

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**IŞIK YAYAN ORGANİK DİYOTLARIN
PERFORMANS VE KARAKTERİSTİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Shirin SIYAHJANI

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Şule ERTEN ELA

Güneş Enerjisi Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu: 625.05.04

Sunuş Tarihi:05.01.2014

Bornova-İZMİR

2015

Shirin SIYAHJANI tarafından yüksek lisans tezi olarak sunulan “**İŞİK YAYAN ORGANİK DİYOTLARIN PERFORMANS VE KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ**” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesinin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 05.01.2014 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı : Doç. Dr. Şule ERTEN ELA

Raportör Üye : Doç. Dr. Ceylan ZAFER

Üye : Doç. Dr. Sibel KILINÇ ALPAT



EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “**İŞİK YAYAN ORGANİK DİYOTLARIN PERFORMANS VE KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ**” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

05 / 01 / 2015

İmzası

Adı-Soyadı

Shirin SIYAHJANI

ÖZET

IŞIK YAYAN ORGANİK DİYOTLARIN PERFORMANS VE KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

SIYAHJANI, Shirin

Yüksek Lisans Tezi, Güneş Enerjisi Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Şule ERTEN ELA

Ocak 2015, 67 sayfa

Bu yüksek lisans çalışmasında, sabit HTL ve ETL kalınlıklarında, aktif tabakanın (EL) kalınlığı değiştirilerek, OLED aygıtına ait optiksel ve elektriksel değişimler tespit edilmiştir. Daha sonra, elde edilen sonuçlar değerlendirilerek optimize ışık verimi için uygun OLED yapısı belirlenmiştir. Bu amaçla, ITO/PEDOT: PSS (35nm)/Ir(mppy)₃ (%6 wt%) :PBD (%24):TPD (%9):PVK (%61)/LiF(0,7 nm)/Al(100nm) konfigürasyonunda, farklı aktif tabaka kalınlıklarına sahip, dört tür OLED aygıtı hazırlanmıştır. Dönü kaplama tekniğiyle, farklı dönme hızlarında kaplanan aygıtların aktif tabakalarına ait kalınlıklar, profilometre ile belirlenmiştir. Üretilen OLED aygıtlarının akım yoğunluğu-gerilim, dalga boyuna göre elektrolüminesans, gerilim- lüminesans ve akım yoğunluğu-elektrik alan analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar tartışılmış ve her bir analiz sonucunun, birbiriyle olan uyumluluğu irdelenmiştir. Sonuçta, yukarıdaki konfigürasyonda hazırlanan yeşil renk fosforesans OLED için EL tabaka kalınlığı değişiminin, OLED karakteristiklerine etkileri tartışılmış ve optimum EL tabaka kalınlığı tespit edilmiştir (56 nm). Islak kaplama tekniğiyle hazırlanan aygıtlarda, en iyi değerler, 2,8 mA altında, 3,6 V'luk açma kapama gerilimi ve 575,5 cdm⁻²'lik ışıma olarak belirlenmiştir.

Anahtar sözcükler: Elektrolüminesans, Fluoresans, Fosforesans, ışık yayan organik diyot, elektron taşıyıcı, boşluk taşıyıcı, katkılama

ABSTRACT

**INVESTIGATION OF PERFORMANCES AND
CHARACTERISTICS OF ORGANIC LIGHT
EMITTING DIODES**

SIYAHJANI, Shirin

MSc Thesis, Solar Energy Department

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Sule ERTEN ELA

January 2015, 67 pages

In this MSc thesis, polymer based organic light emitting diodes (OLED) with various active layer thickness have been fabricated and characterized. OLEDs were configured in a structure of ITO/PEDOT: PSS (35nm)/Ir(mppy)₃ (%6 wt%) :PBD (%24):TPD (%9):PVK (%61)/LiF(0.7 nm)/Al(100nm). Emissive layer of TPD: PBD: PVK: Ir(mppy)₃ was deposited with thickness ranging of 90 nm, 56 nm, 40 nm and 35 nm. Thicknesses of the active layers coated with spin coater have been determined by using profilometer. After that, thicknesses of active layer were optimized for efficient phosphorescent OLED device by determining the optical and electrical parameters. From the current density, luminance, voltage characteristics of OLED, proper thickness of the organic layer (56 nm) was able to be determined. The solution processed OLED device exhibited a turn-on voltage of 3.6 V and a maximum luminance of 575.5 cdm^{-2} at 2.8 mA.

Key Words: Electroluminescence, Fluorescence, phosphorescence, Organic light emitting diode, electron transport, hole transport, doping

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgilerini benden esirgemeyen ve yüksek lisans çalışmama yön veren danışmanım, sayın Doç. Dr. Şule ERTEN ELA'ya ve yüksek lisans çalışmalarımın bir bölümü için laboratuvar alt yapısını kullanmama izin veren ve çalışmalarına katkıda bulunan sayın Prof. Dr. Niyazi Serdar SARIÇİFTÇİ' ye teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım sırasında, bana yardımcı olan ve tecrübelerini benimle paylaşan, Yüksek Mühendis Çağatay ELA ve Dr. Burak GÜLTEKİN' e, ayrıca enstitüdeki değerli hocalarıma teşekkürlerimi bir borç bilirim. Ayrıca, laboratuvar ortamında beraber çalıştığım ve desteklerini esirgemeyen bütün fotokimya grubunun eski ve mevcut üyelerine teşekkür ediyorum.

Son olarak, doğduğum günden beri beni yalnız bırakmayan, hayatımın bütün iyi ve kötü günlerinde yanımda olan aileme minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Shirin Siyahjani

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
TABLolar DİZİNİ.....	xix
SİMGELER, KISALTMALAR VE BİRİMLER DİZİNİ	xx
1. GİRİŞ	1
1.1. Organik Elektronik	1
1.2. Organik Elektronik'in Fiziksel Temeli	4
1.2.1. Elektronik yapıları	4
1.2.2. Yük taşıyıcılarının iletilmesi	5
1.2.3. Eksitonlar	6
1.2.4. Enerji transferi	7
1.3. Organik Elektronik Uygulamaların Avantajları ve Dezavantajları	9
1.4. Organik Yarı İletkenler	11
1.5. Organik Işık Yayan Diyotlar	12
1.5.1. OLED üretiminde kullanılan malzemeler	16
1.5.2. Cihaz tasarımındaki gelişmeler	21
1.5.3. Yük enjeksiyonunun ayarlanması	21
1.5.4. Fosforesans OLED	24
1.5.5. OLED aygıt uygulamaları	26

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
1.5.6. Dış kuantum verimi	32
1.5.7. Akım-gerilim-lüminesans karakteristikleri.....	35
1.5.8. Tezin amacı ve kapsamı.....	38
2. DENEYSEL KISIM	40
2.1. Denemelerde Kullanılan Kimyasallar.....	40
2.2. Analiz Teknikleri	40
2.2.1. Optik ve elektrokimyasal çalışmalar	41
2.2.2. OLED aygıt üretimi	43
2.2.3. İnce film ve OLED karakterizasyonu	44
2.3. Analiz Sonuçları ve Tartışma	44
2.3.1. Optik ve elektrokimyasal çalışmalar	44
2.3.2. İnce filmlerin hazırlanması	51
2.3.3. OLED aygıtların hazırlanması ve karakterizasyonu.....	51
3. SONUÇ.....	55
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	57
ÖZGEÇMİŞ	67

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
1.1 Organik elektronik aygıtlarda kullanılan bazı küçük moleküller ve polimerler	2
1.2 Organik yarıiletkenlerde sigma ve pi bağlarının oluşumu http://www.orgworld.de/	4
1.3 Organik moleküllerin HOMO ve LUMO enerji seviyelerinin oluşumu	5
1.4 Yarıiletken üzerindeki eksiton türleri: A) Frenkel B) yük transferi ve C) Wannier-Mott. (J. Lee. 2009. PhD dissertation (Page 52, Figure 1-6). University of Florida, Gainesville, Florida)	6
1.5 fotolüminesans sistem; absorpsiyon, flüoresans, fosforesans , sistem içi ve sistemler arası geçişleri gösteren kısmi Jablonski (enerji) diyagramı	8
1.6 Fosforesans OLED'lerde kullanılan, Pt kompleksleri (N. Chopra. 2009. PhD dissertation (Page 39, Figure 1-6). University of Florida, Gainesville, Florida.	10
1.7 Poliasetilen polimer zinciri üzerindeki elektron hareketi	11
1.8 Çok tabakalı bir OLED'in şematik gösterimi	14
1.9 İki tabakalı bir OLED aygıtında, yük taşınımı ve çalışma prensibi gösteren enerji diyagramı	16
1.10 OLED'lerde Elektron taşıma katmanı olarak kullanılan bazı organik yarı iletkenler.....	18
1.11 OLED'lerde boşluk taşıma katmanı olarak kullanılan bazı organik yarı iletkenler	19
1.12 a) tek tabaka OLED'te ve b) çok tabakalı OLED'lerde, HTL, ETL ve EL tabakalarının enerji seviyelerini gösteren diyagram.....	24
1.13 RGB ışık yayıcı olarak kullanılan, fosforesans Ir kompleksleri.....	26
1.14 a) yeşil OLED aygıtının yapısı b) enerji diyagramı c) aygıtın çalışma görüntüsü d) dalgaboyuna göre normalize fotolüminesans eğrisi	27
1.15 a) mavi OLED aygıtının yapısı b) enerji diyagramı c) aygıtın çalışma görüntüsü d) dalgaboyuna göre normalize fotolüminesans eğrisi	28

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil	Sayfa
1.16 a) kırmızı OLED aygıtının yapısı b) enerji diyagramı c) aygıtın çalışma görüntüsü d) dalgaboyuna göre normalize fotolüminesans eğrisi	29
1.17 a) fosforesans yeşil OLED aygıtının yapısı b) enerji diyagramı c) aygıtın çalışma görüntüsü d) dalgaboyuna göre normalize fotolüminesans eğrisi	31
1.18 a) Fluoresans Alq ₃ OLED'in akım-gerilim-lüminesans karakteristikleri b) Fosforesans Ir(ppy) ₃ OLED'in akım-gerilim-lüminesans karakteristikleri [Jörg Frischeisen, June 2011].	36
1.19 Alq ₃ ve Ir(ppy) ₃ temelli OLED'e ait a) akım verimi-gerilim b) ışık verimi-gerilim eğrileri [Jörg Frischeisen, June 2011].....	37
1.20 Konak-konuk sisteminde triplet ve singlet dinamiği	38
2.1 Aktif tabakada kullanılan bileşiklerin açık yapıları	40
2.2 CH Instruments 660 B model elektrokimyasal çalışma ünitesi (potansiyostat-galvanostat)	41
2.3 Analytic Jena Speedcord S600 model UV-Vis spektrofotometre.....	42
2.4 PTI-QMI model fluorimetre.....	43
2.5 a) OLED aygıtının enerji diyagramı b) OLED aygıtı yapısının şematik gösterimi	44
2.6 a) OLED aygıtının enerji diyagramı.....	44
2.7 PVK'ye ait absorbsiyon ve emisyon spektrumları.....	45
2.8 Ir(mppy) ₃ 'e ait absorbsiyon ve emisyon spektrumları.....	45
2.9 PVK'in emisyonu ile Ir(mppy) ₃ 'ün absorbsiyonunun örtüşmesi.....	46
2.10 TPD'ye ait absorbsiyon ve emisyon spektrumları.....	47
2.11 PBD'ye ait absorbsiyon ve emisyon spektrumları.....	47

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.12 Ir(mppy)3'ün PVK'yi sönmülmesi (1/10 Ir(mppy)3/PVK oranından sonra, Ir(mppy)3 'ün kendisini sönmüllemeye başlaması nedeniyle her iki emiterin de emisyonun azalma gözlenmektedir.).....	48
2.13 PVK'ye ait döngüsel voltammogram.....	49
2.14 Ir(mppy)3'ye ait döngüsel voltammogram.....	49
2.15 TPD'ye ait döngüsel voltammogram.....	50
2.16 Dönü hızına bağlı kalınlık değişimi.....	51
2.17 OLED aygıtlarına ait akım yoğunluğu-gerilim eğrisi.....	52
2.18 OLED aygıtlarına ait gerilim-lüminesans eğrileri.....	53
2.19 OLED aygıtlarına ait elektrolüminesans spektrumları.....	54
2.20 OLED aygıtlarına ait akım yoğunluğu- elektrik alan eğrileri.....	55

TABLÖLAR DİZİNİTabloSayfa

1.1 Floresan RGB(red, green, blue) malzemelerin tipik örnekleri.....	17
2.1 OLED aygıtında kullanılan malzemelerin optik ve elektrokimyasal karakteristikleri.....	50
2.2 OLED aygıtlarının performans parametreleri.....	54

SİMGELER, KISALTMALAR VE BİRİMLER DİZİNİ

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
A	Absorbans
AC	Alternatif akım
CV	Döngüsel voltametre
°C	Santigrad derece
λ	Dalga boyu
μm	Mikrometre
cd	Kandela
CHCl_3	Kloroform
CH_2Cl_2	Diklorometan
CT	Yük transferi
DMF	Dimetil formamit
DMSO	Dimetil sülfoksit
$E_{\text{HOMO (ox)}}$	En yüksek enerjili dolu moleküler orbital
EL	Elektrolüminesans
ETL	Elektron iletim katmanı
eV	Elektron volt
FF	Dolum faktörü
ITO	İndiyum doplanmış kalay oksit

SİMGELER, KISALTMALAR VE BİRİMLER DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
J_{sc}	Kısa devre akım yoğunluğu
HTL	Boşluk ileten tabaka
mA	Mili amper
MA	Moleküler ağırlık
mg	Miligram
mL	Mililitre
mmol	Mili mol
MO	Moleküler orbital
mV	Milivolt
nm	Nanometre
OLED	Organik ışık yayan diyot
PC ₆₁ BM	Fenil-C61-butirik asit metil ester
PEDOT: PSS	Poli(3,4-etilendioksitiyofen) poli(stirensülfonat)
TiO ₂	Titanyum dioksit
UV	Ultraviyole
V	Volt
V_{oc}	Açık devre gerilimi

1. GİRİŞ

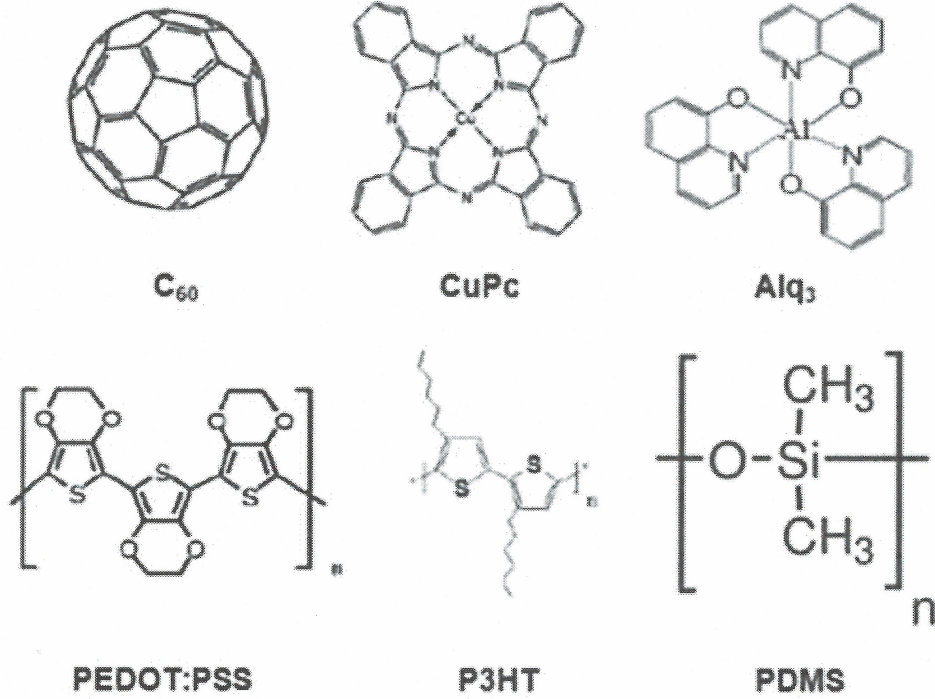
Temeli 1980’li yıllarda atılan yarı-iletken organik polimer araştırmalarının başarıyla sonuçlanması üzerine, Alan J. Heeger, Alan G. MacDiarmid ve Hideki Shirakawa 2000 yılı Nobel Kimya Ödülü’nü almaya hak kazanırken (Nobel Prizes, 2000), elektronik endüstrisinin bu malzemelere ilgi göstermesiyle yepyeni bir teknoloji kolu olan Organik Elektronik de ortaya çıkmış oluyordu. Bu yeni teknolojiye aktif yarı-iletken malzeme olarak kullanılan polimer ve küçük moleküllerin yapısını karbon molekülleri teşkil ettiğinden, alanı tanımlamak için genellikle “organik” kelimesi kullanılır. Yarı-iletken malzeme olarak polimer kullanıldığı zamanlarda, kullanılan polimerler de organik olmasına yani karbon içermesine rağmen, organik yerine polimer kelimesi de kullanılmaktadır.

Günümüzde elektronik aygıtların bu denli yaygın ve kullanışlı olmalarını borçlu olduğumuz mikro elektronik teknolojilerinin temel yapı taşı olan ve bir inorganik yarı-iletken olan silisyum, halen üretilen yongaların % 95’inden fazlasının hammadde olmakla birlikte yüksek altyapı ve işletim maliyeti nedeniyle yüksek hacim, düşük fiyat gerektiren piyasalara hitap edememektedir. İşte bu noktada organik yarı-iletkenler; getirdikleri düşük altyapı maliyeti, geniş ve esnek yüzeylere uygulanabilme, kolay ve hızlı üretim yöntemleri ile uygulamaya özgü sentezlenebilen malzeme özellikleri gibi avantajlarla, silisyumun dolduramadığı alanlara girebilecek niteliklere sahiptir. (Pope et al., 1999).

1.1. Organik Elektronik

Genel olarak, organik bileşikler karbon içeren malzemeler olarak tanımlanır. Bu genel tanımına göre, yaklaşık iki milyon organik bileşikler, bilinen tüm maddelerin hemen hemen % 90’ı yapılmıştır (Pope et al., 1999). Organik yarı iletkenler, iletken özelliklerine sahip malzemeler gibi karakterize edilmektedir. Sadece yarı iletken özelliklere sahip olan organik maddeler elektronik cihazlar üretmek için kullanılabilir.

Geleneksel kovalan bağla bir arada duran inorganik yarı iletkenlerin aksine organik yarı iletkenler Van der Waals kuvvetleri tarafından bir arada durmaktadırlar (Pope et al., 1999). Zayıf Van der Waals etkileşimleri nedeniyle, organik yarı iletkenler, inorganik yarı iletkenlerden daha farklı elektronik ve optik özellikler sergilemektedirler.



Şekil 1.1 Organik elektronik aygıtlarda kullanılan bazı küçük moleküller ve polimerler

Organik maddeler üç kategoride incelenebilmektedir: Küçük moleküller, polimerler ve biyolojik moleküller. Bu grup içinde, çok karmaşık yapılara sahip, biyolojik moleküller normal organik elektronik malzeme olarak kullanılamamaktadır. Bu nedenle, organik elektronik malzemelerin iki sınıfa ayrıldığı söylenebilmektedir: düşük molekül ağırlıklı küçük moleküller ve polimerler.

- **Küçük moleküller**, bir kaç ya da birkaç yüz atomuna sahip olan moleküller anlamına gelmektedir.

- **Polimerler**, monomer olarak adlandırılan basit moleküllerin kimyasal bağlarla bağlanması sonucu oluşan yüksek molekül ağırlıklı maddelerdir.

Organik elektronik cihazlarda kullanılan tipik küçük moleküller, bakır ftalosiyanın (CuPc) gibi metal kompleksleri, Fenil-C61-butirik asit metil ester (PC₆₁BM), perilen veya naftalen türevi organik moleküllerdir. Organik elektronik cihazlarda kullanılan polimerler ise; poli (3,4-ethilendioksitiofen): poli(stirenesülfonat) (PEDOT: PSS), poli(3-heksiltiyofen) (P3HT), ve poli[2,1,3-benzotiadiazol-4,7-diyl[4,4-bis(2-etilheksil)-4H-siklopenta[2,1-b:3,4-b']ditiyofen-2,6-diyl]] (PCPDTBT) gibi yarıiletken özelliği bulunan polimerlerdir. Şekil 1-1 genel olarak organik elektronik cihazlar için kullanılan bazı küçük moleküllerin ve polimerlerin yapılarını göstermektedir. Küçük moleküller ve polimerler, ince film oluşturulurken, farklı tekniklerle kaplanabilmektedirler. Polimerler, büyük molekül ağırlıkları nedeniyle, bir çözücü içerisinde, ıslak kaplama teknikleriyle uygulanmaktadırlar. Küçük moleküller ise, çözünür oldukları durumda, ıslak kaplama teknikleriyle, çözünür olmamaları durumunda ise daha pahalı ve zor bir yöntem olan vakumda buharlaştırma işlemi kullanılarak uygulanmaktadırlar.

Anorganik yarı iletkenler, 2000'li yılların başına kadar elektronik sektöründe hâkim konumdaydı. Silisyum, germanyum ve galyum arsenür, transistör, güneş hücresi ve ışık yayan diyot uygulamalarında kullanılan tipik anorganik maddelerden bazılarıdır. 1950 yılında, ilk kez Bernanose ve arkadaşları tarafından, akridin orange ve kuinakrin kristal ince filmlerine yüksek gerilim altında, alternatif akım (AC) uygulayarak organik malzemeden elektrolüminesans elde edilmiştir. O günden itibaren, organik elektronik alanında birçok araştırma gerçekleştirilmiştir. 1960 yılında, Pope ve Helfrich tarafından tek kristal antrasen kullanılarak, taşıyıcı enjeksiyon tabanlı elektrolüminesans üzerine araştırmalar yürütülmüştür (Pope et al., 1999).

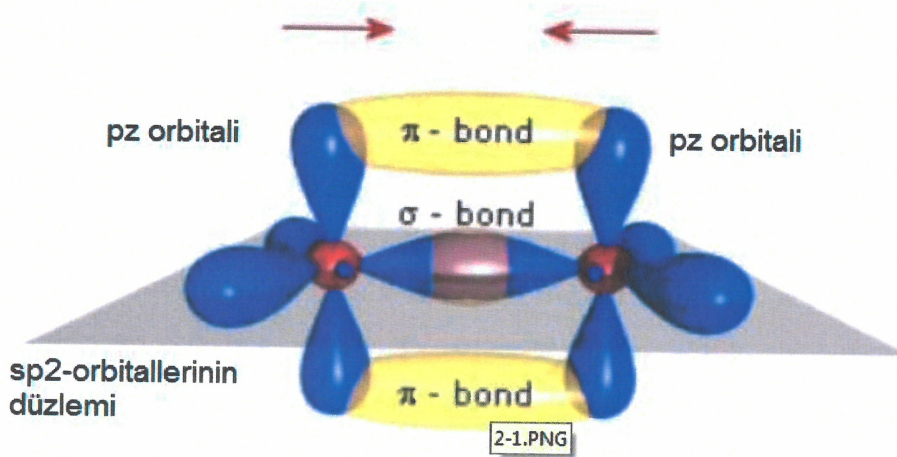
Organik elektronik araştırmada bir başka dönüm noktası 1987 yılında Kodak araştırma laboratuvarı tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu dönemde C.Tang ve Van Slyke'nin heteroeklem çift katmanlı küçük moleküllerin vakum depolama metoduyla düşük gerilimde (<10 V) yüksek parlaklık ve yüksek verimde çalıştığını gözlemlemişlerdir (Tang et al., 1987). Organik elektronik cihazların kararlılığı ve verimliliği üzerine yapılan çalışmalar, tüm dünyada devam etmektedir. Günümüzde, organik elektronik aygıtlar, sektörde önemli bir yere sahiptir. Özellikle, organik güneş hücreleri, organik ışık yayan diyotlar, organik

foto detektörler ve organik transistörler ticari ürün haline dönüşmüş durumdadırlar.

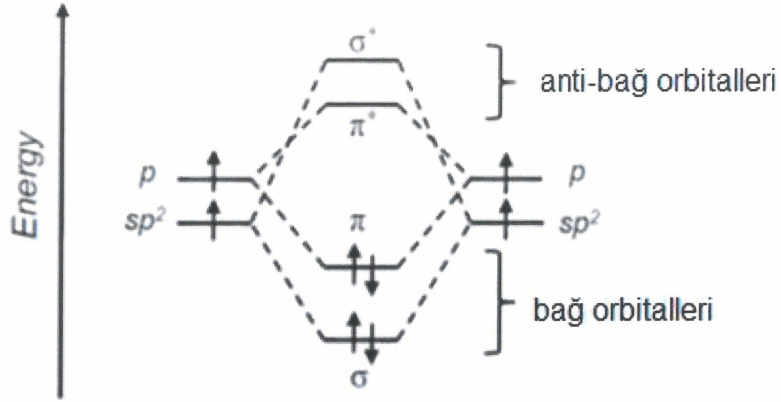
1.2. Organik Elektronikğin Fiziksel Temeli

1.2.1. Elektronik yapıları

Karbon atomu içeren bileşikler olarak tanımlanan, organik yarı iletkenler, yük iletimini, π -konjuge sistemleri üzerinden yapmaktadırlar. sp^2 hibriti karbonlardan oluşan polimer sistemlerde, sp^2 orbitalleri σ bağlarını oluştururken, bu orbitallere dik durumda duran p_z -orbitalleri ise π -bağlarını oluşturmaktadır. Şekil 1-2 organik yarıiletkenlerde π - bağlar ve σ bağların oluşumu gösterilmektedir. sp^2 -orbitallerinin örtüşmesi güçlü dolu bağ (σ) ve boş anti-bağ (σ^*) moleküler orbitallerinin (MO) oluşmasına yol açmaktadır. Bunun yanında, paralel p_z -orbitallerinin oluşturduğu daha zayıf bağlar ise yine aynı şekilde dolu bağ (π) ve boş anti-bağ (π^*) olmak üzere ayrılmaktadırlar. Bu nedenle, π bağ ve anti-bağ arasındaki enerji boşluğu σ bağ ve anti-bağ arasındakinden çok daha düşüktür. Bu da π - π^* geçiş enerjisinin, molekül içinde elektronik uyarma oluşturmak için gerekli olan en küçük enerji olmasını sağlamaktadır. Çoğu durumda organik yarı iletkenlerde, inorganik yarıiletkenlerdeki valans bantları ve iletim bantlarına benzer İşgal edilmiş en büyük molekül orbitalleri (HOMO) ve en düşük boş molekül orbitaller (LUMO) vardır. Bu durum şematik olarak Şekil 1-3 de gösterilmiştir.



Şekil 1.2 Organik yarıiletkenlerde sigma ve pi bağlarının oluşumu <http://www.orgworld.de/>



Şekil 1.3 Organik moleküllerin HOMO ve LUMO enerji seviyelerinin oluşumu

1.2.2. Yük taşıyıcılarının iletilmesi

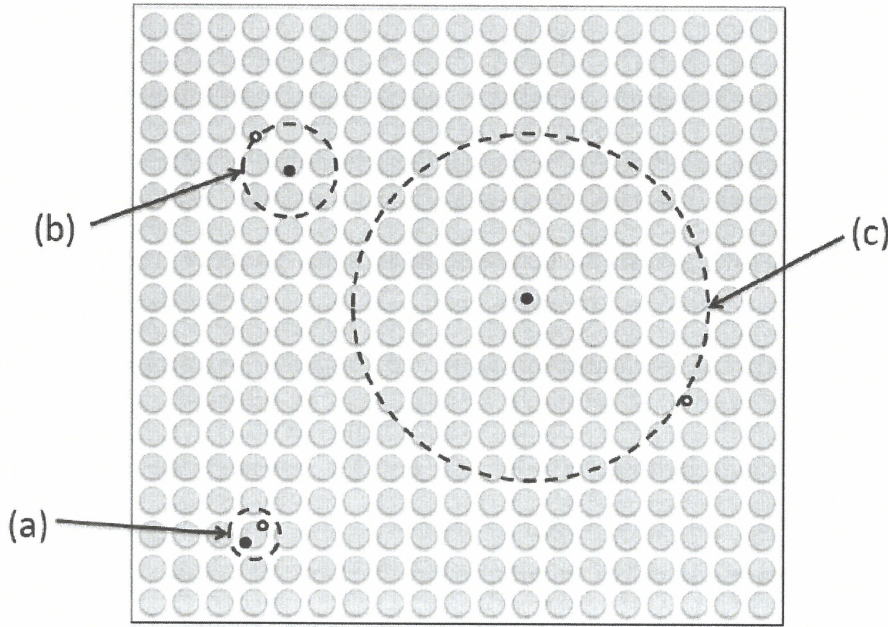
Organik yarıiletkenlerde, π -elektronları yer değiştirebilmektedirler ve bu sayede molekül içinde yük taşımaktadırlar. Diğer taraftan, zayıf Van der Waals etkileşimleri, düşük taşıyıcı hareketliliğinden dolayı yük taşıma verimliliğini kısıtlamaktadır. Yarıiletkenler'de yük taşıyıcıları, bant taşıma modeli ve atlamalı ulaşım modeli olmak üzere iki çeşit iletilme mekanizmasıyla iletilmektedirler. Bant taşıma modeli, yüksek derecede kristalize yapıya sahip katı ince filmler de geçerlidir. Yüksek derecede kristalize organik yarıiletkenlerdeki bantlar anorganik yarı iletkenlerdeki bantlarla benzerlik göstermektedir. Bu nedenle taşıyıcı mobilitesi nispeten yüksektir. Pentasen kristalinde mobilité $1 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 'ye ulaşabilmektedir (Forest et al., 1984). Atlamalı taşıma modeli ise genellikle katı amorf organiklerde gözlemlenmektedir ve organik yarıiletken molekülleri arasında ulaşım için baskın modeldir. Atlamalı taşıma için, yük taşıyıcıların moleküller arasında bulunan 10^{-6} ile $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ arasındaki bir mobilité enerji bariyerini aşması gerekmektedir (Champbell et al., 2001; Blom et al., 1997). Atlamalı taşıma modelindeki mobilité enerji bariyer yüksekliği, elektrik alan ve sıcaklığın bir fonksiyonudur bu denklem 1-1 ile ifade edilebilir.

$$\mu(F, T) \propto \exp \left[\frac{-\Delta E}{kT} \right] \cdot \exp \left[\frac{-\beta \sqrt{F}}{kT} \right] \quad (1.1)$$

Eşitlikteki, F elektrik alanı, T sıcaklık, ΔE moleküller arasında atlamalar için aktivasyon enerjisi, k Boltzmann sabitidir ve β bir sabit değeridir.

1.2.3. Eksitonlar

Organik elektronikte, elektron-boşluk çifti eksiton olarak tanımlanmaktadır. Organik yarı iletkenler de serbest elektron ve boşluk üretmek yerine lokalizasyona güçlü eğilimi olmasından dolayı, uyarma sonucunda eksitonlar oluşmaktadır (Chopra et al., 2009). Organik güneş hücrelerinin çoğunda yük ayrılması, ışıkla uyarılmış elektronların aktarımıyla gerçekleşmektedir. Güneş hücresinde soğurulan fotonların sağladığı enerji sayesinde, bir elektron, HOMO enerji seviyesinde bir boşluk bırakarak ayrılmaktadır ve LUMO seviyesine geçmektedir. OLED'lerde ise elektron ve boşluklar anot ve katot tarafından sırasıyla LUMO ve HOMO seviyelerine enjekte edilmektedir. Bu sayede aktif tabakada eksitonlar oluşmaktadır.



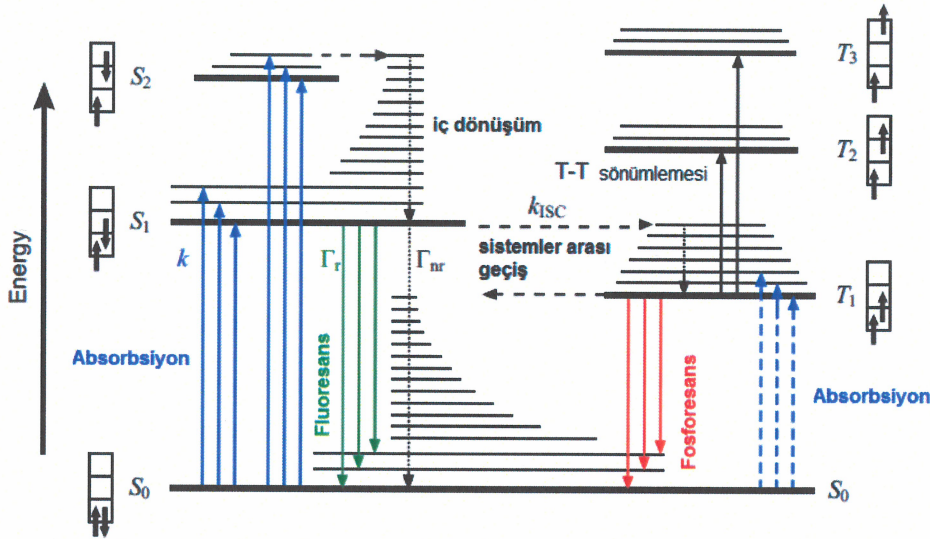
Şekil 1.4 Yarıiletken üzerindeki eksiton türleri: A) Frenkel B) yük transferi ve C) Wannier-Mott. (J. Lee, 2009. PhD dissertation (Page 52, Figure 1-6). University of Florida, Gainesville, Florida)

Daha sonra aktif tabakada birleşen elektron ve boşluklar, foton oluşturmaktadır. Şekil 1.4 de gösterildiği gibi eksitonların üç tipi vardır. Bunlar, Wannier-Mott, Frenkel ve yük transferi (CT) eksitonlarıdır. Oldukça lokalize olan Wannier-Mott eksitonlar düşük bağlanma enerjisine sahip olan eksitonlardır ve sadece anorganik yarı iletkenlerde bulunmaktadır. Genelde organik yarıiletkenlerde gözlenen tipik eksitonlar ise Frenkel eksitonlar ve yük transfer eksitonlarıdır. Frenkel eksiton içinde, elektron-boşluk çifti, nispeten yüksek enerji (0,5-2 eV) tarafından sınırlanmaktadır (Pope et al., 1999; Hill et al., 2000; Chandross et al., 1994). Yük transfer eksitonları ise eksitonik soğurmalar komşu moleküllerde yer değiştirdiği zaman oluşmaktadırlar. Bu duruma örnek olarak donör ve akseptör ara yüzeyindeki eksitonları verebiliriz.

1.2.4. Enerji Transferi

Eksitonlar bant taşıma aracıyla veya atlama süreciyle organik yarı iletkenlerde ilerleyebilmektedirler. Moleküller arasındaki enerji transferi, eksiton difüzyonuyla meydana gelmektedir. Uyarma enerjisi, bant aralığından daha büyük olduğunda, eksitonun oluşumuna neden olan soğurma işlemi gerçekleşmektedir. İki atom arasındaki bağ, atomik orbitallerin üst üste düşmesiyle oluşan bir veya daha fazla moleküler orbitalden oluşur. İki atomik orbitalin birleşmesiyle bir bağ orbitali ve bir anti-bağ orbitali meydana gelmektedir. Bağ orbitallerinin enerjisi daha düşüktür. Bu nedenle temel haldeki elektronlar buraya yerleşmektedirler. Moleküler orbitallerin, elektronik enerji seviyeleri üzerinde birbirine çok yakın titreşim enerji seviyeleri bulunmaktadır. Bundan dolayı, her elektronik absorpsiyon bandında, temel halden uyarılmış bir elektronik halin birkaç titreşim seviyesine geçişten kaynaklanan, bir seri birbirine yakın titreşim pikleri yer almaktadır. Moleküllerin orbitallerinde çift sayıda elektron vardır; temel halde, bu elektronlar çeşitli atomik veya moleküler orbitallerde çiftler şeklinde bulunmaktadır. Pauli dışlama ilkesine göre bir orbitaldeki iki elektronun spinleri birbirinin zıttıdır (yani çiftleşmiş spinler). Spin çiftleşmesinin (çift sayılı elektronlu) net elektron spini yoktur ve molekül diamagnetik özelliktedir. Tüm elektron spinlerinin çiftleştiği bir moleküler elektronik hale "tekli (singlet)" hal denir; molekül bir manyetik alana tutulduğunda enerji seviyesinde ayrılma

gerçekleşmemektedir. Bir serbest radikal için ise temel hal bir "ikiz (doublet)" haldir; burada, tek elektron bir manyetik alanda iki düzende bulunabilir ve enerji seviyesi ikiye ayrılmaktadır. Bir molekülün elektronlarından biri daha yüksek bir enerji seviyesine uyarıldığında, bir tekli veya bir "üçüz (triplet)" hal oluşmaktadır. Uyarılmış singlet hale geçirilen elektronun spini temel haldeki elektronla çiftleşmiş durumdadır; triplet halde ise iki elektronun spinleri çiftleşmiş değil paralel durumda bulunmaktadır. Elektronik haldeki bir değişiklik ile ilgili olan bir singlet- triplet geçişi (veya tersi) olasılığı, singlet-singlet geçişten daha az olmaktadır. Bundan dolayı, uyarılmış bir triplet halin ortalama yaşam süresi bir saniye (veya daha fazla) gibi uzun bir zamandır.



Şekil 1.5 fotolüminesans sistem; absorpsiyon, flüoresans, fosforesans , sistem içi ve sistemler arası geçişleri gösteren kısmi Jablonski (enerji) diyagramı

Uyarılmış bir singlet hal içinse bu süre 10^{-8} s kadardır. Bir temel hal molekülünün ışın etkisiyle bir triplet hale uyarılması hızlı bir biçimde gerçekleşmemektedir ve bu işlem nedeniyle oluşan absorpsiyon piklerinin şiddeti, benzer singlet-singlet geçişten oluşan piklerin şiddetinden birkaç derece daha küçük olmaktadır. Uyarılmış bir triplet hali, bazı moleküllerin "uyarılmış" bir singlet halinin bir arada toplanmasıyla da oluşabilmektedir; bu işlemin sonucunda fosforesans davranışı oluşmaktadır. Şekil 1.5'de tipik bir fotolüminesans molekülün enerji diyagramının bir kısmı gösterilmiştir. Oda sıcaklığında temel hal, bir çözeltideki tüm moleküllerin enerjilerini belirtmektedir. Normal olarak, birinci uyarılmış triplet halin enerjisi, karşılığı olan singlet hallerden daha düşüktür. Dört elektronik

halin her biri için çok sayıda titreşim enerji seviyeleri bulunur. Şekil 1.2'de görüldüğü gibi, bu molekülün uyarılması, iki ışın bandının soğurulmasıyla gerçekleştirilmiştir, bunlardan biri λ_2 ($S_0 \rightarrow S_1$) dalga boyu dolayında, diğeri daha kısa olan λ_2 ($S_0 \rightarrow S_2$) dolayındadır. Uyarma işlemi sonunda molekül birkaç uyarılmış titreşim hallerinden birine geçer. Doğrudan triplet hale uyarılma mümkün olmaz, çünkü bu işlem çoklukta bir değişiklik gerektirir. Uyarılmış bir molekül birkaç mekanik kademeye temel haline geri döner. Şekil 1.3'deki dik oklarla gösterildiği gibi, bu kademelerden ikisi (bir ışın fotonu çıkar) fluoresans ve fosforesanstır. Dalgalı çizgilerle gösterilmiş olan diğer deaktivasyon kademeleri ışımasız işlemlerdir. Temel hale geçişteki en olası durum yaşam süresi minimum olan uyarılmış haldir. Buna göre, fluoresansla durulma ışımasız işleme kıyasla daha hızlı ise, fluoresans olayı gözlenir. Eğer ışımasız bir yolun hız sabiti daha yüksekse, fluoresans olayı gözlenmez veya çok zayıftır. Fluoresans olayının gözlenebildiği sistemler oldukça azdır. Yapısal ve çevresel durum ışımasız relaksasyon veya durulma hızını, emisyon reaksiyonu hızının (kinetik olarak) buna rakip olduğu bir noktaya kadar azaltır. Bu hızı kantitatif olarak saptayabilecek emisyon işlemi ile ilgili yeterli bilgi vardır.

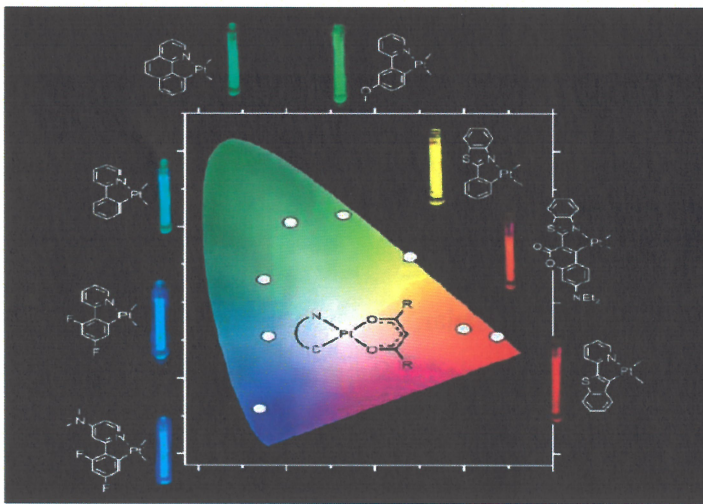
Durulma olayı fosforesansla da ilgilidir. Uyarılmış bir triplet hale sistemler arası geçişten sonra iç veya dış dönüşüm veya fosforesans yoluyla durulma oluşmaktadır. Bir triplet-singlet geçişi olasılığı, bir singlet-singlet değişiminden daha azdır ve uyarılmış triplet halin ortalama yaşam süresi saniyeler mertebesinde (Moleküler Fluoresans Spektroskopisi, Erişim tarihi: 23 Eylül 2014).

1.3. Organik Elektronik Uygulamaların Avantajları ve Dezavantajları

Organik elektronik uygulamalar, son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Organik yarıiletkenlerin çoğunun, esneklik, düşük maliyetli üretim süreçleri ve büyük alanlı imalat yeteneği gibi çekici özellikleri vardır. Organik ince bir film oluşturmak için kullanılan teknikler, ucuz, basit ve nispeten düşük sıcaklıklar gerektirmektedir. Küçük moleküler ince filmler basit vakum termal buharlaştırma kullanarak oluşturulabilmektedir (Forrest et al., 1997).

Polimer ince filmler ise genelde spin kaplama veya mürekkep püskürtmeli baskı ile oluşturulmaktadır (Burroughes et al., 1990). Bu tekniklerin bazıları, özellikle polimer ince filmler yapmak için kullanılanlar, yüksek verimli ve düşük maliyetli büyük alanlı işlemler ile uyumludur. Diğer bir etkileyici avantajları, organik yarı iletkenlerin optik ve elektriksel özelliklerinin, sadece kimyasal yapıları değiştirilerek, kontrol edilebilir olmasıdır. Örneğin, iridyum veya platinyum kompleksleri gibi moleküllerde, ligantlar üzerinde fonksiyonel grupları değiştirilerek, OLED'lerde mavi, yeşil ve kırmızı ışık elde etmek mümkündür [Adachi et al., 2001; Brooks et al., 2002].

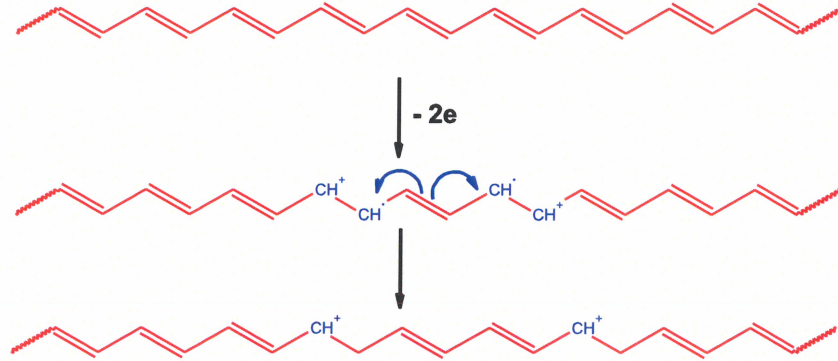
Ancak, organik elektronik uygulamaların, yukarıdaki tüm bu avantajlarına rağmen bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Daha önce belirtildiği gibi, organik yarı iletkenlerde moleküller arası etkileşimler zayıftır. Bu nedenle, taşıyıcı hareketliliği düşüktür. Ayrıca, organik yarıiletkenlerdeki, içsel taşıyıcı yoğunluğu az olduğundan, iletkenliği kısıtlanmaktadır. Aynı zamanda, küçük moleküllerin kimyasal safsızlıkları, yüksek konsantrasyonlarda içermesi nedeniyle, bu gibi malzemelerin saflaştırması bir sorun olabilmektedir. Son olarak çoğu zaman organik malzemeler çevre ortamında oksijen veya su buharına maruz kaldığında bozulmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle, iyi bir laminasyon yapılmadığı takdirde, malzeme ömürleri kısalmaktadır. Bu nedenle, gelecekte yapılacak araştırmalar bu tür sorunların çözümü üzerine yapılmalıdır.



Şekil 1.6 Fosforesans OLED'lerde kullanılan, Pt kompleksleri (N. Chopra. 2009. PhD dissertation (Page 39, Figure 1-6). University of Florida, Gainesville, Florida.

1.4. Organik Yarı İletkenler

1977 yılında, iyot ile katkılanan poliasetilenin yüksek elektrik iletiminin keşfi ile birlikte elektronikte, organik malzemeler veya polimerler aktif elemanlar olarak kullanılmaya başlandı. Polimerlerin bu özel sınıfı yarıiletken özellik göstermektedir. Bu tür organik maddelerin yapısında tek ve çift bağların ardalanması (konjugasyon) yarıiletken özelliğinin kaynağıdır. Konjuge yarıiletken adı alan bu maddelerin yapısında karbon atomları arasındaki bağlar birbiri ardı sıra değişen tek ve çift bağlar şeklinde dizilmişlerdir. Her bir bağ kuvvetli bir kimyasal bağ olan “sigma” (σ) bağı içerir. İlave olarak, her çift bağda daha zayıf (% 30) ve daha az lokalize olmuş bir π -bağı vardır. Bunlara rağmen, konjugasyon, polimer maddeyi iletken yapmak için yeterli değildir. Fakat konjuge polimerler, katkılanarak iletken hale getirilebilmektedir (Schwoerer et al., 2007).



Şekil 1.7 Poliasetilen polimer zinciri üzerindeki elektron hareketi

Polimerlerin, elektronik iletkenlik gösterebilmesi için polimer omurgasında elektronların zincir boyunca taşınmasını sağlayan uygun bölgelerin bulunması gerekmektedir. Katkılama işlemiyle, polimer yapısını iletken hale getirecek olan elektronlar verilir veya polimer örgüsünden elektron alınarak artı yüklerin (boşlukların) oluşturulması sağlanmaktadır. İletken polimerlerde iletkenliğin nasıl sağlandığı çok basit bir yaklaşımla bu boşluklar üzerinden açıklanabilir. Artı yüklü bir boşluğa başka bir yerden atlayan elektron geldiği yerde de artı yüklü boşluk oluşturacaktır. Bu işlemler ardı ardına zincir boyunca veya zincirler

arasında yinelenerek elektrik iletilmektedir. Poliasetilen zincir boyunca iyi olan elektriksel iletim, zincirlere dik yönde zayıflamaktadır. Poliasetilen filmler, çekme ile yönlendirilerek anizotropik özelliği artırılırsa, iletkenliği 100 kat kadar artmaktadır (Schwoerer et al., 2007). Konjuge polimerler, yasak enerji aralıkları (bant aralıkları) (1.5 eV) bakımından yarı iletken özellik göstermektedirler. Konjuge polimerlerin iletkenliklerini arttırmak için ise kimyasal veya elektrokimyasal yöntemler kullanılmaktadır. Yükseltgenme ya da indirgenme yoluyla gerçekleştirilen bu işleme, anorganik yarı iletkenlerdeki katkılama işlemine benzemesi nedeniyle aynı isim verilmektedir (Schwoerer et al., 2007).

1.5. Organik Işık Yayan Diyotlar

Organik ışık yayan diyotlar, elektriksel uyarım yoluyla ışık yaymaya başlayan (elektrolüminesans (EL)) organik elektronik aygıtlardır. Tarihsel açıdan bakıldığında, organik katılarda elektrolüminesansın geçmişi, 50 yıl önce yapılan bir çalışmaya dayanmaktadır. Helfrich Schneider ile eş zamanlı olarak, Pope ve arkadaşları tarafından iki elektrot arasında tek kristalli antrasenin elektrolüminesans çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Pope et al., 1963; Helfrich et al., 1965). Bu çalışmada 10 μm ile 5 mm arasında bir kalınlığa sahip olan son derece saflaştırılmış kristaller kullanılmış ve dolayısıyla bu kadar kalın kristallerden elektrolüminesans oluşturmak için bir kaç yüz volttan bin volta kadar yüksek bir gerilim gerekli olmuştur. 1970 yılında, Williams ve Schadt, emisyon alanını tanımlamak için yanal-yapılandırılmış elektrotlar kullanmışlardır (Williams et al., 1970). Diğer bir taraftan, bu çalışmada temel olarak bugün de kullanılmakta olan bir teknik, üretilen cihazlar enkapsüle edilmiştir. 1987 yılında Tang ve VanSlyke "Organik elektrolüminesans diyotlar" konusundaki çalışmalarını yayınladıklarında, OLED'ler konusunda büyük bir atılım meydana gelmiştir (Tang et al., 1987). Bu çalışmada, ilk kez düşük ağırlıklı moleküller buharlaştırarak yaklaşık 100 nm kalınlığına sahip, organik ince filmler kullanarak heteroeklem yapılı OLED yapıldı. Bu yaklaşım, gerekli gerilimi önemli ölçüde azaltmış ve dış kuantum verimi her bir foton için 100 enjekte elektron oranıyla elde edilmiştir. Üç yıl sonra, Burroughes ve arkadaşları tarafından, dönü kaplama yöntemiyle kaplanan polimerler kullanarak ilk OLED yapılmıştır (Burroughes et

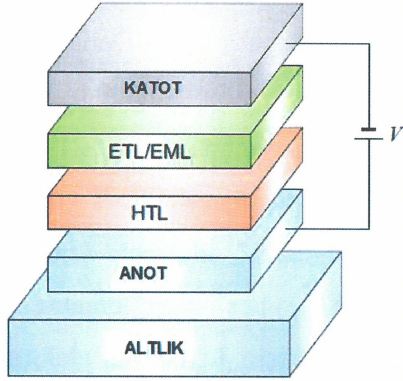
al., 1990). Bu sonuçlar, küçük molekül ve polimer tabanlı OLED'ler alanında dünya çapında bir araştırma ve geliştirme sürecinin başlangıcı olmuştur.

İlke olarak en basit OLED, iki elektrot yani anot ve katot arasında sıkıştırılmış tek bir organik tabakasından oluşmaktadır (Dodabalapour et al., 1997). OLED özellikleri malzemelerin seçimine bağlı olarak tanımlanabilir, ancak en az iki organik tabakalardan oluşan birçok katmanlı OLED verimliliği ve kullanım ömrü açısından daha avantajlı olmaktadır. Bu tipik OLED'in yapısal şematığı Şekil 1,8'de gösterilmektedir. Pozitif elektrot (anot)'un üzerine yerleştirilen boşluk taşıma katmanı (HTL), boşlukları enjekte etmek için gereklidir. Benzer şekilde, elektronların iletimi için de, negatif elektrot (katot)'un üzerine elektron taşıma katmanı (ELT) yerleştirilmelidir. Bazı durumlarda, elektron taşıma katmanı (ETL), aynı zamanda emisyon katmanı (EML) olarak davranmaktadır (Tang et al., 1987; Adachi et al., 1989). Diğer durumlarda ise ayrı bir tabaka, emisyon tabakası (EML) olarak kullanılmaktadır. Yüksek verimli OLED'lerde genellikle yük engelleme ve enjeksiyon katmanları gibi birçok ek katman kullanılmaktadır. Bu tabakaların bireysel fonksiyonları ve avantajları daha sonra tartışılacaktır.

En sık kullanılan altlık malzemesi, camdır. Esneklik ve ışık geçirgenliği açısından cama alternatif olarak geliştirilen polimer folyo gibi birçok başka altlık türleri de mevcuttur.

Üretilen ışığın cihazdan dışarıya yansımaya imkân vermek için iki elektrotlardan birisi yarı saydam olmalıdır. Çoğunlukla OLED'ler de oldukça şeffaf ve iyi iletkenliğe sahip olan indiyum-kalay oksit (ITO), anot olarak kullanılmaktadır. Katot için ise, kalsiyum veya magnezyum gibi düşük iş fonksiyonlu metaller, çok yansıtıcı ve az reaktif olan alüminyum veya gümüş gibi metallerle kombine olarak kullanılmaktadır. Genellikle birçok organik malzeme ve düşük iş fonksiyonu olan metaller ortam koşulunda kararlı değildirler. Nem ve oksijenle etkileşmektedirler (Hung et al., 1997). Bu malzemeleri havadan korumak için hava geçirmez bir madde ile enkapsülasyon uygulanması gerekmektedir. Literatürde, enkapsülasyon malzemesi olarak kullanılan birçok epoksi reçine türü bulunmaktadır. Enkapsülasyon uygulaması sonrasında, aygıt

içerisine nüfuz eden oksijen ve az miktarda suyu adsorbe etmek için, gaz giderici maddeler de kullanılmaktadır.



Şekil 1.8 Çok tabakalı bir OLED'in şematik gösterimi

Bir OLED'in aktif alanı iki elektrodun örtüşme alanı olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle, OLED'ler ilkesel olarak herhangi bir şekil ve boyuta sahip olabilir ve geniş bir uygulama aralığı için uygundur. Fakat laboratuvarında deneme amaçlı üretilen OLED'ler birkaç mm^2 'lik tipik bir boyuta sahiptirler. Hali hazırda ticari ürünlerde, OLED aktif alanı 50 cm^2 ve ötesinde ölçeklendirilmiştir. Genelde organik tabaka kalınlığı 10 ve birkaç 100 nanometre arasındadır. Akkor ampuller, ışık yayan diyotlar (LED'ler), doğrusal ışık kaynakları veya floresan tüpleri gibi diğer ışık kaynakların aksine, OLED'ler geniş alan ışık kaynağıdır.

Şekil 1.9'de iki organik katmanlı OLED'in temel çalışma prensibi gösterilmektedir (Schwoerer et al., 2007). Harici bir gerilim kaynağından genel olarak birkaç volt cihaza uygulandığında, yük taşıyıcılar iki zıt elektrotlardan enjekte edilmektedir. Böylece katottan elektronlar ve anottan boşluklar birbirine doğru akmaya başlamaktadır. Serbest elektronlar ve boşluklar ilk olarak karşılaştıkları zaman, "Langevin rekombinasyonu" adı verilen bir difüzyon işlemiyle, organik tabaka içinde coulombik bağlı eksitonlar oluşturabilmektedir. Ardından bu eksitonlar radyatif olarak bozulmaktadır. Şekil 1.9 görüldüğü gibi ayrıntılı olarak, tüm işlem dört temel adımdan oluşmaktadır.

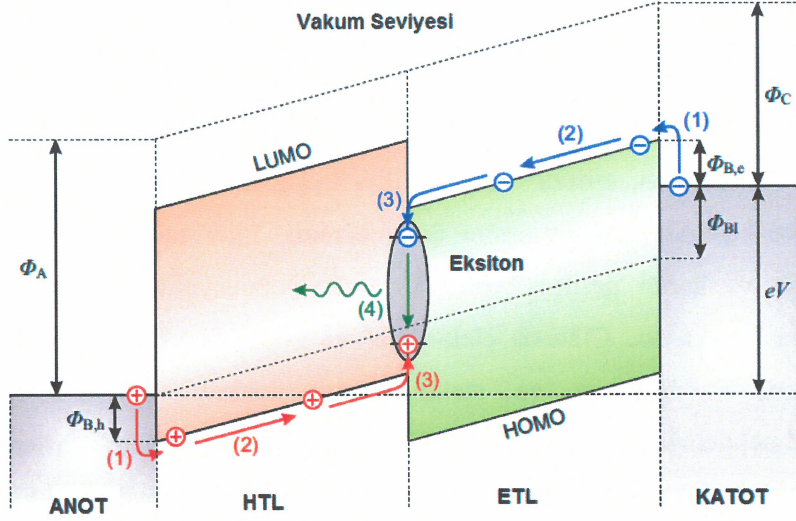
1. Elektronların ve boşlukların enjeksiyonu
2. Yük taşıyıcılarının taşınması

3. Elektronların ve boşlukların, bir araya gelerek eksitonları oluşturması
4. Eksitonların radyatif bozunumu ve ışık emisyonu

Yukarıda bahsedildiği gibi anot ve katot arasındaki iş fonksiyonu farkı nedeniyle yük bariyerleri, elektronların LUMO seviyesine ve boşlukların HOMO seviyesine enjekte olması için, mümkün olduğu kadar küçüktür. Fakat yine de boşlukların ve elektronların enerji bariyerlerinin aşılması gerekmektedir. İki elektrodun teması, organik tabaka boyunca bir içsel elektrik alanı üretmektedir. Bu içsel elektrik alan, cihaza harici gerilim uygulanmadığında enjekte edilmiş elektron ve boşlukların taşınmasını önlemektedir. Eğer negatif gerilim katota uygulanırsa ve harici gerilim, yerleşik temas potansiyelinden büyükse akım akmaya başlamaktadır. Cihazda elektronlar ve boşluklar, bir araya geldiğinde radyatif olarak bozunan ve elektroışmaya katkıda bulunan eksitonlar oluşturabilmektedirler. Tabaka kalınlıkları uygun bir biçimde ayarlandığında, rekombinasyon sadece HTL/ ETL arayüzeyi'nde meydana gelmektedir. Elektrotlar yakınındaki rekombinasyon genellikle eksitonların sönümlenmesine ve verimin azalmasına neden olmaktadır. Enerji aralığı ve eksiton enerjisi ve dolayısıyla yayılan ışığın dalga boyu, kullanılan malzemelere bağlıdır. Uygulanabilir organik yarı iletken seçiminde büyük bir çeşitlilik olduğu için, bütün görünür spektral emisyon renklerinde OLED imal etmek mümkündür. Farklı emisyon spektrumları ile çeşitli organik emitörlerin kombinasyonu, mükemmel bir renk dönüşüm indeksi (CRI) ile çok geniş bir beyaz emisyon spektrumunun oluşturulmasına imkan sağlamaktadır. Floresan tüpler ve içsel dar emisyon bantlarına sahip olan ve bu nedenle ekstra renk dönüşümü gerektiren LED'ler ile karşılaştırıldığında bu net bir avantajdır.

Beyaz yansıtıcı spektrumlu OLED'ler oluşturmak için çeşitli yöntemler bulunmaktadır (Krummacher et al., 2006; Andrade et al., 2004). Örneğin, mavi, yeşil ve kırmızı emisyon rengi olan, üç ayrı OLED yanyana yerleştirilebilmektedir. Bu yöntem, ekranlarda yaygındır ama büyük ve homojen emisyon alanı gerektiren genel ışıklandırma uygulamaları için uygun olmamaktadır. Bu amaçla, bir OLED içinde birbirinin üstüne üç emisyon katman yığını ya da üç tam monokromatik OLED yığını daha uygundur. Buna ek olarak, OLED'te beyaz ışık, mavi bir OLED ile kırmızı ve yeşil veya sarı bir harici renk

dönüştürücünün birleştirilmesiyle üretilmektedir. (Zhong et al., 2006; Yang et al., 2006) Yöntem ve malzemelerin seçimine bağlı olarak, CIE 1931 renk alanı içinde renk ve renk sıcaklıklarında büyük bir çeşitlilik elde edilmektedir.



Şekil 1. 9 İki tabakalı bir OLED aygıtında, yük taşınımı ve çalışma prensibi gösteren enerji diyagramı

1.5.1. OLED üretiminde kullanılan malzemeler

OLED malzeme seçimi, katı halde yüksek lüminesans kuantum verimi, iyi taşıyıcı mobilitesi (p ve n tipi), iyi bir film oluşturma özellikleri, yüksek termal ve oksidatif kararlılığı ve iyi bir renk saflığı (yeterli CIE koordinatları) gibi birkaç temel koşu kapsamaktadır. Daha önceden de bahsedildiği gibi, Tang ve Van Slyke tarafından fluoresan malzemelere dayalı ilk nesil verimli cihazlar sunulmuştur. Bu durumda ışık emisyonu, singlet eksiton rekombinasyonu sonucu oluşmaktadır. Ancak, iç kuantum verimliliği % 25 ile sınırlıdır. Fluoresan RGB(red, green, blue) malzemelerin tipik örnekleri, Tablo 1 gösterilmektedir. İkinci nesilde, tüm eksitonları verimli sistemler arası geçiş yoluyla triplet hallere geçiş yapan, fosforesan malzemeler kullanılmıştır. Bu gibi malzemeler, fluoresan malzemelere göre dört kat daha etkilidir. İridyum ya da platin gibi ağır atomların varlığı sistemler arası geçişi sağlar, spin-orbital bağlantıyı artırır ve radyatif triplet geçişlere izin vermektedir. Baldo ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalarda, OLED aygıt verimliliğini artırmak için yeşil fosforlu boya kullanımını ilk kez

rapor edilmiştir (Baldo et al., 1998). Şimdiye kadar en yüksek ışık verimliliği 70 lm W^{-1} , tris (2-fenilpiridin) iridyum (III) (Ir(ppy)_3), gibi fosforesan boya kullanarak Ikai ve arkadaşları tarafından rapor edilmiştir (Ikai et al., 2001).

Tablo 1.1 OLED yapıları ve elde edilen renkler

Renk	Malzeme	CIE		Verim		
		x	y	η_{ext} (%)	Cd A^{-1}	Lm W^{-1}
Mavi	DSA-doped DPVBi	—	—	2,4	2,8	1,5
	BCzVB-doped CBP	0,15	0,16	2,6	3,5	—
	BCzVB- doped DPVBi	0,15	0,14	5,7	7,0	—
	DPVBi	0,16	0,14	—	1,8	1,1
	SAIq	0,17	0,19	3,0	6,9	2,0
Yeşil	Alq3	—	—	1,3	—	—
	QA-doped Alq3	—	—	3,0	—	—
	coumarin-doped Alq3	—	—	2,5	—	—
	Alq3	0,39	0,55	—	2,6	—
	DMQA-Alq3doped	0,39	0,59	—	7,3	—
Kırmızı	DCM-doped Alq3	—	—	—	—	—
	DCJTB-doped Alq3	0,64	0,36	—	2,5	0,9
	DCJTB- and rubrene-doped Alq3	0,64	0,35	—	3,2	—
Beyaz	DPVBi/Alq3	0,28	0,34	—	4,7	2,9
	DCJTB-doped SAlq	0,33	0,39	2,0	6,6	2,3
	PAP-ph+ Alq3+ DCM-doped Alq3	0,35	0,34	1,9	3,9	2

OLED'ler için kullanılan malzemeler, amorf veya yarı-kristalli filmler oluşturmaktadır. Küçük molekülü OLED'ler için, tipik p-tipi malzemeler triarilamin türevler ve n-tipi malzemeler, tris (8-hidroksikolinolato) alüminyum (III) (Alq_3), triazol veya oksadiazoller gibi metal şelatları türevlerinden oluşur. Tablo 1.1 'de gösterildiği gibi ışık yayıcı tabakaya organik boyalar katkılayarak verimlilik artabilmektedir.

OLED bileşenleri organik malzeme tabakası sayısına göre değişmektedir. Temel olarak tek, iki veya üç katmanlı OLED'ler de vardır. Katmanların sayısı arttıkça cihazın verimi de artmaktadır.

OLED aygıtı aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır.

Altlık:

Altlık, OLED'i desteklemek için kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan altlıklar plastik, folyo ve cam'dır. Yayılan ışık şeffaf tabakanın içinden geçerse OLED cihazlar alt emisyonu cihazlar olarak sınıflandırılmaktadır.

Anot:

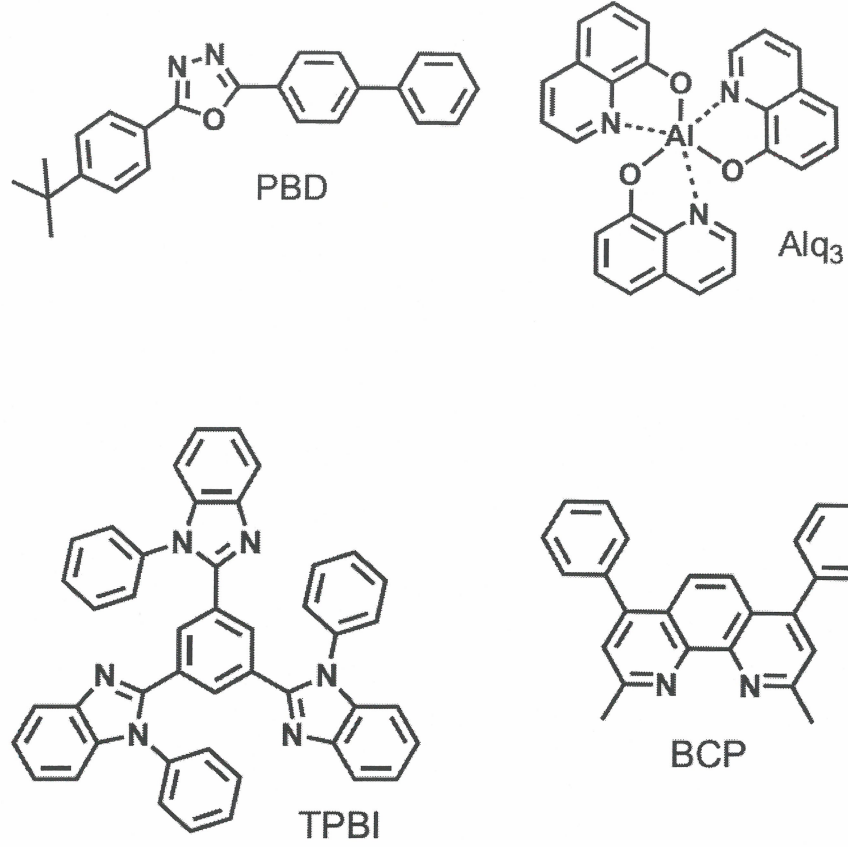
Genellikle kullanılan anot bileşeni, indiyum kalay oksit (ITO)'tir. Bu malzeme, görünür ışığı geçiren ve yeterli derecede iletkenidir. Ayrıca organik katmanın HOMO enerji seviyesine boşlukların enjeksiyonunu sağlayan yüksek bir çalışma fonksiyonuna sahiptir. Şeffaf elektrot olarak kullanılan ITO, poli (3,4-etilendioksitiyofen): poli (sitiren) (PEDOT: PSS) ile birlikte kullanıldığı zaman bu malzemenin HOMO enerji düzeyi ITO çalışma fonksiyonu ve diğer sık kullanılan polimerlerin HOMO düzeyi arasında yer alarak genellikle boşluk enjeksiyonunda enerji engelini azaltmasını sağlamaktadır. Grafen dayalı başka bir anot tür de, ITO-şeffaf anotlarla karşılaştırılabilir performans göstermektedir.

Katot:

Katot bileşeni gerekli OLED türüne bağlıdır. Genellikle baryum, kalsiyum ve alüminyum gibi metaller, katot olarak kullanılabilir. Daha düşük iş fonksiyonuna sahip bu elektrotlar, farklı tabakaların LUMO enerji seviyesine elektron enjeksiyonunu kolaylaştırmaktadırlar (Fried et al., 1999).

Elektron taşıma katmanı (ETL)

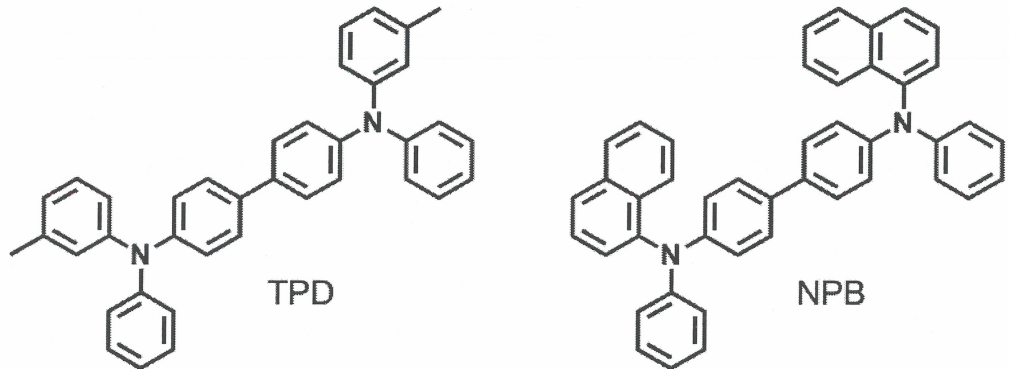
Elektron taşıma katmanında yaygın olarak kullanılan bileşenler şunlardır: PBD, Alq3, TPBI ve BCP.



Şekil 1.10 OLED'lerde Elektron taşıma katmanı olarak kullanılan bazı organik yarı iletkenler

Boşluk taşıma katmanı (HTL)

Genellikle boşluk taşıma katmanı olarak kullanılan p-tipi malzemelerdir. En yaygın kullanılanları TPD ve NPB dir.



Şekil 1.11 OLED'lerde boşluk taşıma katmanı olarak kullanılan bazı organik yarı iletkenler

Işık emisyon katmanı

Işık yayan organik tabaka sıkça kullanılan polifloren dışındaki organik plastik moleküllerden oluşmaktadır. Bu tür ışık yayıcılar, floresans veya fosforesans boyalar olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Organik yarıiletkenlerde boşluklar, genellikle elektronlardan daha hareketlidir. Yarı iletken bir organik molekülde, uyarılmış halde bulunan elektron, temel hale dönerken, genellikle görünür bölgede ışık emisyonu gerçekleşmektedir. Yayılan ışığın frekansı, yarı iletken malzemenin, bant aralığına bağlıdır. Bant aralığı, organik yarıiletkenler için HOMO ve LUMO enerji seviyeleri arasındaki farktır. Kullanım amacına göre, organik moleküller değiştirilerek, çeşitli renklerde ışık elde etmek mümkündür. OLED'lerde kullanılan organik yarı iletkenler için bir diğer önemli faktör de ışık yoğunluğudur. OLED'e uygulanan akım yükseltildikçe, ışık yoğunluğu da artmaktadır.

Engelleme ve enjeksiyon katmanları

Buharlaştırma yöntemi ile kaplanan küçük molekül tabanlı OLED'lerde farklı özelliklere sahip çok sayıda katman kullanmak mümkündür. Çok tabakalı OLED'lerle her bir katman optimize edilerek, optimum verimlilik miktarı elde edilebilmektedir. Örneğin, ETL içine geçen ve böylece emisyon katmanına katılan boşlukları engelleyen bir boşluk bloke tabakası (HBL) uygulamak mümkündür. Aynı zamanda, elektron engelleme katmanları (EBL) yük taşıyıcı dengesini arttırmak için kullanılabilir (Niu et al., 2007). Ayrıca engelleme tabakaları, yakın katmanlara eksiton difüzyonunu engelleyebilmektedirler (Adachi et al., 1990). Bu nedenle, emisyon katmanını içinde rekombinasyon bölgesini sınırlamak mümkündür. Buna ek olarak, boşluk ve elektron enjeksiyon tabakaları da (HIL ve EIL) kullanılabilir. Bu tabakalar HOMO ve LUMO seviyelerine sahip oldukları için elektrot düzeyi ve yük taşıma tabakalarının (HTL ve ETL) arasında yer alır. Böylece yük taşıyıcı enjeksiyonunda olan engeller azaltılabilmektedir. Prensip olarak, metal elektrot ve ITO'dan gelen yük taşıyıcılarının enjeksiyonunu geliştirmek için kalsiyum ve PEDOT: PSS, enjeksiyon tabakası olarak davranmaktadırlar. Kalsiyum ve diğer düşük iş fonksiyonlu metallerin yanı sıra, aynı zamanda LiF, alüminyum ile kombinasyon halinde sık sık elektron

enjeksiyon tabakası (EIL) olarak kullanılmaktadır (Hung et al., 1997; Choi et al., 2006).

1.5.2. Cihaz tasarımındaki gelişmeler

Bir tekli yayıcı OLED'in, elektron ve boşluk akımları eşit ($\lambda=1$) olsa, ve organik tabakanın ışıma kuantum verimliliği büyük (örneğin $q=\%100$) olsa bile, dış kuantum verimi küçük kalmaktadır. Bu hesaplardan, yüksek verim elde etmek üzere OLED'leri optimize etmek için alınması gereken önlemler ortaya çıkmaktadır: triplet seviyesinden radyatif bozunum elde edilmesi gerekmektedir; elektron ve boşluk akımları arasındaki denge korunmalıdır; yüksek ışıma kuantum verimli emisyon tabakaları kullanılmalıdır ve ışık yayımının geliştirilmesi gerekmektedir. OLED'lerdeki elektriksel mühendislik, esas olarak verimli enjeksiyon ve yük taşıyıcıların taşınması ve cihazlardaki elektron-boşluk dengesi üzerinde tasarımlar yapmaktadır.

1.5.3. Yük enjeksiyonunun ayarlanması

Tek katmanlı cihazlarda organik ışık yayan tabaka (EML)'nin, yüksek kuantum verimliliğin yanı sıra boşluk ve elektron enjeksiyonunu ve hareketliliğini koruma yeteneğine sahip olması gerekmektedir. Pek çok malzeme bu isteği karşılayamadığı için, çok katmanlı cihazlar yük enjeksiyonu ve hareketliliğini geliştirmek için tasarlanmıştır. Aslında, yük enjeksiyonu ve taşınımı, işletim gerilimi ve luminesans verimliliğini belirleyen sınırlayıcı faktörlerdir. Genel olarak, bir OLED verimliliği, yük dengesi, eksitonların radyatif sönümü ve ışık ekstraksiyonu tarafından belirlenmektedir. OLED'lerde boşluk akımı, enjeksiyon ile sınırlanmaktadır. Elektron akımı ise, güçlü bir şekilde, metal-organik etkileşimleri nedeniyle ortaya çıkan tuzaklardan etkilenmektedir. Taşıyıcı enjeksiyonunu arttırmak için, elektron enjeksiyonunu verimli yapan katot malzemelerinin seçimi ve anotların düzgün yüzey uygulaması büyük önem taşımaktadır. Verimli elektroluminesans aygıtların yapımında, boşluk ve elektron enjeksiyon bariyerleri kritik faktörlerdir. HOMO enerji seviyesinde ve anot çalışma fonksiyonu (Φ_a) veya LUMO ve katot çalışma fonksiyonu (Φ_c) arasında

büyük bir uyumsuzluk varsa, yük enjeksiyonu düşük olacaktır (Kulkarni et al., 2004). Işık yayan tabaka ve elektrot arasına eklenen elektron veya boşluk ilgisi yüksek tabakalar, yük enjeksiyon bariyerini azaltmaktadır. OLED'lerde yük enjeksiyon bariyerinin iyi ayarlanması sonucunda parlaklıkta ve EQE'de ciddi gelişmeler sağlanmıştır (Hung et al., 1997; Choi et al., 2006). Yük taşıyıcılarının enjeksiyonunu, taşınmasını ve rekombinasyonunu geliştirmek ve kontrol etmek için elektron ve boşluk taşıyan malzemeler, ayrı tabakalar halinde uygulanmaktadır (Kraft et al., 1998; Friend et al., 1999). p-tipi bir ışık yayan tabakaya sahip, iki tabakalı bir OLED cihazda ETM tabakasının bulunması, sadece elektron enjeksiyon bariyerini düşürmekle kalmaz aynı zamanda boşluk engelleyici olarak da davranmaktadır. Bunun nedeni ETM'nin genelde yüksek iyonlaşma potansiyeline sahip olmasıdır. Diğer taraftan çoğu ışık yayan tabakanın boşluk mobilitesi elektron mobilitelerinden yüksektir. OLED'lerde ETM tabaka kullanarak, sanal bir bant dengeleme ile boşluk akımı azaltılmaktadır (Friend et al., 1999; Sheats et al., 1996). Aynı şekilde alüminyum kinolat (Alq_3) (Tang et al., 1987; Tang et al., 1989) veya polikinolin (Zhang et al., 2000) gibi n-tipi ışık yayan tabakanın kullanıldığı OLED aygıtlarında, HTM kullanımıyla boşluk mobilitesi artırılıp ve elektronlar engellenerek, önemli performans artışları elde edilmektedir.

Taşıyıcı tabakanın katkılanması:

OLED'lerde kullanılan yük taşıyıcı tabakalar kimyasal olarak katkılanmaktadır. Bu sayede, düşük işletme gerilimi ve geliştirilmiş verimlilik sağlayarak taşıma katmanları içinde hareket artışına izin verilmektedir (Walzer et al., 2007). Her iki taşıyıcı (elektronlar ve boşluklar) enjeksiyon oranları yüksek verimlilik için hemen hemen eşit olmalıdır. Aksi takdirde, fazla elektronlar ya da boşluklar rekombinasyona uğramamakta ve düşük çalışma verimine neden olmaktadır (Scott et al., 2000). Ama OLED yapısında birden fazla organik tabaka kullanılarak bu dezavantajın üstesinden gelinebilmektedir. Işık yayan tabaka, ETL ve HTL arasında bir katman olarak veya rekombinasyon bölgesine yakın olan bu katmanlardan birine katkılanmış bir şekilde bulunmaktadır. Organik moleküler malzemeler düşük mobilitelere (10^{-8} - 10^{-2} cm^2 / Vs mertebesinde) sahiptir. Daha önceden de belirtildiği gibi, organik malzemelerde elektron mobilite genelde

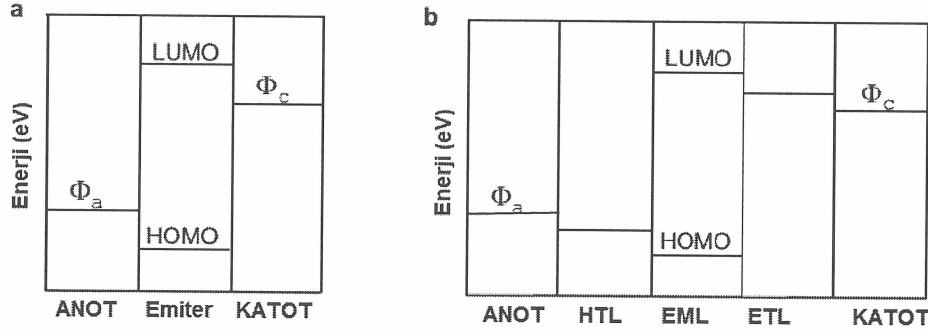
boşluk mobilitesinden daha düşüktür (Kepler et al., 1995; Chen et al., 1999). Sonuç olarak düşük işletme gerilimi ve yüksek güç verimliliği, ışık yayan bölgeye katot tarafından akan elektron akımı ile kontrol edilmektedir. Bu argüman ayrıca, Alq_3 tabakasından daha düşük elektrik alana sahip NPS tabakası bulunan bir OLED'in, besleme gerilimi altında, iç elektrik alanı ölçülerek kanıtlanmıştır (Yamada et al., 2000).

ETL'nin katkılandırılması:

OLED aygıtında, besleme gerilimini düşürmenin en iyi yöntemlerinden biri de ETL'nin n-tipi katkılandırılmasıdır (Kido et al., 1998). Alq_3 , az bir miktarda Li ile katkılandırılmasıyla parlak OLED aygıtları elde edilmiştir. ITO/NPB/ Alq_3 /Li- Alq_3 /Al konfigürasyonu ile yapılan bir OLED aygıtında, toplam Alq_3 tabakası kalınlığı sabitken, katkılanmış Alq_3 tabakasının kalınlığı arttıkça, akım yoğunluğu, ani bir şekilde artmaktadır. Bu yaklaşımda, katkılanmış Alq_3 'ün iletkenliğinin artmasının yanında, Alq_3 /Al arayüzeyindeki elektron enjeksiyon bariyeri de düşmektedir.

HTL katkılandırılması

Katkılandırmanın, OLED aygıtlarının özelliklerini geliştirdiği belirlendikten sonra, HTL'nin de p-tipi katkılandırılması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, katkılandırmanın, HTL'nin hacimsel iletkenliğini arttırdığını ve ITO'dan katkılanmış HTL'ye daha verimli boşluk tünel akımı elde edilmesini sağlayan daha ince uzay yükü (space charge) tabakasının oluştuğu gözlemlenmiştir (Adachi et al., 1990; Hung et al., 1997). Boşluk iletim malzemesi olarak kullanılan, vanadilftalosiyenin (VOPc), tetrafloro-tetrasiyano-kinodimetan (F4-TCNQ) ile beraber süblimleme edilere katkılandırıldığında, iletkenliğin arttığı ve katkılandırma derecesi artırıldıkça, Fermi seviyesinin valans bandına kaydığı tespit edilmiştir (Choi et al., 2006).



Şekil 1.12 a) tek tabaka OLED'te ve b) çok tabakalı OLED'lerde, HTL, ETL ve EL tabakalarının enerji seviyelerini gösteren diyagram

1.5.4. Fosforesans OLED

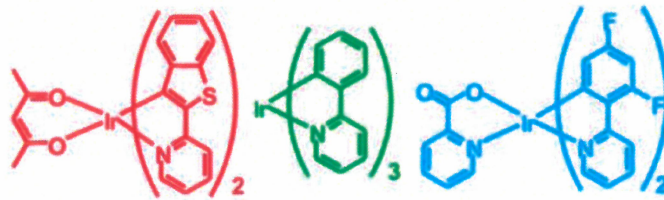
Daha önceden de bahsedildiği gibi OLED uygulamalarında organik fosforesans malzemelerden, teorik olarak, floresans malzemelere göre dört kat daha fazla verim elde etmek mümkündür (Shuai et al., 2000). Fosforesans OLED'ler hem singlet hem de triplet hal eksitonlarıyla yüksek miktarda ışık üretebilmektedirler (Shuai et al., 2000; Ho et al., 2000). Bu tür aygıtlarla, %100 EQE'ne ulaşmak mümkündür (Fery et al., 2005). Singlet veya triplet hal elektronların ve boşlukların birleşimiyle meydana gelen bir eksiton, bir küçük molekülde veya bir polimerin belli bir kısmına yerleşebildiğinden, bir parçacık olarak tanımlanabilmektedir. Fosforesansın luminesans üreten elektronik geçiş hızı floresanstan daha yavaştır. Her iki süreç de uyarılmış bir halin temel hale dönüşünü gerektirmektedir. Fakat fosforesansta kuantum mekaniği açısından yasaklı bir geçiş bulunduğundan triplet eksitonun yaşam ömrü daha uzundur. Fosforesans bazen saniyeler mertebesinde devam ederken, nano saniye mertebesinde yaşam süresi olan floresans süreci birçok kez gerçekleşebilmektedir. Elektriksel uyarılma sırasında, her bir singlet eksitona karşılık üç tane triplet eksiton oluşmaktadır. Ama temel haldeki spinleri uygun olduğu için yalnızca singlet eksitonlar floresans üretmektedir (Köhler et al., 2002; Rothe et al., 2006). Eksitonlar, düşük enerjili hale dönüşleri sırasında ışık ve/veya ısı üretmektedirler. Geleneksel floresans emisyonlarında, eksitonların en fazla %25'i ışık üretebilirken, geri kalanı ısıya dönüşmektedir. Bu nedenle, triplet halde eksitonlar luminesans üretmediği için OLED verimi %25'in üzerine çıkamamaktadır. Spin değişimi nedeniyle triplet halden durulma yasaklı olmasına rağmen, bazı

durumlarda spin değişiminin gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu durumda, triplet halin durulması yavaş olmasına rağmen fosforesans üretilmektedir.

Oda sıcaklığında gerçekleşen verimli fosforesans süreci çok nadirdir ve OLED içinde kullanılan diğer malzemelerin sönmeme yapması nedeniyle, verimli fosforesans OLED eldesi oldukça zordur. Bu soruna çözüm olması amacıyla lüminesant malzemenin yük transferi yapan bir konak malzemeye katkılanması fikri geliştirilmiştir (Chance et al., 1978). Bu sayede bir veya iki yolla emisyon üretilmektedir; 1-) yük taşıyıcıların direkt tutulması ve lüminesant boya üzerinde eksiton oluşumu; 2-) ya da konak üzerinde eksiton oluşumu ve lüminesant konuğa enerji transferi sonucunda. Bu nedenle, konuk malzemenin, fosforesans olması yeterli değildir, aynı zamanda elektriksel uyarma sonucu oluşan triplet halleri de toplayabilmelidir. Ek olarak, boşluk engelleyici tabakanın (HBL) veya HBL özelliği taşıyan EML kullanılmasıyla, triplet eksitonlar EML'da sınırlanır ve bu sayede yüksek verimli fosforesans OLED'ler üretilmektedir (Baldo et al., 1998; Wilson et al., 2001).

Ağır atomlar, yük aktarıcı konağa yerleştirildiğinde, spin-orbital eşleşmesi nedeniyle, triplet hallerin durulması zayıf bir şekilde izinli hale gelir ve fosforesans ışımaya gerçekleşmektedir (Sun et al., 2001). Genelde, metal kompleksleri, poli(n-vinilkarbazol) gibi bir konak polimere katkılanmaktadır. Fosforesans malzeme olarak ise literatürdeki en popüler metal kompleksleri iridyum (Ir) kompleksleridir (Baldo et al., 1998). Ir komplekslerinde farklı ligantlar kullanılarak, yeşil, kırmızı ve mavi ışık elde etmek mümkündür. Literatürde platinyum gibi farklı ağır atom kompleksleri de bulunmaktadır (Ho et al., 2000).

Şu unutulmamalıdır ki kullanılan fosforesans malzemenin, eksiton enerjisi konağın triplet seviyesinden düşük olmalıdır. Örneğin, kırmızı fosforesans malzeme, mavi fosforesans bir hostla kullanılabilir.



Şekil 1.14 RGB ışık yayıcı olarak kullanılan, fosforesans Ir kompleksleri

Metal komplekslerinin, merkezinde bulunan ağır atomlar, güçlü spin-orbital eşleşmesi göstermektedir ve bu sayede singlet-triplet halleri arasında sistemler arası geçiş (intersystem crossing) gerçekleşmektedir. Bu tür fosforesans malzemeler kullanıldığında hem singlet hem de triplet halden durulmalar, ışımalı olarak gerçekleşmektedir. Böylece sadece singlet halin emisyonu katkıda bulunduğu bir OLED'e göre, fosforesans OLED'ler daha yüksek IQE'ne sahip olmaktadır. Polihedral oligomerik silseskioksan (POSS) gibi bir makromolekül ile birlikte, Ir gibi bir fosforesans türün kullanılması ile üretilen OLED aygıtından 10.000 cd/m²'lik parlaklık elde edilmiştir.

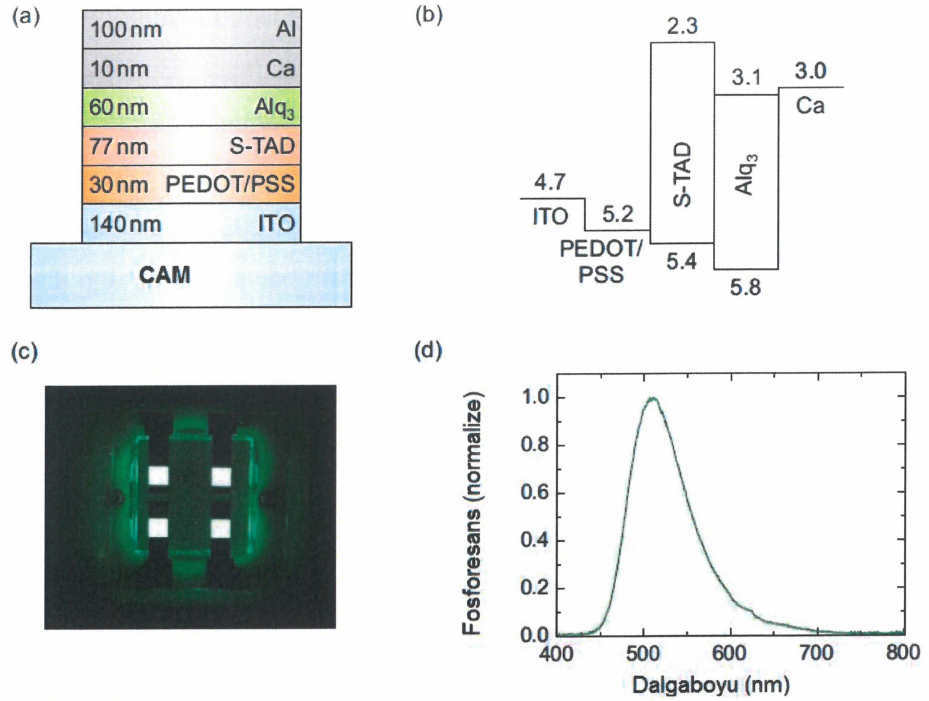
Dendirimerler de OLED'lerde fosforesans malzeme olarak kullanılan önemli bir sınıftır. Makromolekülün farklı kısımları seçilerek, istenilen optoelektronik ve işlem özelliklerine sahip malzemeler elde etmek mümkündür. Literatürde %16 EQE'ne sahip fosforesans dendrimerler rapor edilmiştir. Dendirimerlerin çözünürlükleri yüksek olduğu için kolay işlenebilmektedirler ve ince panel ekran teknolojileri gibi yeni alanlarda uygulamalara olanak sağlanmaktadır (Chen et al., 2007).

Aynı zamanda, polimer tabakası çözünmez hale getiren, çapraz bağlantısı ile çok tabakalı polimer OLED üretilmesi mümkün olabilmektedir (Adachi et al., 1989) Bununla birlikte, küçük molekülü OLED'ler tipik olarak polimer OLED ile karşılaştırıldığında daha yüksek verim ve kullanım ömrüne sahiptir.

1.5.5. OLED aygıt uygulamaları

Çift tabaka yeşil OLED:

PEDOT-PSS ve elektrotlara ek olarak, iki ayrı tabakanın bulunduğu OLED türüdür. Alq₃'ün hem ETL hem de emisyon katmanı olarak kullanıldığı OLED aygıtı, Şekil 1.13 'te gösterilmiştir. Bu yapıda, alüminyum (Al, 4,2 eV) elektrottan önce, düşük iş fonksiyonuna sahip kalsiyum (Ca, 3,0 eV) ince bir tabaka halinde kaplanmıştır (Al Attar et al., 2006; Riel H., 2002; Mu H et al., 2007).



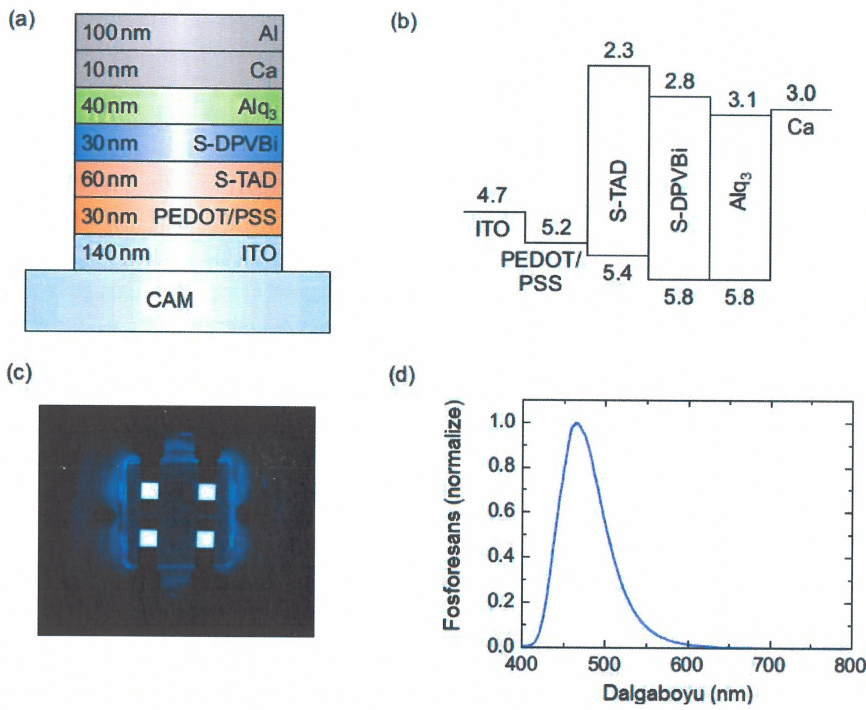
Şekil 1.15 a) yeşil OLED aygıtının yapısı b) enerji diyagramı c) aygıtın çalışma görüntüsü d) dalgaboyuna göre normalize fotoluminesans eğrisi

Alq₃ ve S-TAD sırasıyla iyi birer elektron ve boşluk taşıyıcı malzemelerdir. Fakat karşıt yük taşıma potansiyelleri çok zayıftır. Bu nedenle yük taşıyıcıların bir bölümü Alq₃ / S-TAD arayüzeyinde engellenmektedir (Şekil 1.14 b). Rekombinasyon oluşumu, diğer bir deyişle ışık oluşumu, Alq₃ tabakasının arayüzeye yakın, dar bir kısmında gerçekleşmektedir. Bu sayede katoda yakın bölgedeki ışımasız rekombinasyon miktarı minimize edilmektedir. Alq₃'ün emisyon maksimumu, 510-530 nm aralığındadır (Şekil 1.14 c ve d). Buradan da anlaşılacağı gibi, organik malzemelerin emisyonları geniş bir banda sahiptir ve bu sayede geniş ışık skalası gerektiren aydınlatma uygulamaları için çok elverişli malzemelerdir.

Üç tabakalı mavi OLED:

OLED uygulamalarındaki bir diğer gelişme, üç tabaka halinde üretilen OLED aygıtlar ile mavi ışık yayımının elde edilmesidir (Şekil 1.15). Doğru HOMO ve LUMO enerji seviyelerine sahip organik malzemeler seçilerek elektronlar, HTL arayüzeyinde ve boşluklar da ETL arayüzeyinde engellenebilirse, üç tabakalı OLED aygıtlarda rekombinasyon bölgesini sınırlamak mümkün olabilmektedir (Şekil 1.15 b) (Adachi et al., 1990). Bu

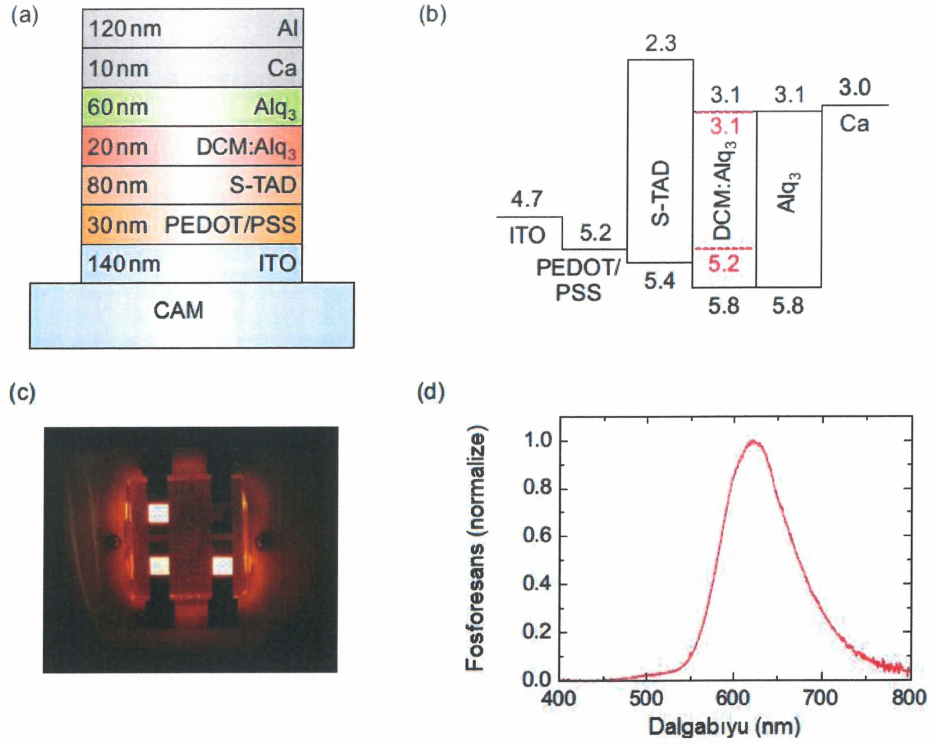
çalışmada, kullanılan malzemelerin enerji seviyeleri optimize edilmemiştir fakat üç tabakalı OLED aygıtının temel konsepti açıklanmıştır. Emisyon katmanında kullanılan S-DPVBİ, 465 nm civarında bir mavi emisyonu sahiptir (Şekil 1.15 c ve d). Kuantum verimi (q), Alq_3 'e göre oldukça yüksektir ve sikloheksan içinde yaklaşık %82 olarak rapor edilmiştir (Sperh et al., 2003). Spiro bileşiği olan, S-DPVBİ ve S-TAD'ın camsı geçiş sıcaklıkları $130^\circ C$ civarında olduğu için, üretilen OLED aygıtları oldukça kararlıdır.



Şekil 1.15 a) mavi OLED aygıtının yapısı b) enerji diyagramı c) aygıtın çalışma görüntüsü d) dalgaboyuna göre normalize fotoluminesans eğrisi

Fluoresans konuk-konak sistemli kırmızı OLED:

Yüksek verimli OLED aygıtı üretimi için geliştirilen yöntemlerden biri de konak matriksinin içine, küçük bir miktar konuk malzeme eklenerek katkılandırmasıdır. Işık yayan bir dopantın, matriks içine katkılandırılması sonucunda hem optiksel özelliklerin geliştirilmesi hem de rekombinasyon veriminin artırılması sağlanabilmektedir. Şekil 1.16 a'da, sistemin basit bir gösterimi yer almaktadır.



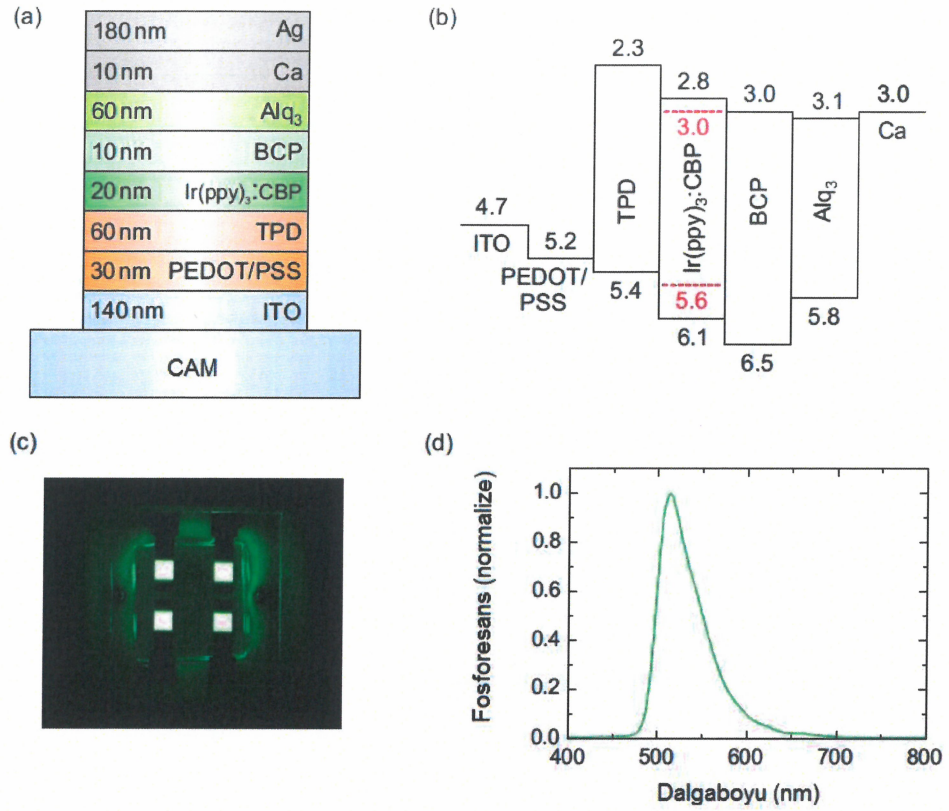
Şekil 1.16 a) kırmızı OLED aygıtının yapısı b) enerji diyagramı c) aygıtın çalışma görüntüsü d) dalgaboyuna göre normalize fotoluminesans eğrisi

Bu sistemde, konak olarak Alq₃ kullanılmaktadır ve ağırlıkça %5 DCM içermektedir. Alq₃ üzerinde singlet bir eksiton oluşması durumunda, tabaka boyunca hareket edecektir. Bu süreç içinde, eksiton bir konuk malzeme ile karşılaşır, DCM'in bant aralığı daha dar olduğu için burada tuzaklanacaktır. Daha sonra ise, DCM'den ışık yayımı gerçekleşecektir (Schwoerer et al., 2007). Bu sayede, aygıttan alınan floresans, genelde DCM kaynaklı olacaktır (Şekil 1.16 c ve d).

Şekilde gösterilen aygıtta, DCM oranı fazla tutulduğu için, konuk malzemenin kendisini sönmemesi sonucu düşük parlaklık elde edilmiştir. Daha sonra yapılan çalışmalarda, DCM oranı %0,5'e düşürülmesi ile daha yüksek verimlere ulaşıldığı rapor edilmiştir (Tang et al., 1989). Şekil 1.16 (d)'de, DCM oranının çok yüksek olmasına rağmen hala daha bir miktar Alq₃ emisyonu gözlemlenebilmektedir. Bunun nedeninin, bir kısım eksitonun, ETL/HTL arayüzeyinden katılanmamış Alq₃ tabakasına difüzlenmesinin olduğu gösterilmektedir. Bu tür bir difüzlenmeyi önlemek için, daha sonraki bölümde açıklanacak bir engelleyici tabaka kullanılmalıdır.

Fosforesans konuk-konak sistemli yeşil OLED:

Yukarıda gösterilen tüm floresans OLED'lere karşın, bu bölümde fosforesans OLED'ler sunulmaktadır. Fosforesans OLED'lerin temel prensibi, ağır metal atomu içeren bir konuk malzeme kullanımıdır. Yüksek atom numaralı atomlarda, spin-orbital eşleşmesi fazla olduğu için tercih edilmektedirler. Bu sayede birinci uyarılmış singlet enerji seviyesi (S_1) ile birinci uyarılmış triplet enerji seviyesi (T_1) iç içe girebilmektedir ve hem singlet halden hem de triplet halden ışık yayımı gerçekleşebilmektedir. Uygun bir konuk-konak çifti seçildiğinde, matriks malzemenin triplet halleri de fosforesans dopant tarafından toplanabilmekte ve tüm singlet ve triplet haller kullanılabilir. Bu sayede, IQE, %100'e çıkabilmektedir. Bu konsept, ilk olarak Baldo ve çalışma arkadaşları tarafından, 2,3,7,8,12,13,17,18-oktaetil-21H-porfin platin (PtOEP) ve Alq₃ tabakası kullanılarak ortaya konulmuştur (Baldo et al., 1998). Bu sistem, uzun uyarılmış hal ömrüne sahiptir ve bu nedenle düşük verimlidir (Baldo et al., 1998). Fosforesans OLED'ler için mihenk taşı olarak kabul edilen çalışma, Ir(ppy)₃'nin konuk malzeme olarak kullanıldığı ve 1µs'den daha az uyarılmış hal ömrüne sahip sistemin geliştirilmesidir. Bu konfigürasyonla şimdiye kadar, %60'lık ışınım kuantum verimine ulaşılmıştır (Mladenovski et al., 2009; Baldo et al., 2000; Baldo et al., 1999).



Şekil 1.17 a) fosforesans yeşil OLED aygıtının yapısı b) enerji diyagramı c) aygıtın çalışma görüntüsü d) dalgaboyuna göre normalize fotoluminesans eğrisi

Şekil 1.17 (a)'da, CBP içine ağırlıkça %6 katkılanmış Ir(ppy)₃ ile üretilmiş OLED aygıtı görünmektedir. %6'lık katkılama ile çok güçlü bir sönmeme gerçekleşmemektedir fakat yapılan çalışmalarda bu oranın optimum katkılama oranı olduğu belirlenmiştir (Baldo et al., 1999; Kawamura et al., 2005). Matriks olarak kullanılan CBP, ambipolar özellik göstermektedir, yani hem elektronları hem de boşlukları taşıyabilmektedir. Fakat, boşluk mobilitesi daha büyüktür (Matsushima et al., 2005; Adachi et al., 2002). Şekil 1.17 (b)'de gösterilen enerji seviyelerine göre, iridyum kompleksinin LUMO ve HOMO enerji seviyeleri, CBP'nin enerji seviyelerinin arasında kalmaktadır. Bu sayede CBP'de oluşturulan yük taşıyıcıları, iridyum kompleksinde etkili bir şekilde tuzaklanmaktadır.

Şekil 1.17 (c) ve (d)'de görüldüğü gibi, OLED'tan yeşil ışık elde edilebilmektedir. Aygıtta, elektrot olarak gümüş (Ag, 4,5 eV) kullanılmaktadır. Bu sayede hem yüksek elektron enjeksiyonu hem de ışık yansıması elde edilmiştir. EML ve ETL tabakaları arasında ise, ince bir BCP tabakası kullanılarak boşluklar engellenmiştir. Bu sayede, ETL'ye eksiton difüzyonu

engellenerek, Alq₃'ten emisyonun ve verim düşüşünün önüne geçilmiştir (Wu et al., 2003; Choudhury et al., 2008; Baldo et al., 1999; O'Brien et al., 1999).

1.5.6. Dış Kuantum Verimi

OLED'lerin spektral karakterizasyonlarının yanında, en önemli karakterizasyon parametresi, dış kuantum verimi (EQE)'dir. Bu parametre, cihazdan yayımlanan fotonların, cihaza enjekte edilen yük taşıyıcılarına oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$\eta_{EQE} = \gamma \cdot \eta_{ST} \cdot q_{eff} \cdot \eta_{out} \quad (1.1)$$

Bu eşitlikte, γ yük taşıyıcı dengesi, η_{ST} izinli spine sahip eksiton fraksiyonunu (bazen singlet/triplet faktörü olarak tanımlanmaktadır), q_{eff} , ışık yayan maddenin etkin ışıyım kuantum verimini ve η_{out} ise çıkış kuantum verimini göstermektedir.

Yük taşıyıcı dengesi (γ) birim zamanda enjekte edilen ve taşınan elektron ve boşlukları ifade etmektedir. Eğer enjekte edilen tüm elektron ve boşluklar, rekombinasyonla tüketilirse; $\gamma=1$ olmaktadır. Eğer elektron ve boşluk sayıları birbirinden farklıysa, fazla sayıdaki yük taşıyıcıları ışık üretimine katılmaz ve OLED'in verimi düşük çıkacaktır. Yük taşıyıcılarının sayılarını eşit seviyede tutmak için, doplama veya yük bloklayıcı tabakaların eklenmesi gibi yöntemler kullanılmaktadır.

İzinli spine sahip eksiton fraksiyonunu, η_{ST} , spin seçim kurallarına göre ışıyarak bozulan eksitonların oluşum ihtimalini tanımlamaktadır. Bir OLED aygıtına elektrik uygulanması durumunda, elektron ve boşlukların rekombinasyonu ile singlet ve triplet eksitonlar oluşmaktadır. Fakat triplet eksiton oluşma ihtimali, singlet eksiton oluşma ihtimalinden üç kat daha fazladır. Bunun nedeni, enjekte edilen elektronların ve boşlukların spin yönelimleri aynıdır ve her bir triplet hal, üç dejenere halden oluşmaktadır. Sonuç olarak, sadece singlet eksitonların kullanıldığı bir floresans emisyonu yapan sistemde η_{ST} 'nin değeri % 25'tir (Baldo et al., 1999, Segal et al., 2003). Ancak bu değer, triplet-triplet yok edilişi ile büyütülebilmektedir (Kondakov et al., 2009; Luo et al., 2010). Konjuge

polimerlerde, η_{ST} , %25'ten daha büyük olmaktadır (Wohlgenannt et al., 2001, Shuai et al., 2000; Ho et al., 2000; Köhler et al., 2002; Rothe et al., 2006). OLED'lerde, singlet ve triplet eksiton üreten fosforesant malzemeler kullanarak, η_{ST} değerini %100'e çıkartmak mümkün olmaktadır (Baldo et al., 1998; Wilson et al., 2001; Sun et al., 2006).

Işık yayan tabakanın q_{eff} , etkin ışınım kuantum verimi ise, fotolüminesans kuantum verimi veya gerçek ışınım kuantum verimi ile tanımlanmaktadır. OLED aygıtın içindeyken, yayımlanan foton sayısının absorplanan fotona oranı, fotolüminesans kuantum verimini vermektedir (Nowy et al., 2008; Becker et al., 1998; Sun et al., 2006). Gerçek kuantum verimi (q) ise,

$$q = \frac{\Gamma_r}{\Gamma_r + \Gamma_{nr}} \quad (1.2)$$

Şeklinde tanımlanır. Bu denklemde Γ_r , ışınımlı durulma hızı ve Γ_{nr} ise ışımasız durulma hızıdır. Denklemden de açıkça görüldüğü gibi, ışımasız durulma miktarındaki artış, ışınım kuantum verimini düşürmektedir. OLED uygulamaları için, q değerinin 1 olması idealdir. Literatürde, gerçek ışınım kuantum verimi, 0,5 ile 1 arasında olan birçok malzeme bulunmaktadır.

Tam homojen bir ortamda, q_{eff} ile q birbirine eşittir. Fakat OLED'de bulunan farklı optik özelliklere sahip tabakalar nedeniyle, ışınım hızının modifiye edilmesi gerekmektedir;

$$\Gamma_r \rightarrow \Gamma_r^+ = F * \Gamma_r \quad (1.3)$$

Eşitlikteki F , Purcell faktörüdür (Chen et al., 2007 ; Neyts et al., 1998). Tam aksine, uyarılma enerjisinin ısı enerjisine dönüştüğü ışımasız durulmalar, OLED ortamından etkilenmemektedir (Wasey et al., 2001). Böylece, etkin ışınım kuantum verimi,

$$q_{eff} = \frac{F * \Gamma_r}{F * \Gamma_r + \Gamma_{nr}} \quad (1.4)$$

Şeklinde tanımlanabilmektedir.

OLED aygıtının ortamı, etkin ışınım kuantum verimini olumlu veya olumsuz şekilde etkileyebilmektedir. Bu nedenle, OLED tabakalarının optimizasyonu, verim açısından kritik öneme sahiptir.

γ , η_{ST} ve q_{eff} ile bir aygıtta üretilen fotonların, aygıtta enjekte edilen yüklere oranı olan iç kuantum verimi (η_{int}) elde edilmektedir. Böylece, 1,1 eşitliği;

$$\eta_{EQE} = \eta_{int}\eta_{out} \quad (1.5)$$

Şeklinde yazılabilmektedir. OLED cihazlarda kullanılan, yüksek ışınım kuantum verimine sahip fosforesent malzemeler ile, 1'e yakın η_{int} elde etmek mümkündür (Adachi et al., 2001; Williams et al., 2007; Seo et al., 2010).

Çıkış kuantum verimi veya çıkartılan ışık verimi, η_{out} , aygıttan çıkan foton miktarını tanımlamaktadır. Maalesef cihaz içinde, ışığın kaybına neden olan bir çok etken bulunmaktadır. Bu nedenle η_{out} , 1,1 eşitliğinde, dış kuantum verimini sınırlayan en önemli faktördür.

OLED aygıtında üretilen ışığın, asıl gözlemci olan, insan gözünün tespit edebilmesine göre de sayısal hale getirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, aygıttan elde edilen, toplam görünür bölge ışığı tespit edilmelidir. Görünür bölgede yayılan toplam ışık akısı, Φ_v , yayılan her dalga boyundaki ışık akısının, $\Phi_{R\lambda}$, gözün yanıt eğrisiyle, $V(\lambda)$, çarpımı ve tüm görünür bölge spektrumunun toplamıyla tespit edilmektedir (Kühlke et al., 2007). Düzeltme faktörü olarak da “photonic constant ($K_m=683 \text{ lm/W}$)” kullanılmaktadır.

$$\Phi_v = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} V(\lambda) * \Phi_{R\lambda} d\lambda \quad (1.6)$$

Φ_v ve $\Phi_{R\lambda}$ 'nin birimleri, sırasıyla lümen (lm) ve lümen/Watt (lm/W)'tır.

Dış kuantum veriminin yanında, ışık verimi (aydınlatma verimi) η_p (ışık güç verimi olarak da söylenebilir) de önemli bir parametredir. Işık akısının Φ_v , aygıtta uygulanan elektriksel güce oranı ile tanımlanmaktadır (Schwoerer et al., 2007; Forrest et al., 2003; Diekmann et al., 2008).

$$\eta_p = \frac{\Phi_v}{I \cdot V} \quad (1.7)$$

Bu eşitlikte, η_p 'nin birimi lm/W olmaktadır.

Bir Lambertian ışık kaynağı için, yüzey normaline bir θ açısındaki, ışık yoğunluğu $I_v(\theta) = I_0 \cdot \cos \theta$ 'dır. Eşitlikteki, I_0 (cd), yüzeye dik gelen ışık yoğunluğudur. Bu tür ışık kaynakları için, lüminesans, L_v (cd/m²), tüm açılarda sabittir ve ışık verimi;

$$\eta_p = \frac{\pi \cdot sr \cdot L_v}{j \cdot V} \quad (1.8)$$

Şeklin'de elde edilmektedir. Eşitlikte, j akım yoğunluğunu (mA/cm²), sr (steradian, 1 sr = 1 m²/m²=1), katı cisim açı ölçüsünü göstermektedir. Steradian kullanılarak, candela (cd), lümene (lm) dönüştürülmektedir (1 lm = 1sr*1cd).

OLED aygıtların karakterizasyonundaki bir diğer parametre de akım verimi (η_L , cd/A)'dir. Lüminesansın, akım yoğunluğuna oranı olarak tanımlanmaktadır (Forrest et al., 2003).

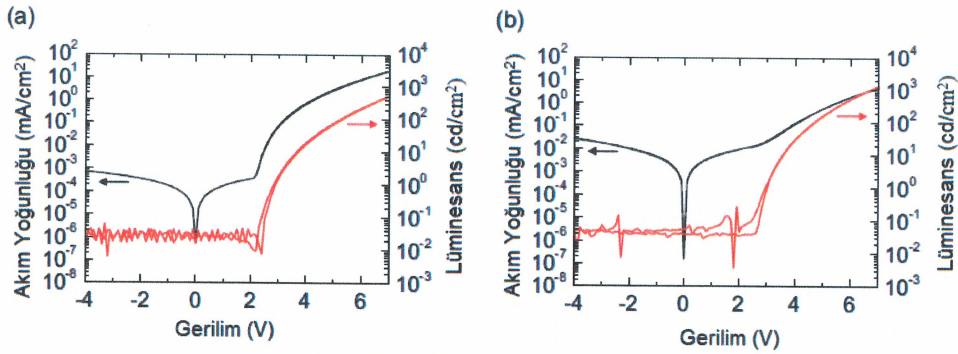
$$\eta_L = \frac{L_v}{j} \quad (1.9)$$

Bir OLED aygıtına uygulanan gerilim, EQE ve akım verimine direkt etki etmese de ışık verimine (η_p) etki etmektedir. Diğer taraftan, yük enjeksiyon bariyerinin ve yük aktarım direncini mümkün olduğunca düşük tutarak, az enerji tüketen bir OLED aygıtı eldesi için, gerilim kayıplarının minimuma indirilmesi önem taşımaktadır.

1.5.7. Akım-Gerilim-Lüminesans Karakteristikleri

OLED'lerin bazı temel elektriksel ve optiksel özellikleri, akım-voltaj-lüminesans karakteristiklerinden türetilmektedir. Bu grafiklerde, birkaç volt değerine sahip bir gerilime (V) karşı, akım yoğunluğu (J) ve lüminesans, yarı-logaritmik eğri olarak gösterilmektedir. Şekil 1.18'de daha önceden yapılmış Alq₃,

temelli bir OLED çalışmasına ait diyot karakteri göstermektedir [Jörg Frischeisen., June 2011]. Ters besleme sırasında çok küçük bir akım geçerken; normal besleme sırasında, gerilim, 2 V'un üzerine çıkar çıkmaz akım yoğunluğunda büyük bir artış gözlemlenmektedir. Bu noktada, cihaza etkili bir biçimde hem elektron hem de boşluk enjeksiyonu gerçekleşmektedir. Bu nedenle, akımın artışı, iki yük türünün rekombinasyona uğrayarak ışık emisyonunu başlattığı nokta ile aynıdır.

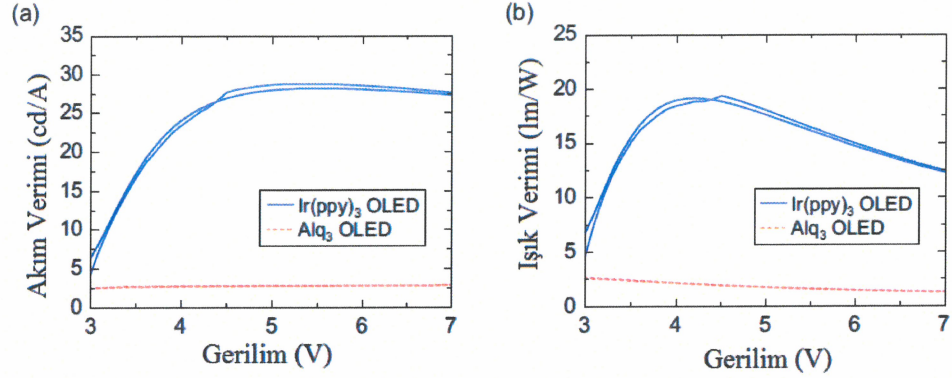


Şekil 1.18 a) Floresans Alq₃ OLED'in akım-gerilim-lüminesans karakteristikleri b) Fosforesans Ir(ppy)₃ OLED'in akım-gerilim-lüminesans karakteristikleri [Jörg Frischeisen, June 2011].

İr kompleksi temelli OLED aygıtı için ise, sızıntı akımının (leakage current) yüksek olması nedeniyle, diot karakterinin daha zayıf olduğu görülebilmektedir. Yüksek sızıntı akımının nedeni olarak, farklı birçok malzemenin kullanılmış olması ve üretimdeki farklılıklar gösterilebilmektedir. Fakat her iki OLED aygıtı, benzer emisyon spektrumlarına sahip olmasına rağmen, yine fosforesans Ir(ppy)₃ OLED'in ışık emisyonu, Alq₃ temelli OLED'e göre daha yüksektir.

Her iki OLED aygıt arasında ayrıntılı bir karşılaştırma yapıldığında; 4 mA/cm² akım yoğunluğunda Alq₃ temelli OLED'in lüminesansı 112 cd/m² iken, Ir(ppy)₃ temelli fosforesans OLED'in lüminesansı 1100 cd/m²'dir. Bu değerlerden, Alq₃ temelli OLED'in akım verimi 2,8 cd/A, Ir(ppy)₃ temelli fosforesans OLED'in akım verimi ise 27,7 cd/A olduğu belirlenmiştir. İki yapı arasında, bu derece büyük bir fark olmasının iki temel nedeni vardır. Birincisi, fosforesans OLED'in, ışık yayımı için hem singlet hem de triplet halleri kullanabilmesi, dolayısıyla yalnızca singlet hallerin kullanıldığı floresans sistemlerden dört kat daha fazla ışık yayımı sağlayabilmesi; ikincisi ise Ir(ppy)₃:CBP sisteminin ışınım kuantum

veriminin Alq_3 çok daha büyük olmasıdır. Tüm bu koşullar altında, Ir kompleksi temelli fosforesans OLED'ler yaklaşık 10 kat daha verimli olmaktadır.



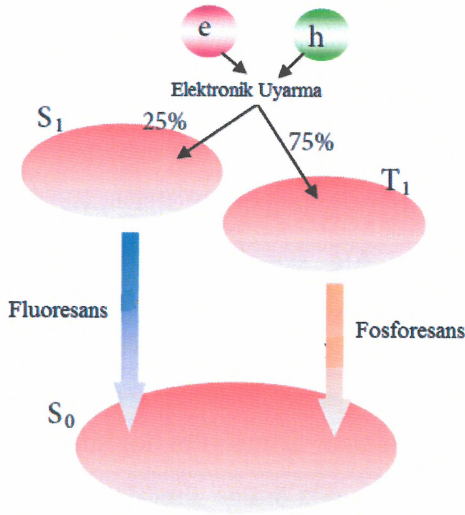
Şekil 1.19 Alq_3 ve Ir(ppy)_3 temelli OLED'e ait a) akım verimi-gerilim b) ışık verimi-gerilim eğrileri [Jörg Frischeisen, June 2011]

Işık veriminin belirlenmesinde önemli olan bir parametre de uygulanan gerilimdir. 4 mA/cm^2 'lik akım altında, gerilim ihtiyacı Alq_3 temelli OLED için 5,3V'ken; Ir(ppy)_3 temelli OLED için bu değer 6,8 V'tur. Eğer bir Lambertian ışıınımı söz konusu ise, her iki aygıt için tahmini ışık verimi değerleri sırasıyla 1,6 lm/W ve 131 lm/W olacaktır. Burada, Ir(ppy)_3 temelli OLED'de sızıntı akımı ve gerekli gerilim değerinin yüksek olması, Alq_3 temelli OLED'din floresansından çok daha yüksek ışıınıma sahip olmasına rağmen, ışık veriminde azalmaya neden olmaktadır.

Akım verimi ve ışık veriminin uygulanan akıma göre değişimi Şekil 1.17 a ve b'de gösterilmektedir. Tüm gerilim aralığı göz önüne alındığında, Ir kompleksi temelli OLED, Alq_3 temelli OLED'den daha verimlidir. Hem akım verimi hem de ışık verimi, gerçek gerilime güçlü bir şekilde bağlıdır. Özellikle Ir(ppy)_3 temelli OLED'de bu durum daha çok belirgindir. Düşük gerilimde, yük dengesinin optimum değilken (Zhou et al., 2001), yüksek gerilimlerde ise yüksek akım yoğunluğu altında, sönümlleme süreci nedeniyle OLED verimi azalmaktadır (Setz et al., 2011; Adachi et al., 2002).

1.5.8. Tezin Amacı ve Kapsamı

OLED'ler, aydınlatmada ve ekran teknolojisinde yeni bir çıkış açma potansiyeline sahiptir. Yüksek verimli, düşük gerilimlerde çalışabilen, tüm görünür bölge spektrumunu verebilen ve geniş veya esnek alanlara kolaylıkla uygulanabilen OLED teknolojisi, özellikle günümüzde yaygın olarak kullanılan sıvı kristal ekran (LED) teknolojisinin en kuvvetli alternatif durumundadır. Giriş bölümünün başından beri sıkça vurgulandığı gibi OLED aygıtının ışık veriminin %100'e ulaşabilmesi için hem singlet hem de singlet halden üç kat fazla oluşan triplet hal eksitonlarının kullanılması gerekmektedir. Bu amaçla fosforesans OLED'ler geliştirilmiştir. Fakat yalnızca triplet hallerin kullanılması, ışık veriminin artırılması için yeterli olmamaktadır. Diğer taraftan OLED'lerde kullanılan HTM, ETM ve aktif tabaka gibi, katmanlarda kullanılan yarıiletkenlerin enerji seviyeleri ve bu tabakaların kalınlıkları da OLED'in ışık verimini direkt olarak etkilemektedir.



Şekil 1.20 Konak-konuk sisteminde triplet ve singlet dinamiği

Bu doğrultuda, yüksek lisans çalışması olarak sabit HTL ve ETL kalınlıklarında, aktif tabakanın (EL) kalınlığı değiştirilerek, OLED aygıtına ait optiksel ve elektriksel değişimler tespit edilmiştir. Daha sonra, elde edilen sonuçlar değerlendirilerek optimize ışık verimi için uygun OLED yapısı belirlenmiştir. Bu amaçla, ITO/PEDOT: PSS (35nm)/Ir(mppy)₃ (%6 wt%) :PBD (%24):TPD (%9):PVK (%61)/LiF(0,7 nm)/Al(100nm) konfigürasyonunda, farklı aktif tabaka kalınlıklarına sahip, dört tür OLED aygıtı hazırlanmıştır. Dönü kaplama tekniğiyle, farklı dönme hızlarında kaplanan aygıtların aktif tabakalarına

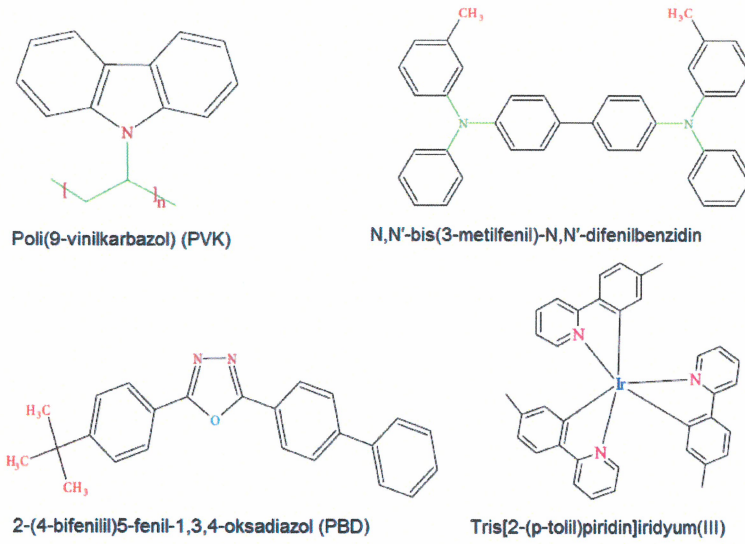
ait kalınlıklar, profilometre ile belirlenmiştir. Üretilen OLED aygıtlarının akım yoğunluğu-gerilim, dalga boyuna göre elektrolüminesans, gerilim- lüminesans ve akım yoğunluğu-elektrik alan analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar tartışılmış ve her bir analiz sonucunun, birbiriyle olan uyumluluğu irdelenmiştir. Sonuçta, yukarıdaki konfigürasyonda hazırlanan yeşil renk fosforesans OLED için EL tabaka kalınlığı değişiminin, OLED karakteristiklerine etkileri tartışılmış ve optimum EL tabaka kalınlığı tespit edilmiştir.

2. DENEYSEL KISIM

2.1. Denemelerde Kullanılan Kimyasallar

Denemelerde kullanılan tüm ticari malzemeler, daha sonra herhangi bir saflaştırma yapılmadan kullanılmıştır.

Poli(9-vinilkarbazol) (PVK), N,N'-bis(3-metilfenil)-N,N'-difenilbenzidin, 2-(4-bifenilil)5-fenil-1,3,4-oksadiazol (PBD) ve tris[2-(p-tolil)piridin]iridyum (III) ($\text{Ir}(\text{mppy})_3$) Aldrich'ten satın alınmıştır. Aktif tabakada kullanılan malzemelerin açık yapıları Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Aktif tabakada kullanılan bileşiklerin açık yapıları

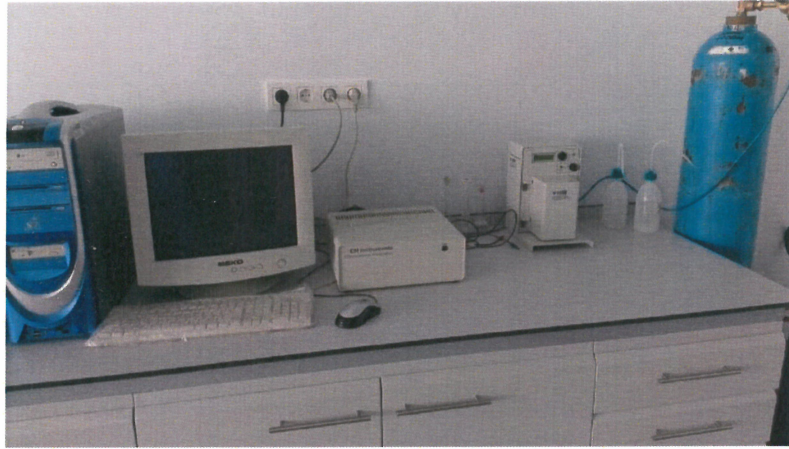
2.2. Analiz Teknikleri

Kullanılan yarıiletken malzemelerin, HOMO-LUMO enerji seviyelerinin belirlenmesi, aralarındaki enerji transferi mekanizmalarının aydınlatılması ve optik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, döngüsel voltammetri, UV-Vis absorpsiyon spektrofotometrisi ve floresans spektrofotometresi teknikleri kullanılmıştır.

2.2.1. Optik ve elektrokimyasal çalışmalar

Döngüsel voltammetri

CH Instruments 660 B model elektrokimyasal çalışma ünitesi (potansiyostat-galvanostat) moleküllerin çözelti fazında uygulanan potansiyel karşısında molekülde meydana gelen yükseltgenme ve indirgenmelerin, hangi potansiyelde gerçekleştiğini belirlemede kullanılmıştır. Analizler sonucunda elde edilen voltammogramlar ile sentezlenen bileşiklerin temel hal enerji seviyeleri (en yüksek enerjili dolu molekül orbitali-HOMO), uyarılmış hal enerji seviyeleri (en düşük enerjili boş molekül orbitali- LUMO). Daha sonra, HOMO ve LUMO enerji değerleri kullanılarak elektrokimyasal bant aralığı değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 2.2 CH Instruments 660 B model elektrokimyasal çalışma ünitesi (potansiyostat-galvanostat)

Sistemde, tüm ölçümler inert (N_2) atmosferde alınmıştır. karşıt elektrot (CE) olarak platin tel, çalışma elektrotu (WE) olarak camsı karbon ve referans elektrot (RE) olarak da gümüş elektrot kullanılmıştır. Ölçümlerde, asetonitrilde hazırlanmış 0,1M tetrabütilamonyumhekzaflorofostat (TBAPF₆), destek elektrot olarak kullanılmıştır. Tarama hızı ise 0,1 V/s'dir. HOMO ve LUMO enerji seviyelerini hesaplamak için kullanılan iç referans, Ferrosen/Ferrosenium redoks çiftinin yarı pil potansiyeli, 0,41 V olarak belirlenmiştir. Enerji seviyeleri, aşağıda gösterilen eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır.

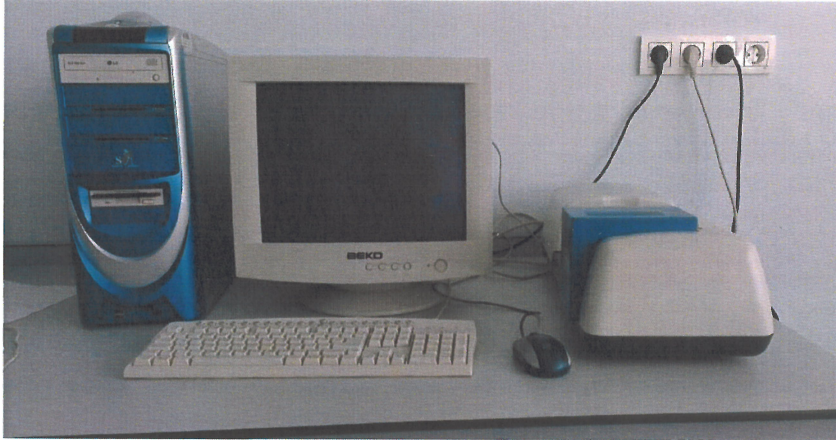
$$E_{HOMO} = -[(E_{oks} - E_{fer}) + 4,80]$$

$$E_{LUMO} = -[(E_{ind} - E_{fer}) + 4,80)$$

Eşitliklerde, E_{oks} ve E_{ind} , sırasıyla, malzemenin yükseltgenme ve indirgenme potansiyellerini temsil ederken, E_{fer} , ferrosenin çalışma şartlarında tespit edilen yarı pil potansiyelidir.

Ultraviyole - görünür bölge absorpsiyon spektroskopisi (UV-Vis)

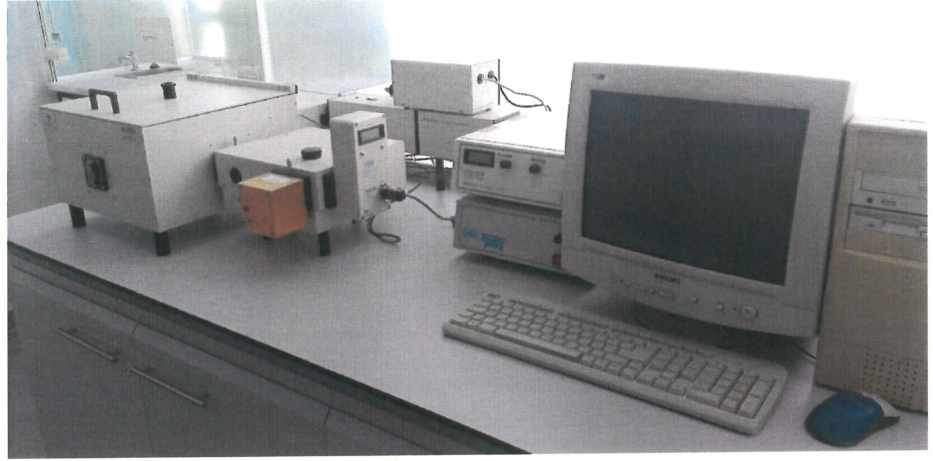
Analytic Jena Speedcord S600, model “diyot-array” dedektörlü UV-Vis spektrofotometre ile sentezlenen moleküllere ait çözelti fazındaki absorpsiyon spektrumları elde edilmiştir. Ölçümler, 1cm*1cm*4cm boyutunda kuartz küvetlerde alınmış, çözücü olarak, kloroform ($CHCl_3$) kullanılmıştır.



Şekil 2.3 Analytic Jena Speedcord S600 model UV-Vis spektrofotometre

Floresans spektroskopisi

PTI-QMI model floresans spektrofotometre cihazı ile sentezlenen moleküllerin belli dalga boyunda uyarılmaları sonucunda meydana gelen emisyon geçişlerine ait bantları gözlenmiştir. Özellikle UV-Vis spektrofotometre ile elde edilen spektrumlarla birlikte değerlendirilerek, sentezlenen yarıiletken sensor boyaların bant aralığı (E_g) değerleri hesaplanmıştır.



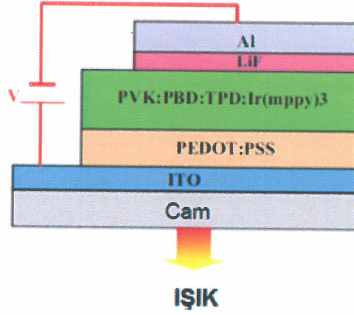
Şekil 2.4 PTI-QMI model florimetre

2.2.2 OLED aygıt üretimi

Tüm aygıt üretimleri ve karakterizasyonları inert atmosfer kabininde (MBRAUN, Germany) gerçekleştirilmiştir. PEDOT: PSS ve aktif tabaka, dönü kaplama tekniğiyle, metal kontaktı (Al) ise vakumlu termal buharlaştırma sisteminde kaplanmıştır. Hazırlanan dört OLED aygıtın aktif tabakaları, farklı film kalınlıklarında üretilmiştir. OLED aygıt konfigürasyonu; ITO/PEDOT: PSS (35nm)/Ir(mppy)₃ (%6 wt%): PBD (%24): TPD (%9): PVK (%61)/LiF(0,7 nm)/Al(100nm)'dir.

ITO kaplı camın bir kısmı HCl ve H₂SO₄ karışımı kullanılarak sıyırıldıktan sonra OLED uygulaması için hazır hale getirilmiştir. Daha sonra, temizlemek için sırasıyla, deterjanlı su, saf su, aseton, izopropanol ve etanol ile ultrasonik banyo kullanılarak yıkanan ITO camlar, kurutulduktan sonra UV/O₃ plazma sistemi ile temizleme ve yüzey aktifleme işlemi gerçekleştirilmiştir. 35 nm'lik PEDOT: PSS tabakası, dönü kaplama tekniği ile, 4000 devir/dakika hızla kaplanmıştır. PEDOT: PSS tabakası, 120 °C'de 5 dakika kurutularak film yüzeyindeki su uzaklaştırılmıştır. Bu işlemin ardından 80 °C'de 30 dakika tavlanan filmlerin üzerine, yine dönü kaplama tekniği ile, farklı devir sayılarıyla klorobenzende hazırlanan aktif tabaka (Ir(mppy)₃: PBD: TPD: PVK) kaplanmıştır. Aktif tabaka ile Al katot arasındaki elektron enjeksiyonunu arttırmak için, çok ince (0,7 nm) bir LiF tabakası, vakumlu termal buharlaştırma sistemi kullanılarak kaplandı. Son olarak ise yine vakumlu termal buharlaştırma sistemi kullanılarak 100 nm'lik Al

katot kaplanmıştır. Üretilen aygıtların şematik gösterimi Şekil 2.5'te görülmektedir.



Şekil 2.5 OLED aygıtı yapısının şematik gösterimi

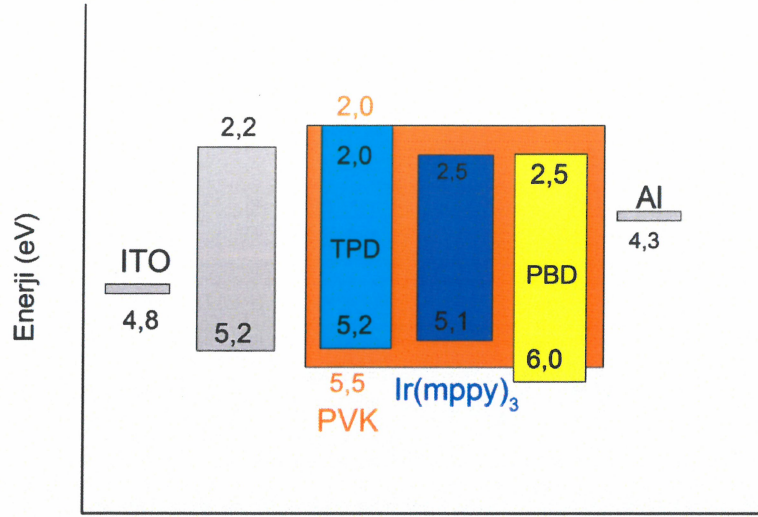
2.2.3. İnce film ve OLED karakterizasyonu

Aygıtların akım- gerilim karakteristikleri, Agilent Technologies B1500A yarıiletken aygıt analizöründe gerçekleştirilmiştir. Elektrolüminesans (EL) spektrumları ve parlaklık ölçümleri ise Spectra Scan 655 spektrometre, Ocean Optics Q65000 fiber optik spektrometre ve Admesy Brontes kolorimetre ile yapılmıştır. Film kalınlıkları Veeco Dektak 150 profilometre ile belirlenmiştir.

2.3. Analiz Sonuçları ve Tartışma

2.3.1. Optik ve elektrokimyasal çalışmalar

Aktif tabakada kullanılan malzemelerin enerji seviyelerini belirlemek ve aralarında çözelti fazında bir enerji transferi olup olmadığını tespit etmek amacıyla optik ve elektrokimyasal analizler gerçekleştirilmiştir. Hesaplanan HOMO ve LUMO enerji seviyeleri ile oluşturulmuş enerji diyagramı Şekil 2.6'de gösterilmektedir.

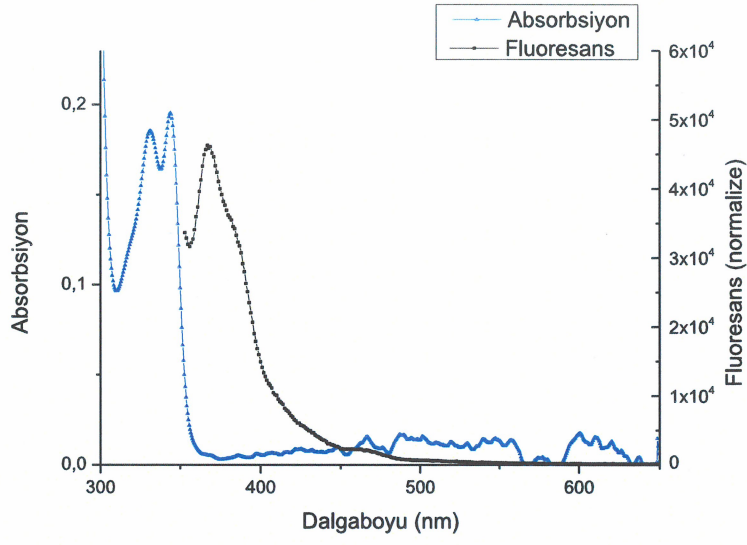


Şekil 2.6 a) OLED aygıtının enerji diyagramı

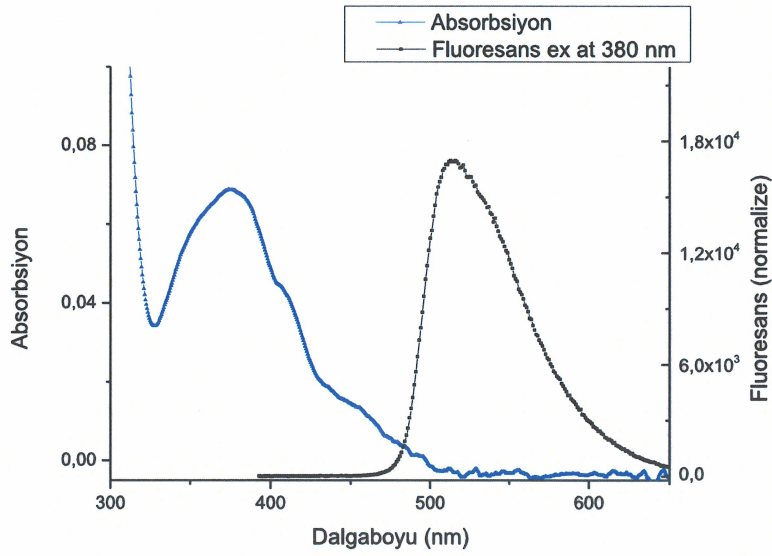
Yapılan, UV-VIS absorpsiyon ve floresans spektroskopisi analizleri sonucunda, PVK, Ir(mppy)₃, PBD ve TPD'ye ait absorpsiyon maksimumları, sırasıyla, 344 nm, 377 nm, 307 nm ve 353 nm; emisyon maksimumları, sırasıyla, 368 nm, 510 nm, 365 nm ve 420 nm olarak belirlenmiştir.

PVK, Ir(mppy)₃, PBD ve TPD'nin absorpsiyon ve emisyon spektrumlarının kesişimi değerleri kullanılarak bant aralıkları ise sırasıyla, 3,46 eV, 2,57 eV, 3,65 eV, 3,20 eV olarak hesaplanmıştır (şekil 2.6).

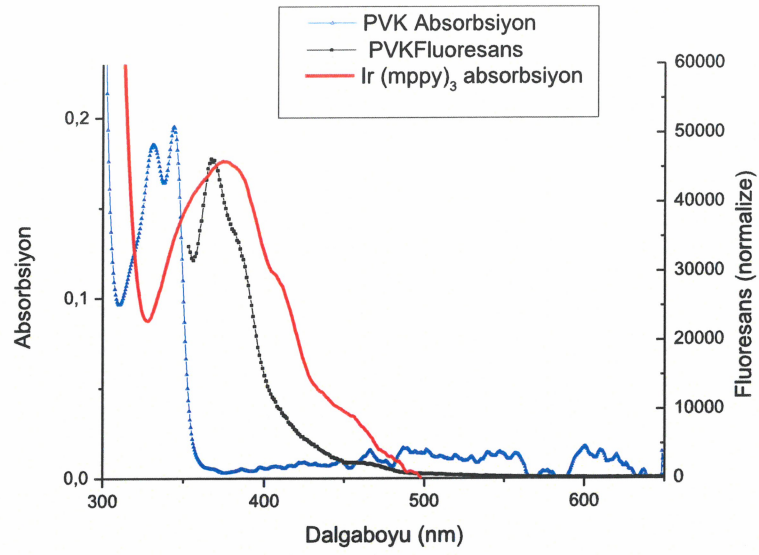
Yapılan sönümlleme çalışmasında, %0,01'lik PVK üzerine, % 0,001'lik Ir(mppy)₃ çözeltisinden belirli oranlara denk gelecek şekilde eklenerek optimum PVK: Ir(mppy)₃ oranı belirlenmeye çalışılmıştır (şekil.2.12). Şekil(2.12)'de görüldüğü gibi, Ir(mppy)₃ eklenmeye başladıktan sonra, PVK'yin emisyonunda azalma başlamıştır. PVK: Ir(mppy)₃ oranı, 1/10'da maksimum Ir(mppy)₃ emisyonu elde edilmiştir. Daha sonra ise, Ir(mppy)₃ oranı arttıkça, PVK emisyonunun yanında, Ir(mppy)₃ emisyonunda bir azalma gözlemlenirken, yine Ir(mppy)₃ 'e ait maksimum emisyonu 514 nm olan, yeni bir emisyon piki gözlemlenmiştir.



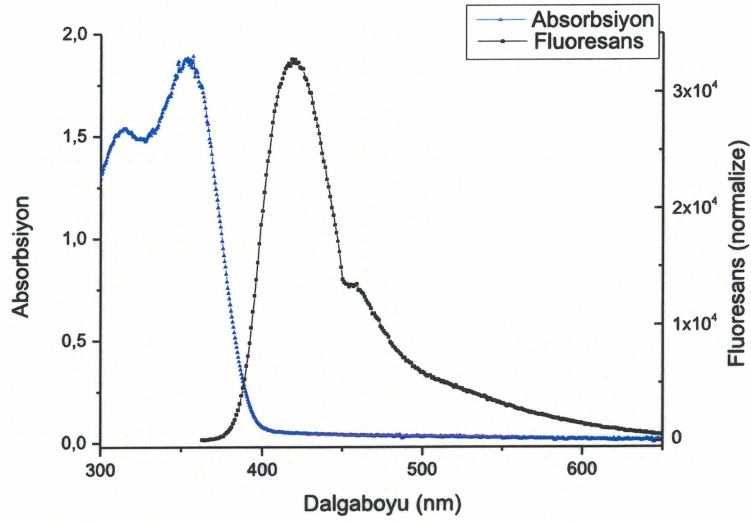
Şekil 2.7 PVK'ye ait absorbsiyon ve emisyon spektrumları



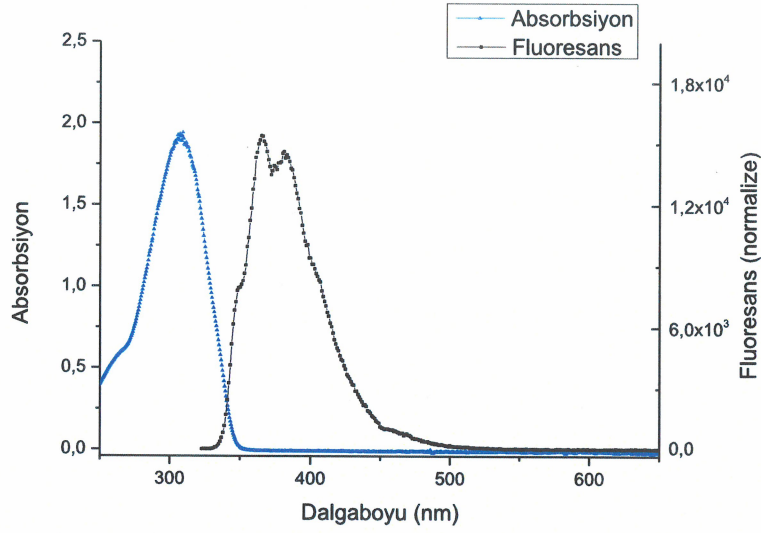
Şekil 2.8 Ir(mppy)₃'e ait absorbsiyon ve emisyon spektrumları



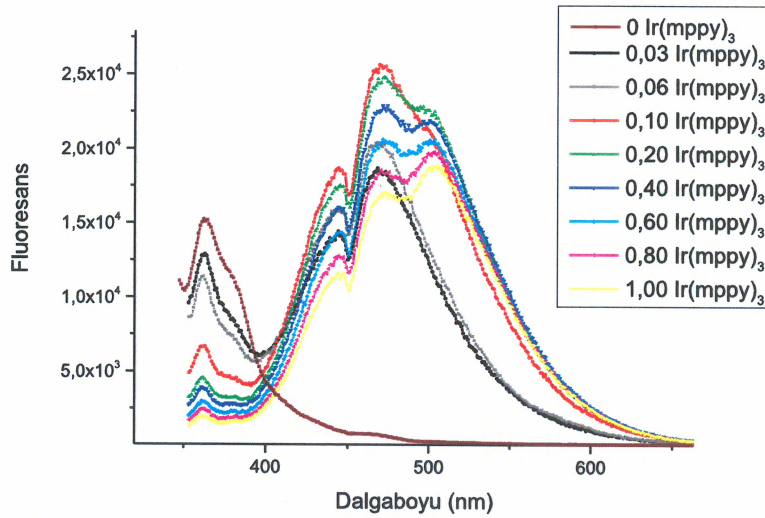
Şekil 2.9 PVK'in emisyonu ile Ir(mppy)₃'ün absorpsiyonunun örtüşmesi



Şekil 2.10 TPD'ye ait absorpsiyon ve emisyon spektrumları



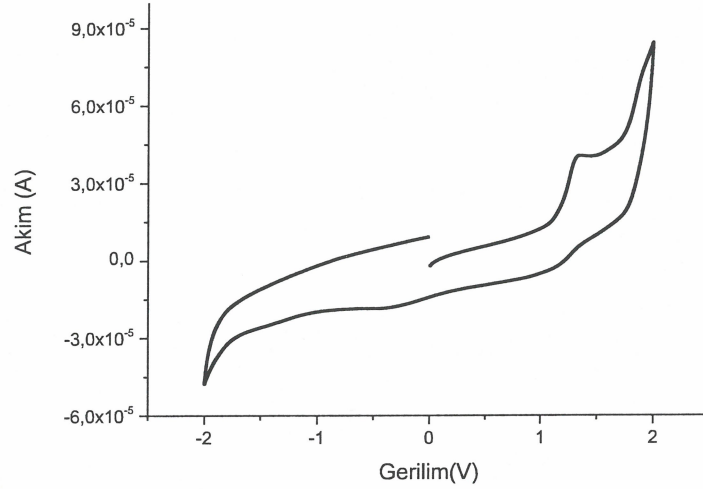
Şekil 2.11 PBD'ye ait absorpsiyon ve emisyon spektrumları



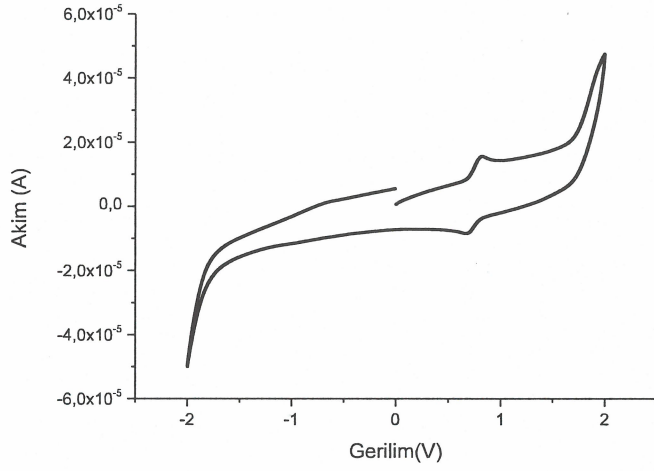
Şekil 2.12 Ir(mppy)₃'ün PVK'yi sönümlemesi (1/10 Ir(mppy)₃/PVK oranından sonra, Ir(mppy)₃ 'ün kendisini sönümlemeye başlaması nedeniyle her iki emiterin de emisyonun azalma gözlenmektedir.)

Döngüsel voltammetri çalışmalarıyla, OLED üretiminde kullanılacak malzemelerin HOMO ve LUMO enerji seviyeleri belirlenmeye çalışılmıştır. Destek elektrolit olarak 0,1 M'lık TBAPF6 kullanılmıştır ve ölçümler asetonitril içinde alınmıştır. Elektron verici özellik gösteren PVK'in voltammogramında (şekil 2.13), yalnızca pozitif bölgede 1,1 V'ta yapısındaki karbozolden kaynaklanan bir yarı tersinir yükseltgenme piki gözlemlenmektedir. Ir(mppy)₃'ün voltammogramında (şekil 2.14) ise, yine yalnızca pozitif bölgede 0,7 V'ta tersinir

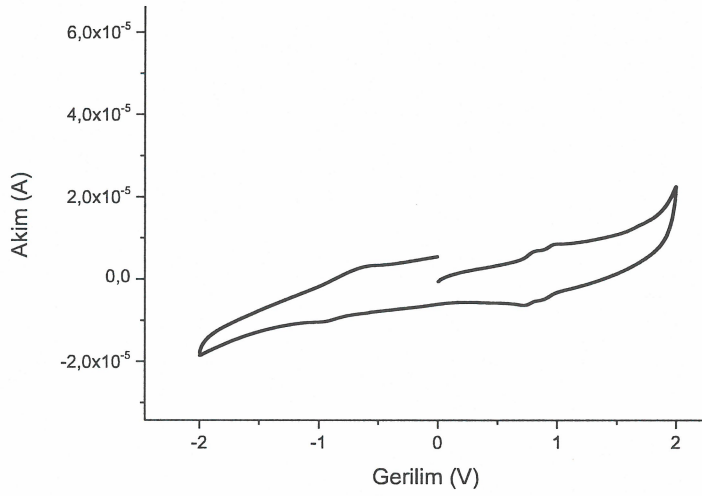
bir yükseltgenme gözlemlenmektedir. Ir(mppy)_3 'in elektron verici özelliği nedeniyle, negatif bölgede pik gözlemlenmemiştir. TPD, OLED sistemlerinde boşluk taşıyıcı olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle döngüsel voltammetri ölçümlerinde, PVK ve Ir(mppy)_3 gibi pozitif bölgede 0,8V ve 0,9V olmak üzere iki tane tersini yükseltgenme piki vermektedir (şekil 2.15). PBD, elektron taşıyıcı olarak kullanılmaktadır. Literatürde LUMO enerji seviyesi ortalama 2,4 eV olarak gösterilmektedir. Bu nedenle, döngüsel voltammogram çalışmalarında -2V civarında indirgenme piki gözlenmesi gerekmektedir. Fakat çalışmalarda kullandığımız destek elektrolit ve çözgen için çalışma aralığı 2/-2 V olduğu için, PBD'nin indirgenme piki gözlenememiştir. Bu nedenle literatürdeki değerlerin ortalaması alınmıştır.



Şekil 2.13 PVK'ye ait döngüsel voltammogram



Şekil 2.14 Ir(mppy)₃'ye ait döngüsel voltammogram



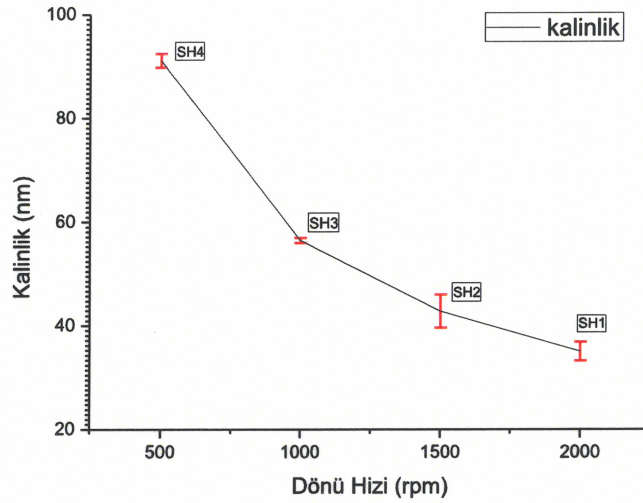
Şekil 2.15 TPD'ye ait döngüsel voltammogram

Tablo 2.1 OLED aygıtında kullanılan malzemelerin optik ve elektrokimyasal karakteristikleri

Malzeme	$\lambda_{\max}^{\text{abs}}$ (nm)	$\lambda_{\max}^{\text{ems}}$ (nm)	E_{HOMO} (eV)	E_{LUMO} (eV)	E_g (eV)
PVK	244	368	5,50	2,00	3,50
Ir(mppy) ₃	377	515	5,10	2,50	2,60
TPD	353	420	5,20	2,00	3,20
PBD	307	265	-	-	3,65

2.3.2. İnce filmlerin hazırlanması

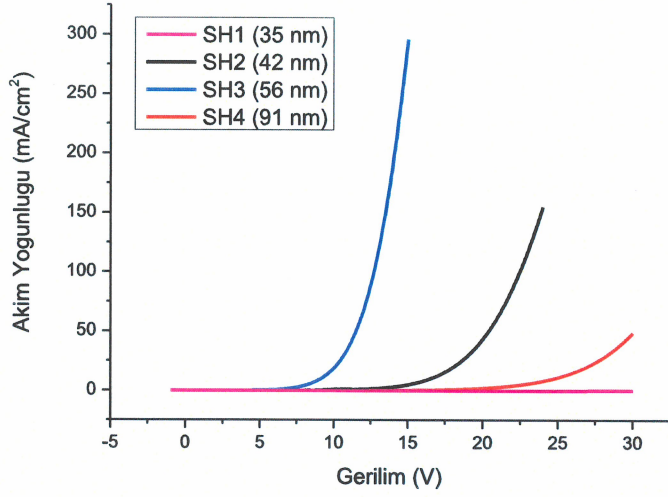
Aktif tabakanın kaplanması dönü kaplama cihazında gerçekleştirilmiştir. Devir sayısının (rpm- devir/dakika) film kalınlığına etkisini belirlemek için, ITO kaplı cam üzerine, 500 (SH2), 1000 (SH3), 1500 (SH4) ve 2000 (SH1) rpm'de ayrı ayrı kaplamalar yapılarak, film kalınlıkları ölçülmüştür. Film kalınlıkları, sırasıyla 90 nm, 56 nm, 40 nm ve 35 nm olarak belirlenmiştir (Şekil 2.15).



Şekil 2.16 Dönü hızına bağlı kalınlık değişimi

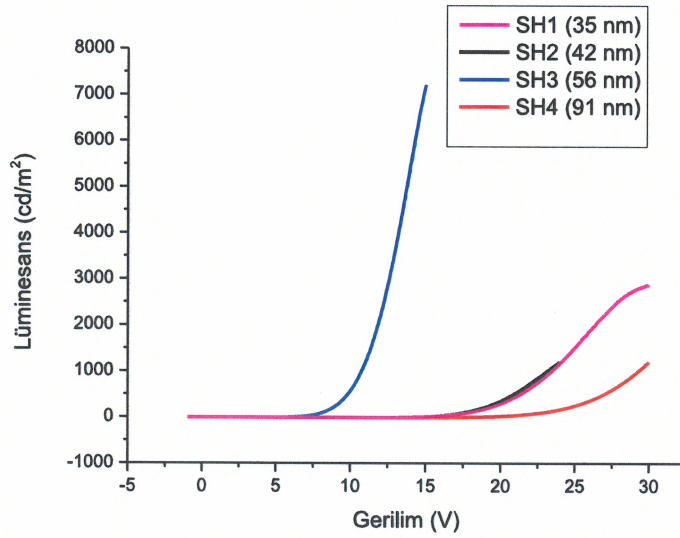
2.3.3. OLED aygıtların hazırlanması ve karakterizasyonu

SH2, SH3, SH4 ve SH1 olmak üzere, dört farklı aktif tabaka kalınlığına sahip OLED aygıtları ITO/PEDOT: PSS (35nm)/Ir(mppy)₃ (%6 wt%) :PBD (%24):TPD (%9):PVK (%61)/LiF(0,7 nm)/Al(100nm) konfigürasyonunda hazırlanmıştır. OLED aygıtların, akım- gerilim eğrileri Şekil 2.5.2.1'de gösterilmektedir. Beklendiği gibi, aktif tabaka kalınlığının artışı ile eşik geriliminde (açma-kapama gerilimi) artış gerçekleşmiştir (Riel H., 2002). Bunun iki nedeni bulunmaktadır: Birincisi kalınlık arttıkça hacimsel akımın sınırlayıcı etkisinin belirginleşmesidir; ikincisi ise yine kalınlık artışı ile ara yüzeylerdeki iç akımın düşüşüyle birlikte yük enjeksiyonu hızının azalışıdır. Burada tek istisna, SH2'dir. SH2'nin, belirlenen kalınlığı 36 nm'dir ve kısa devre oluşmaktadır.



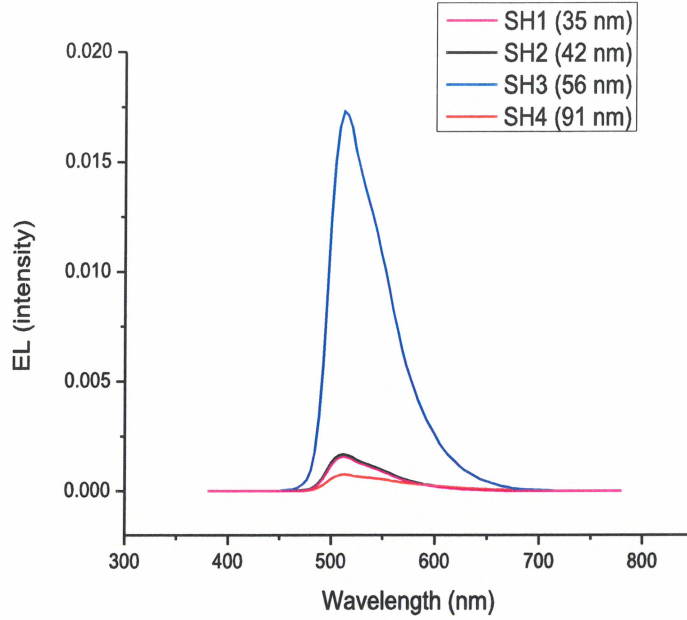
Şekil 2.17 OLED aygıtlarına ait akım yoğunluğu-gerilim eğrisi

Bu nedenle açma-kapama tespit edilememiştir. Aygıtlar için tespit edilen açma-kapama gerilimleri tablo 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.18 OLED aygıtlarına ait gerilim-lüminesans eğrileri

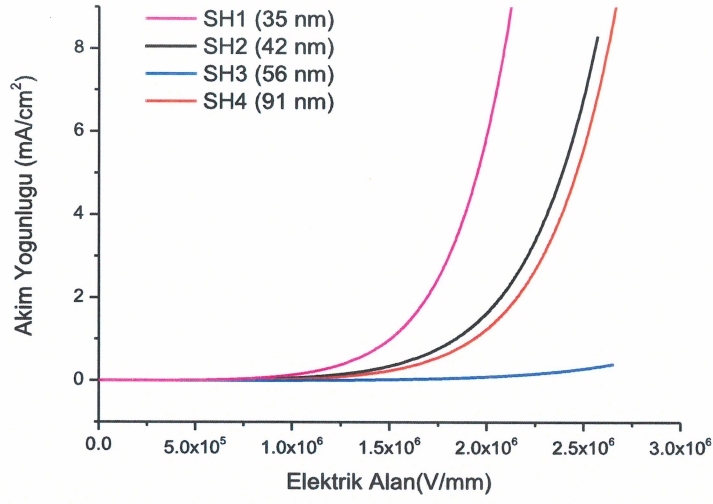
Şekil 2.19'te, aygıtlara ait elektrolüminesans spektrumları (EL) görünmektedir. Her aygıt için elde edilen maksimum EL dalga boyu 512 nm'dir.



Şekil 2.19 OLED aygıtlarına ait elektrolüminesans spektrumları

Şekil 2.18'e bakıldığında ise, aygıtların gerilim-lüminesans eğrileri görünmektedir. 2,8 A'lık akım altında, 575,5 cd/m²'lik lüminesans veren SH3, aygıtlar içinde en iyi performansı göstermiştir.

Şekil 2.20'de, üretilen PLED aygıtlarına ait, akım yoğunluğu- elektrik alan eğrileri gösterilmiştir. OLED'lerde, akım-gerilim karakteristikleri, yalnızca gerilime bağlı değildir. Aynı zamanda elektrik alana da bağlıdır. Bu nedenle, elektrot/polimer arayüzündeki bariyerden geçen bir veya her iki yük taşıyıcının enjeksiyonu için bir tünelleme modellemesinden söz etmek gerekmektedir (Parker I.D., 1993). Elektron ve boşluklar, kontaklardan polimere doğru enjekte edilmektedir. Bu sayede, polimer üzerinde oluşan negatif veya pozitif yüklü polaronlar oluşmaktadır. Polaronların, göçüne etki eden faktör ise uygulanan elektrik alandır.



Şekil 2.20 OLED aygıtlarına ait akım yoğunluğu- elektrik alan eğrileri

Tablo 2.2 OLED aygıtlarının performans parametreleri

Örnek	Açma-kapama gerilimi (V)	EL intensity (a.u.)	Maksimum lüminesans (cd.m ⁻²)
SH1	3,30	1680	53,72
SH2	11,50	767	31,04
SH3	2,60	17300	575,50
SH4	3,70	1580	50,30

3. SONUÇ

Yapılan elektrokimyasal çalışmalar doğrultusunda, belirlenen fosforesans OLED aygıt konfigürasyonda, elektron ve boşlukların ilgili enerji seviyelerinde hareketine olanak sağlayacak, uygun HOMO ve LUMO enerji seviyelerine sahip yarı iletken malzemelerin seçildiği belirlenmiştir. Yapılan optik analizler sonucunda ise, yine aynı şekilde, belirlenen konfigürasyon için, konuk-konak malzeler arasındaki ve konak- katkı malzemeler arasındaki çözelti fazında gerçekleşen enerji transfer mekanizmaları aydınlatılmıştır.

Farklı kalınlıklarda aktif tabaka elde etmek için, ITO kaplı cam üzerine, 500 (SH4), 1000 (SH3), 1500 (SH2) ve 2000 (SH1) rpm'de yapılan kaplamalar sonucunda, profilometrede belirlenen film kalınlıkları, sırasıyla 90 nm, 56 nm, 40 nm ve 35 nm'dir. Daha sonraki OLED aygıtı çalışmasında, Aktif tabaka kalınlığının, açma-kapama gerilimi ve lüminesans verimi gibi OLED parametrelerini etkilediği tespit edilmiştir.

Hazırlanan OLED aygıtların, akım- gerilim eğrileri alındığında, aktif tabaka kalınlığının artışına bağlı olarak açma-kapama geriliminin de arttığı gözlemlenmiştir. Bu değişimin nedenleri, kalınlık arttıkça hacimsel akımın sınırlayıcı etkisinin belirginleşmesi ve yine kalınlık artışı sonrası arayüzlerdeki iç akımın düşüşüyle birlikte yük enjeksiyonu hızının azalışıdır. SH2'deki aktif tabaka kalınlığı 36 nm olarak belirlenmiştir. Bu kalınlık, kısa devreye neden olduğu için, aygıtın açma-kapama gerilimi 11,2 V gibi diğer aygıtlara göre oldukça yüksek bir değer çıkmıştır.

Her aygıt için elde edilen maksimum EL dalga boyu 512 nm'dir. Sıvı fazda, Ir (mppy)₃'ün floresansı ile karşılaştırıldığında, bir kırmızıya kayma mevcuttur. Bu batokromik etkinin nedenlerinden biri film fazında gerçekleşen π - π yığılmasıdır. Diğer bir nedeni de, elektrik alan altında, Ir kompleksine ait HOMO ve LUMO enerji seviyelerindeki yüklerin artışı ve bu nedenle, bant aralığının daralmasıdır.

Akım-gerilim eğrileri: En yüksek enjeksiyon, 56 nm'lik film kalınlığı ile elde edilmiştir. Daha sonra, film kalınlığı azaldıkça ve arttıkça, beklendiği gibi düşük enjeksiyon oranları elde edilmiştir. 35 nm'lik film kalınlığında, yeterli

seviyede enjeksiyon gerçekleşmemektedir ve yüksek gerilimlere kadar akım geçmemektedir.

Lüminesans-gerilim eğilileri: Beklendiği gibi, en düşük turn-on voltajı, SH3'e aittir. Daha sonra, 42, 35 ve son olarak 91 nm görülmektedir. Aktif tabakası 35 nm olan OLED'te turn-on gerilimi, düşük çıkmıştır. Fakat tabaka kalınlığı çok düşük olduğu için, yüklerin bir anlık rekombinasyonu sonrasında, tekrar eksiton oluşumu gerçekleşmediği için, gerilim arttıkça diyotun öldüğünü gözlemlenmiştir(Parker I.D., 1993). 91 nm'lik aktif tabakaya sahip, OLED için ise, kalınlık fazla olduğu için, yüklerin buluşması az olmaktadır. Bu nedenle, çok yüksek gerilim gerekmektedir.

Akım yoğunluğu-elektrik alanı:

En yüksek elektrik alan, optimum kalınlık olan, 56 nm'dedir. Buradan da en fazla yük enjeksiyonunun ve yük transferinin, 56 nm'lik OLED'te gerçekleştiği söylenebilir. 35 nm'lik filmde, kalınlık az olduğundan yük sayısı da azdır. Bu nedenle elektrik alan çok düşüktür.

Konak ile Konuk arasındaki enerji transferi türleri: Host'un emisyon spektrumu ile, guestin absorpsiyon spektrumları örtüştüğü için, Förster enerji transferi söz konusudur(Baldo et al., 1999). Ir-kompleksinin HOMO ve LUMO enerji seviyeleri, PVK'in HOMO ve LUMO enerji seviyeleri arasında olduğu için, yüklerin direkt, transferi de söz konusudur.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Adachi C., Tsutsui T. and Saito S.**, 1989, "Organic electroluminescent device having a hole conductor as an emitting layer", *Appl. Phys. Lett.*, 55 , 489-1491p.
- Adachi C., Tsutsui T. and Saito S.**, 1990, "Confinement of charge carriers and molecular excitons within 5-nm-thick emitter layer in organic electroluminescent devices with a double heterostructure", *Appl. Phys. Lett.*, 57, 531-533pp.
- Adachi C., Baldo M.A., Thompson M.E. and Forrest S.R.**, 2001, "Nearly 100% internal phosphorescence efficiency in an organic light-emitting device", 90, 5048-5051pp.
- Al Attar H. A. and Monkman A. P.**, 2006, "Dopant effect on the charge injection, transport, and device efficiency of an electrophosphorescent polymeric light-emitting device", *Adv. Funct. Mater.*, 16, 2231-2242pp.
- Andrade B. W. D. and Forrest S. R.**, 2004, "White organic light-emitting devices for solid-state lighting", *Adv. Mater.*, 16, 1585-1595pp.
- Antoniadis H., Abkowitz M. A. and Hsieh B. R.**, 1994, "Carrier deep-trapping mobility-lifetime products in poly(p-phenylene vinylene" *Appl. Phys. Lett.*, 65 , 2030-2032p.
- Baldo M. A. and Forrest S. R.**, 2000, "Transient analysis of organic electrophosphorescence: I. transient analysis of triplet energy transfer", *Phys. Rev. B*, 62, 10958–10966 pp.
- Baldo M. A., Lamansky S., Burrows P. E., Thompson M. E. and Forrest S. R.**, 1999, " Very high-efficiency green organic light-emitting devices based on electrophosphorescence", *Appl. Phys. Lett.*, 75, 4-6pp.
- Baldo M. A., O'Brien D. F., You Y., Shoustikov A., Sibley S., Thompson M. E. and Forrest S.R.**, 1998, "Highly efficient phosphorescent emission from organic electroluminescent devices", *Nature*, 395, 151-154pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Baldo M. A., Thompson M. E. and Forrest S. R., 1999,**"Phosphorescent materials for application to organic light emitting devices", *Pure Appl. Chem.*, 71, 2095-2016pp.
- Baldo M. A., Thompson M. E. and Forrest S. R., 2000,**"High-efficiency fluorescent organic light-emitting devices using a phosphorescent sensitizer", *Nature*, 403, 750-753pp.
- Baldo M.A., O'Brien D.F., Thompson M.E. and Forrest S.R., 1999,** "Excitonic singlet-triplet ratio in a semiconducting organic thin film", *Appl Phys Lett.*, 74, 14422-14428pp.
- Baldo M.A., O'Brien D.F., You Y., Shoustikov A., Sibley, S., Thompson M.E. and Forrest S.R., 1998,** "Highly efficient phosphorescent emission from organic electroluminescent device", *Nature*, 395, 151-154pp.
- Becker H., Burns S.E. and Friend R. H., 1997,**" Effect of metal films on the photoluminescence and electroluminescence of conjugated polymers", *Phys. Rev.*, B 56, 1893–1905pp.
- Blochwitz J., Pfeiffer M., Fritz T. and Leo K., 1998,** "Low voltage organic light emitting diodes featuring doped phthalocyanine as hole transport material", *Appl. Phys. Lett.*, 73, 729-731pp.
- Blom P.W.M., Dejong M.J.M. and Vanmunster M., 1997,** "Electric-field temperature dependence of hole mobility in poly(p-phenylene vinylene)", *Phys. Rev.*, 55, 656pp.
- Braun D. and Heeger A.J., 1991,**"Visible-light emission from semiconducting polymer diodes", 58, 1982-1984pp.
- Brooks J., Babayan Y., Lamansky S., Djurovich P.I., Tsyba I., Bau R. and Thompson, M.E., 2002,**" Synthesis and characterization of phosphorescent cyclometalated platinum complexes", *Inorg. Chem.*, 41, 3055-3066pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Brown A. R., Pichler K., Greenham N. C., Bradley D. D. C., Friend R. H. and Holmes A. B.,** 1993, "Optical spectroscopy of triplet excitons and charged excitations in poly(p-phenylenevinylene) light-emitting-diodes", Chem. Phys.Lett., 210, 61-66pp.
- Burn P. L., Lo S. C. and Samuel I. D. W.,** 2007, " The development of light-emitting dendrimers for displays", Adv. Mater., 19, 1675-1688pp.
- Burroughes J.H., Bradley D.D.C., Brown A.R., Marks R.N., Mackay K., Friend R.H., Burn P.L., and Holmes A.B.,** 1990, " Light-emitting diodes based on conjugated polymer", 347, 539-552pp.
- Burroughes J. H., Bradley D. D. C., Brown A. R., Marks R. N., Mackay K., Friend R. H., Burns P. L. and Holmes A. B.,** 1990, " Light-emitting diodes based on conjugated Polymers", Nature, 347, 539–541pp.
- Celal Bayar Üniversitesi,** " Moleküler floresans spektroskopisi", http://www.bayar.edu.tr/besergil/10_BOLUM_7.pdf (Erişim tarihi: 23 Eylül 2014)
- Champbell A.J., Bradley D.C.C. and Antoniadis H.,** 2001, "Dispersive electron transport in an electroluminescent polyfluorene copolymer measured by the current integration time-of-flight method", 2001, App. Phys. Lett., 79, 2133- 2135pp.
- Chandross M., Mazumdar S., Jeglinski S., Wei X., Vardeny Z. V., Kwock E. W. and Miller T. M.,** 1994, "Excitons in poly(para-phenylenevinylene)", Phys. Rev. B, 50, 14702-1470pp.
- Chen X.W., Choy W.C.H., Liang C.J., Wai P.K.A. and He S.,** 2007, "Modifications of the exciton lifetime and internal quantum efficiency for organic light-emitting devices with a weak/strong microcavity", Appl. Phys. Lett., 35, 91p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Chen B. J., Lai W. Y., Gao Z. Q., Lee C. S., Lee S. T., and Gambling W. A.,** 1999,"Electron drift mobility and electroluminescent efficiency of tris(8-hydroxyquinolinolato) aluminum", Appl. Phys. Lett.,75, 4010-4012pp.
- Choi H.W., Kim S. Y., Kim W.K., Hong K. and Lee J.L.,** 2006,"Effect of magnesium oxide buffer layer on performance of inverted top-emitting organic light-emitting diodes", J. Appl. Phys., 100, 4106p.
- Chopra N.,** 2009, "High Efficiency Blue Phosphorescent Organic Light Emitting Diodes", Ph.D thesis, University of Florida.
- .Choudhury K. R., Yoon J.h. and So F.,** 2008, "LiF as an n-dopant in tris(8-hydroxyquinoline) aluminum thin films", Adv. Mater. 20, 1456-1461pp.
- Diekmann K.,** 2008, "OLLA White paper on the necessity of luminous efficacy measurement standardisation of OLED light sources"., http://www.hitech-projects.com/euprojects/olla/news/press_release_4_september_2007/ollaupdatwhitepaper_publicversion2.pdf (Erişim tarihi: 11 kasım 2014).
- Dodabalapur A.,** 1997," Organic light emitting diodes", Solid State Commun, 102, 259-267pp.
- Forrest S.R., Bradley D.D.C. and Thompson M. E.,** 2003,"Measuring the efficiency of organic light-emitting devices". Adv. Mater., 15, 1043-1048pp.
- Forest S.R., Kaplan M.L. and Schmidt P.H.,** 1984, "Organic-on-inorganic semiconductor contact barrier diodes .2.dependence organic film and metal contact properties", J. App. Phys., 56, 543p.
- Forrest, S.R.,** 1997,"Ultrathin organic films grown by organic molecular beam deposition and related techniques", Chem. Rev., 97, 1793-1896pp.
- Friend R.H., Gymer R.W., Holmes A.B., Burroughes J.H., Marks R.N., Taliani C., Bradley D.D.C., Dos Santos D.A., Bredas J.L., Logdlund M. and Salaneck W.R.,** 1999," Electroluminescence in conjugated polymers", Nature, 397 , 121-128pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Greenham N.C., Friend R. H. and Bradley D.D.C.**, 1994, "Angular dependence of the emission from a conjugated polymer light-emitting diode: Implications for efficiency calculations", *Adv. Mater.*, 6, 491- 494pp.
- Helfrich W. and Schneider W. G.**, 1965, "Recombination radiation in anthracene crystals", *Phys. Rev. Lett.* 14, 229-231pp.
- Hill G., Kahn A., Soos Z.G. and Pascal R.A.**, 2000, "Charge-separation energy in films of pi-conjugated organic molecules", *Chem. Phys. Lett.*, 327, 181-188pp.
- Hung L S., Tang C.W. and Mason M. G.**, 1997, "Enhanced electron injection in organic electroluminescence devices using an Al/LiF electrode", *Appl. Phys. Lett.*, 70, 152-154pp.
- Hung L. S., Tang C. W. and Mason M. G.**, 1997, " Enhanced electron injection in organic electroluminescence devices using an Al/LiF electrode", *Appl. Phys. Lett.*, 70, 152-154pp.
- Ikai M., Tokito S., Sakamoto Y., Suzuki T., Taga Y.**, 2001, " Highly efficient phosphorescence from organic light-emitting devices with an exciton-block layer", *Appl Phys Lett.*, 79, 156-158pp.
- Kawamura Y , Goushi K., Brooks J. , Brown J. J., Sasabe H. and Adachi C.**, 2005, "100% phosphorescence quantum efficiency of Ir(III) complexes in organic semiconductor films", *Appl. Phys. Lett.*, 86, 71-104pp.
- Kepler R. G., Beeson P. M., Jacobs S. J., Anderson R. A., Sinclair M. B., Valencia V. S. and Cahill P. A.**, 1995, "Electron And Hole Mobility In Tris(8-Hydroxyquinalinolato-N1,O8) Aluminum", *Appl. Phys. Lett.*, 75, 3618-3620pp.
- Kido J. and Matsumoto T.**, 1998, "Bright organic electroluminescent devices having a metal-doped electron-injecting layer", *Appl. Phys. Lett.*, 73, 2866-2868pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kondakov D.Y., Pawlik T.D., Hatwar T.K. and Spindler J. P.**, 2009,"Triplet annihilation exceeding spin statistical limit in highly efficient fluorescent organic lightemitting diodes", J. Appl. Phys., 106, 12451p.
- Kraft A., Grimsdale A.C. and Holmes A.B.**, 1998,"Electroluminescent conjugated polymers - Seeing polymers in a new ligh", Angew. Chem. Int. Ed., 37, 402-428pp.
- Krummacher B. C., Choong V.E., Mathai M. K., Choulis S. A., So F., Jermann F., Fiedler T. and M. Zachau.**, 2006," Highly efficient white organic light-emitting diode", Appl. Phys. Lett., 88.
- Krummacher B. C., Nowy S., Frischeisen J., Klein M. and Brütting W.**, 2009 , "Efficiency analysis of organic light-emitting diodes based on optical simulation", Org.Electron, 10, 478-485pp.
- Kulkarni A.P., Tonzola C.J., Babel A., Jenekhe S.A.**, 2004,"Electron transport materials for organic light-emitting diodes", Chemistry of Materials, 16, 4556-4573pp.
- Kühlke D.**, 2007,"Optik: Grundlagen und Anwendungen", Verlag Harri Deutsch.
- Luo Y. and Aziz H.**, 2010,"Correlation between triplet-triplet annihilation and electroluminescence efficiency in doped fluorescent organic light-emitting devices", Adv.Funct.Mater., 20, 1285-1293pp.
- Mladenovski S., Neyts K., Pavicic D., Werner A., and Rothe C.**, 2009,"Exceptionally efficient organic light emitting devices using high refractive index substrates",Opt. Express 17, 7562-7570pp.
- Mu H., Li W., Jones R., Steckl A., and Klotzkin D.**,2007," A comparative study of electrode effects on the electrical and luminescent characteristics of Alq3/TPD OLED: Improvements due to conductive polymer (PEDOT) anode", J. Lumin., 126, 225-229pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Niu L. and Zhang F.**, 2007, "Enhanced performance by inserting ultrathin SiO₂ layer inorganic light-emitting devices", *phys. stat. sol. (a)*, 204, 900-906pp.
- Nobel Prizes and Laureates**, "The Nobel Prize in Chemistry 2000",
http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2000/ (Erişim tarihi: 14 aralık 2014)
- O'Brien D. F., Baldo M. A., Thompson M. E., and Forrest S. R.**,
 1999, "Improved energy transfer in electrophosphorescent devices", *Appl. Phys. Lett.*, 74, 442-444pp.
- Parker I.D.**, 1993, "Carrier tunneling and device characteristics in polymer light-emitting diodes", *J. Appl. Phys.*, 75.
- Pfeiffer M., Beyer A., Fritz T. and Leo K.**, 1998, "Controlled doping of phthalocyanine layers by cosublimation with acceptor molecules: A systematic Seebeck and conductivity study", *Appl. Phys. Lett.*, 73, 3202-3204pp.
- Pope M and Swenberg C.E.**, 1999, "Electronic Processes in Organic Crystals and Polymers", Oxford University Press, Oxford.
- Pope M., Kallmann H. P. and Magnante P.**, 1963, "Electroluminescence in organic crystals", *J. Chem. Phys.* 38, 2042-2043pp.
- Riel H.**, 2002, "Optimization of multilayer organic light-emitting diodes", Ph.D. thesis, University of Bayreuth, Germany.
- Rothe C., King S.M. and Monkman A. P.**, 2006, "Direct measurement of the singlet generation yield in polymer light-emitting diodes", *Phys. Rev. Lett.*, 97.
- Segal M., Baldo M. A., Holmes R. J., Forrest S.R. and Soos Z.G.**, 2003, "Excitonic singlet-triplet ratios in molecular and polymeric organic materials", *Phys. Rev. B*, 68.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Seo J.H., Lee S.J., Seo B.M., Moon S.J., Lee K.H., Park J.K., Yoon S.S., and Kim Y.K.,** 2010, "White organic light-emitting diodes showing nearly 100% internal quantum efficiency", *Org. Electron.*, 11, 1759-1766pp.
- Schwoerer M. and Wolf H. C.,** 2007,"Organic Molecular Solids", Wiley-VCH.
- Scott J. C. and Malliaras G. G.,** 2000,"Semiconducting Polymers", Hadziioannou G., van Hutten P. F., Willey.
- Sheats J. R., Antoniadis H., Hueschen M., Leonard W., Miller J., Moon R., Roitman D. and Stocking A.,** 1996,"Organic electroluminescent devices", *Science*, 273, 884-888pp.
- Spehr T., Pudzich R., Fuhrmann T. and Salbeck J.,** 2003,"Highly efficient light emitters based on the spiro concept", *Org. Electron*, 4, 61–69pp.
- Sun Y., Giebink N.C., Kanno H., Ma B., Thompson M. E. and Forrest S. R.,** 2006,"Management of singlet and triplet excitons for efficient white organic light-emitting devices", *Nature.*, 440, 908-912pp.
- Tang C. W., VanSlyke S. A. and Chen C. H.,** 1989,"Electroluminescence Of Doped Organic Thin-Films", *Journal Of Applied Physics*, 65, 3610-3616pp.
- Tang C. W., VanSlyke S. A. and Chen C. H.,** 1989,"Electroluminescence of doped organic thin-films" *J. Appl. Phys.*, 65, 3610-3616pp.
- Tang C.W. and Wanslyke S.A.,** 1987, "Organic electroluminescent diodes", *App. Phys. Lett.*, 51, 913p.
- Tokito S., Suzuki M. and Sato F.,** 2003, "Improvement of emission efficiency in polymer light-emitting devices based on phosphorescent polymer", *Thin. Solid. Film .*, 445, 353-357pp.
- Tsutsui T., Aminaka E., Lin C. P. and Kim D. U.,** 1997,"Extended molecular designconcept of molecular materials for electroluminescence: sublimed-dye films, molecularlydoped polymers and polymers with chromophores", *Phil. Trans. R. Soc. Lond., A* 355, 801-814pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Walzer K., Maennig B., Pfeiffer M., and Leo K.,** 2007,"Highly Efficient Organic Devices Based On Electrically Doped Transport Layers", Chem. Rev., 107, 1233-1271pp.
- Williams D. F. and Schadt M.,** 1970,"A simple organic electroluminescent diode", Proc. IEEE, 58, 476-476pp.
- Wohlgemant M., Tandon K., Mazumdar S., Ramasesha S. and Vardeny Z. V.,** 2001,"Formation cross-sections of singlet and triplet excitons in π -conjugated polymers", Nature , 409, 494-497pp.
- Wright J.D.,** 1995, "Molecular crystals", Cambridge University Press, New York.
- Wu C. C., Hung W.Y., Liu T.L., Zhang L.Z. and Luh T.Y.,** 2003,"Hole-transport properties of a furan-containing oligoaryl", J. Appl. Phys. 93, 5465-5471pp.
- Yamada T., Rohlffing F. and Tsutsui T.,** 2000,"Distribution of average electric field in tris-(8-hydroxyquinoline)aluminum and 4,4 '-bis [N-(1-naphthyl)-N-phenylamino]-biphenyl-based double-layer light-emitting diode", Jpn. J. Appl. Phys., 39, 1382-1386pp.
- Yan H., Huang Q., Scott B.J. and Marks T.J.,** 2004, "A polymer blend approach to fabricating the hole transport layer for polymer light-emitting diodes", J. Appl. Phys. Lett., 84, 3873-3875pp.
- Yang X., Müller D. C., Neher D. and Meerholz K.,** 2006,"Highly efficient polymeric electrophosphorescent diodes", Adv. Mater., 18, 948-954pp.
- Zhang X.J., and Jenekhe S.A.,** 2000,"Electroluminescence of multicomponent conjugated polymers.1.Roles of polymer/polymer interfaces in emission enhancement and voltage tunable multicolor emission in semiconducting polymer/polymer heterojunction", Macromolecule, 33, 2069-2082pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Zhong Z. Y. and Jiang Y. D.**, 2006, "Surface treatments of indium-tin oxide substrates for polymer electroluminescent devices", phys. stat. sol. (a), 203, 3882-3892pp.
- Zhou X., Pfeiffer M., Blochwitz J., Werner A., Nollau, A., Fritz T. and Leo K.**, 2001, " Very-low-operating-voltage organic light-emitting diodes using a p-doped amorphous hole injection layer", Appl. Phys. Lett., 78, 410-412pp.

ÖZGEÇMİŞ

EĞİTİM BİLGİLERİ

Lisans: Azad Üniversitesi-İRAN, Elektronik Mühendisliği

Yüksek Lisans: Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü

YAYINLARI

- Shirin SIAHJANI¹, Matthew WHITE, Niyazi Serdar SARICIFTCI and Sule ERTEN-ELA , 2014 “Fabrication and characterization of green Light Emitting Diode”, Turkish Journal of Physics, 2014,

KATILMIŞ OLDUĞU ULUSAL VE ULUSLARARASI KONGRELER

- Shirin SIAHJANI, Matthew WHITE, Niyazi Serdar SARICIFTCI and Sule ERTEN-ELA, 2014 “Thickness Dependence Study of Polymer Light Emitting Diode (PLED) in a ITO/PEDOT: PSS/TPD:Ir(mppy)₃:PBD:PVK/LiF:Al Device Geometry” IWOBEO 2014, Sözlü Sunum

GÖREV ALDIĞI ARAŞTIRMA PROJELERİ

KAZANDIĞI BURSLAR

