydınlık ortamdaki I-V karakteristikleri gösterilmiştir. Şekil 4.7'den de açıkça görülebileceği gibi yapıdaki C_{60} 'ın çıkarılmasıyla yapının hem karanlık hemde aydınlık ortamlardaki I-V karakteristikleri önemli ölçüde değişmiştir.



Şekil 4.7 ITO/Pc/Alq3/Al Yapının I-V Karakteristikleri

Tamamen organik tabakalardan oluşan diğer yapılarda gözlemlenen doğrultucu karakteristiği bu yapıda gözlemlenmemiştir. Yapının gerek karanlık gerekse aydınlık ortamlarda ölçülen I-V karakteristiklerinin ohmik karakterli olduğu gözlemlenmiştir. ITO/Pc/Alq3/Al tabakalarından oluşan foto-voltaik hücrede kısa devre akımı 2.4×10^{-8} A açık devre gerilimide 0.8 V olarak belirlenmiştir. Organik tabanlı yapılardan elde edilen performans parametreleri Çizelge 4.2'de toplu olarak verilmiştir.

Çizelge 4.2 Organik Tabanlı yapılardan Elde Edilen Parametreler

Yapı	I_{kd} (A)	V_{ad} (V)	P_{max} (W)	FF
ITO/ C ₆₀ / Pc /Al	1.95×10^{-7}	0.80	5.03×10^{-8}	0.32
ITO/Pc/Alq3/Al	2.40×10^{-8}	0.80	5.00×10^{-9}	0.26
ITO/Alq3/C ₆₀ /Al	1.75×10^{-6}	0.83	5.64×10^{-7}	0.39
ITO/Alq3/C ₆₀ /Pc/Al	1.75×10^{-10}	0.57	7.34×10^{-11}	0.74

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu Yüksek Lisans tez çalışmasında iki farklı grup foto-voltaik aygıtın üretimi ve karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Üretilen foto-voltaik aygıtların birinci grubu inorganik ve organik takalardan oluşurken ikinci grup aygıtlar tamamen organik tabakalardan oluşmaktadır. Çalışmada, inorganik malzeme olarak elektrokimyasal aşındırma yöntemiyle göznekle hale getirilmiş p-tip ve n-tip Si tek kristalleri kullanılmıştır. Dolayısıyla bu grup aygıtlar n-GS/organik tabakalar/Al ve p-GS/organik tabakalar/Al tabakalarından oluşmaktadır. Tamamen organik tabakalardan oluşan foto-voltaik aygıtlar ise İTO kaplı cam altlıklar üzerine hazırlanmıştır. Her iki grup aygıtta da organik tabaka olarak fitalosyanin bileşikler, fullerene (C_{60}), ve tris(8-hydroxyquinolino)aluminium (Alq3) olmak üzere üç farklı organik malzeme kullanılmıştır. Tamamen organik tabakalardan oluşan aygıtların genel yapısı İTO/Organik tabakalar/Al tabakalarından oluşmaktadır. Üretilen aygıtların elektriksel karakterizasyonları aydınlık ve karanlık ortamlardaki akım-gerilim (I-V) karakteristikleri ölçülmek suretiyle yapılmıştır. Bu ölçümlerden, kısa devre akımı, açık devre gerilimi, maksimum güç ve dolgu faktörü gibi temel güneş pili parametreleri belirlenmiştir.

DeneySEL verilerin analizinden, inorganik/organik tabakalardan oluşan aygıtlarda temel güneş pili parametrelerinin Si'lerin aşındırma sürelerine oldukça bağlı oldukları görülmüştür. Bu yapılarda; Kısa devre akımının artan aşındırma süresi ile artarken açık devre geriliminin artan aşındırma süresi ile azaldığı gözlemlenmiştir. Yine bu grup aygıtlardan elde edilen maksimum gücün artan aşındırma süresi ile artarken dolgu faktöründeki değişimlerin aşındırma süresine bağlılığının düzgün olmadığı gözlemlenmiştir. Bu aygıtlarda gözlemlenen maksimum kısa devre akımı, maksimum

açık devre gerilimi, maksimum güç ve maksimum dolgu faktörünün kullanılan Si kristalinin tipinde oldukça bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Maksimum kısa devre akımı 20 dakika süreyle aşındırma işlemine tutulan n-GS/C₆₀/Al yapıda gözlemlenirken maksimum açık devre gerilimi 5 dakika süreyle aşındırma işlemine tutulan p-GS/Alq3/Al yapıda gözlemlenmiştir. Maksimum güç ise 20 dakika süreyle aşındırma işlemine tutulan p-GS/C₆₀/Al yapısında gözlemlenirken maksimum dolgu faktörü 20 dakika süreyle aşındırma işlemine tutulan n-GS/Alq3/Al yapısında elde edilmiştir.

Tamamen organik tabakalardan oluşan foto-voltaik aygıtlarda temel parametrelerin kullanılan organik malzemenin türüne oldukça bağlı olduğu bulunmuştur. Bu yapılarda maksimum kısa devre akımı ve açık devre gerilimi ITO/Alq3/C₆₀/Al tabakalarından oluşan yapıda gözlemlenirken maksimum dolgu faktörü ITO/Alq3/C₆₀/Pc/Al tabakalarından oluşan yapı ile elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçların topluca değerlendirilmesinde, gerek p-tip gerekse n-tip Si'lerin kullanıldığı yapılarda aşındırma süresinin optimum hale getirilmesiyle tüm parametrelerin maksimum olduğu foto-voltaik aygıtların üretilebileceği sonucuna varılmıştır. Organik tabanlı foto-voltaik aygıtlarda ise özellikle Alq3 ve C₆₀'ın birlikte kullanıldığı yapıların ümit verici yapılar olduğu bulunmuştur. Bu yapılarda, Alq3 ve C₆₀'ın kalınlık, film hazırlama koşulları vb. değiştirilmek suretiyle arzu edilen verimde foto-voltaik aygıtların üretilebileceği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Kim, D.Y., So, F. ve Gao, Y., (2009). "Aluminum phthalocyanine chloride/C₆₀ organic photo voltaic cells with high open-circuit voltages", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93: 1688 –1691.
- [2] Lee, W.H., Lee, S.K., Shin, W.S., Moon S.J., Lee, S.H., ve Kang, I.N., (2013). "Synthesis and photovoltaic properties of new poly(quarterselenophene) and poly(quarterselenophene-alt-quarterthiophene)s", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 117: 161–167.
- [4] Tang, M.L., Reichardt, A.D., Wei, P., ve Bao, Z., (2009). "Correlating Carrier Type with Frontier Molecular Orbital Energy Levels in Organic Thin Film Transistors of Functionalized Acene Derivatives", *Journal of the American Chemical Society*, 131(14): 5264-5273.
- [5] Fujishima, D., Kanno, H., Kinoshita, T., Maruyama, E., Tanaka, M., Shirakawa, M., ve Shibata, K., (2009). "Organic thin-film solar cell employing a novel electron-donor material", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93: 1029–1032.
- [6] Wright, M., ve Udin, A., (2012). "Organic inorganic hybrid solar cells: A comparative review", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 107: 87–111.
- [7] Green, M.A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., ve Dunlop, E.D., (2012). "Progress in Photovoltaics: Research and Applications", *Solar Energy & Photovoltaics*, 20: 12-20.
- [8] Brabeck, C.J., Dyakonov, V., Parisi, J., ve Sarıçiftçi, N.S., (2003). "Organic Photovoltaic Concepts and Realization", 1st edition, Springer., Heidelberg.
- [9] Zhang, F., Xu, X., Tang, W., Zhang, J., Zhuo, Z., Wang, J., Wang, J., ve Xu, Z., (2011). "Recent development of the inverted configuration organic solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95: 1785–1799.
- [10] Pode, R., (2011). "On the problem of open circuit voltage in metal phthalocyanine/C₆₀ organic solar cells", *Advanced Materials Letters*, 2(1): 3-11.
- [10] Peumans, P. ve Forrest, S.R., (2011). "Very-high-efficiency double-heterostructure copper phthalocyanine / C₆₀ photovoltaic cells", *Applied Physics Letters*, 79: 126–128.

- [11] Tang, C.W., (1986). "Two-layer organic photovoltaic cell", *Applied Physics Letters*, 48: 183.
- [12] Mazhari, B., (2006). "An improved solar cell circuit model for organic solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90: 1021–1033.
- [13] Wöhrle, D., ve Meissner, D., (1991). "Organic Solar Cells", *Advanced Materials*, 3: 129.
- [14] Michael, G., Waltera., Alexander, B., Rudine., Carl, C., ve Wamser., (2010). "Porphyrins and phthalocyanines in solar photovoltaic cells", *Journal of Porphyrins and Phthalocyanines*, 14: 759–792.
- [15] Huang, Y.C., Liao, Y.C., Li, S.S., Wu, M.C., Chen, C.W. ve Su, W.F., (2009). "Study of the effect of annealing process on the performance of P3HT/PCBM photovoltaic devices using scanning-probe microscopy", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93: 888-892.
- [16] Oh, S.W., Rhee, H.W., Lee, C., Kim, Y.C., Kim, J.K., ve Yu, J.W., (2005). "The photovoltaic effect of the p–n heterojunction organic photovoltaic device using a nano template method", *Current Applied Physics*, 5: 55-58.
- [17] Godoy, A., Cattin, L., Toumi, L., Díaz, F.R., del Valle, M.A., Soto, G.M., Kouskoussa, B., Morsli, M., Benchouk, K., Khelil, A., ve Bernede, J. C., (2010). "Effects of the buffer layer inserted between the transparent conductive oxide anode and the organic electron donor", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94: 648–654.
- [18] Salzman, R.F., Xue, J., Rand, B.P., Alexander, A., Thompson, M.E., ve Forrest, S. R., (2005). "The effects of copper phthalocyanine purity on organic solar cell performance", *Organic Electronics*, 6: 242–246.
- [19] Hanson, E.L., Guo, J., Koch, N., Schwartz, J. ve Bernasek, S.L., (2005). "Advanced surface modification of indium tin oxide for improved charge injection in organic devices", *Journal of the American Chemical Society*, 127: 0058–10062.
- [20] Yoo, I., Lee, M., Lee, C., Kim, D.W., Moon, I.S. ve Hwang, D.H., (2005). "The effect of a buffer layer on the photovoltaic properties of solar cells with P3OT:fullerene composites", *Synthetic Metals*, 153: 97–100.
- [21] Chan, M.Y., Lee, C.S., Lai, S.L., Fung, M.K., Wong, F.L., Sun, H.Y., Lau, K.M., ve Lee, S.T., (2006). "Efficient organic photovoltaic devices using a combination of exciton blocking layer and anodic buffer layer", *Journal of Applied Physics*, 100: 094506.
- [22] Jiang, X.Y., Zhang, Z.L., Cao, J., ve Zhu, W.Q., (2008). "High stability and low driving voltage green organic light emitting diode with molybdenum oxide as buffer layer", *Solid-State Electron*, 52: 952–956.
- [23] Reese, M.O., Morfa, A.J., White, M.S., Kopidakis, N., Shaheen, S.E., Rumbles, G., ve Ginley, D.S., (2008). "Pathways for the degradation of organic photovoltaic P3HT:PCBM based devices", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 92: 746–752.

- [24] Gevorgyan, S.A., Jorgensen, M., ve Krebs, F.C., (2008). "A setup for studying stability and degradation of polymer solar cells", *Solar Energy Materials Solar Cells*, 92: 736–745.
- [25] Jorgensen, M., Norman, K., ve Krebs, F.C., (2008). "Stability / degradation of polymer solar cells", *Solar Energy Materials Solar Cells*, 92: 686–714.
- [26] Kawano, K., Pacios, R., Poplavskyy, D., Nelson, J., Bradley, D.C., ve Durrant, J.R., (2006). "Degradation of organic solar cells due to air exposure", *Solar Energy Materials Solar Cells*, 90: 3520–3530.
- [27] Norrman, K., Larsen, N.B., ve Krebs, F.C., (2006). "Lifetimes of organic photovoltaics: combining chemical and physical characterization techniques to study degradation mechanisms", *Solar Energy Materials Solar Cells*, 90: 2793–2814.
- [28] Lee, K., Kim, J.Y., Park, S.H., Kim, S.H., Cho, S., ve Heeger, A.J., (2007). "Air-stable polymer electronic devices", *Advanced Materials*, 19: 2445–2449.
- [29] Kushto, G.P., Mäkinen, A.J., ve Lane, P.A., (2010). "Organic Photovoltaic Cells Using Group 10 Metallophthalocyanine Electron Donors", *IEEE journal of selected topic in quantum electronics*, 16: 1552-1559.
- [30] Solimon, H.S., Farag, A.A.M., Khosifon, N.M. ve El-Nahass, M.M., (2008). "Electrical transport mechanisms and photovoltaic characterization of cobalt phthalocyanine on silicon heterojunctions", *Thin Solid Films*, 516: 8678-8683.
- [31] Sharma, G.D., Choudhary, V.S., ve Roy, M.S., (2007). "Electrical and photovoltaic properties of devices based on PbPc–TiO₂ thin films", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91: 1087-1096.
- [32] Kim, D.Y., So, F. ve Gao, Y., (2009). "Aluminum phthalocyanine chloride/C₆₀ organic photovoltaic cells with high open-circuit voltages", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93: 1688-1691.
- [33] Yoshida, Y., Nakamura, M., Tanaka, S., Hiromitsu, I., Fujita, Y., Yoshino, K., (2006). "Photovoltaic properties and inner electric field of ZnO/Zn-phthalocyanine hybrid solar cells", *Synthetic Metals*, 156: 1213-1217.
- [34] Sharma, G.D., BalaRaju, P., ve Roy, M.S., (2008). "Effect of functional groups of acceptor material on photovoltaic response of bulk hetero-junction organic devices based on tin phthalocyanine (SnPc)", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92: 261-272.
- [35] Ohmeri, Y., Itoh, E., Miyairi, K., (2006). "A.B.P. Lever Phthalocyanines Properties and Applications VCH", *Thin Solid Film*, 499: 369-33.
- [36] Leznoff, C.C., Lever, A.B.P., (1989). *Phthalocyanines properties and Applications*, volume 1-4, VCH Publishers, New York.
- [37] Halls J.J.M., Pichler, K., Friend, R.H., Moratti, S.C., ve Holmes, A.B., (1996). "Exciton diffusion and dissociation in a PPV/C₆₀ heterojunction photovoltaic cell", *Applied Physics Letters*, 68: 3120-3122.

- [38] Boden, N., Bushby, R.J., Cammidge, A.N., Duck-worth S., ve Headdock, G., (1997). "Halogenation of triphenylene-based discotic liquid crystals: towards a chiral nucleus", *Journal of Materials Chemistry*, 7(4): 601 605.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Saeedullah SAJJAD
Doğum Tarihi ve Yeri : 21 MART 1986 - Afganistan
Yabancı Dili : İngilizce, Türkçe, Farsça
E-posta : sdu.sajjad@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Fizik ve Matematik	Nangarhar Üniversitesi	2009
Lise	Genel	Omara khan Lisesi	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2010	Helmand Meslek Yüksek Okulu	Öğretim Görevlisi