

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

**IŞIĞA DUYARLI ORGANİK ALAN ETKİLİ
TRANSİSTÖRLERİN (FOTOOFET) YAPIMI VE
KARAKTERİZASYONU**

**ZÜHAL ALPASLAN KÖSEMEN
DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**GEBZE
2016**

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

IŞIĞA DUYARLI ORGANİK ALAN
ETKİLİ TRANSİSTÖRLERİN (FOTOOFET)
YAPIMI VE KARAKTERİZASYONU

ZÜHAL ALPASLAN KÖSEMEN
DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. YUSUF YERLİ

GEBZE
2016

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**FABRICATION AND CHARACTERIZATION
OF PHOTO SENSITIVE FIELD EFFECT
TRANSISTORS (PHOTOOFET)**

ZÜHAL ALPASLAN KÖSEMEN

**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF PHILOSOPHY
DEPARTMENT OF PHYSICS**


**THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. YUSUF YERLİ**

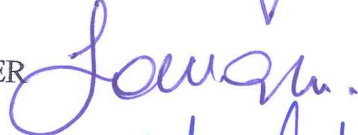
**GEBZE
2016**





GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 08/06/2016 tarih ve 2016/36 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 30/06/2016 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Zühal ALPASLAN KÖSEMEN' in tez çalışması FİZİK Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.


JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) :Prof. Dr. Yusuf YERLİ 

ÜYE :Prof. Dr. Savaş BERBER 

ÜYE :Doç. Dr. Mustafa ERKOVAN 

ÜYE :Doç. Dr. Yusuf ATALAY 

ÜYE :Doç. Dr. Mustafa OKUTAN 

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu çalışmada polimer tabanlı organik alan etkili transistörler üretilmiş ve bu aygıtların ışık altında davranışları incelenmiştir. Organik alan etkili transistörler alt kontak üst kapı ve sandviç tip şeklinde üretilmişlerdir. Transistör yapımında kullanılan elektrotlar foto-litografi yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Alan etkili transistörlerin, zamana bağlı olarak ışık altındaki tepkileri incelenmiş ve bir hafıza elemanı olarak kullanılabilme potansiyelleri araştırılmıştır. Aktif katman olarak kullanılan MDMO:PPV polimerinin moleküler ağırlığındaki değişimin fotoofet karakteristiğine etkisi araştırılmıştır. 25000 (Polimer A), 85000 (Polimer B), 400000 (Polimer C) molekül ağırlıklarına sahip MDMO-PPV polimeri kullanılarak üretilen transistörlerin, ışık altındaki özellikleri incelendiğinde molekül ağırlığı arttıkça ışığa tepkinin arttığı gözlemlenmiştir. Fotoofet' ler için kritik öneme sahip olan P (photoresponsivity) ve R (Resposivity) değerleri iyileştirmek için çok katmanlı yapı üretilmiş ve başarılı sonuçlar alınmıştır. Bu bağlamda P3HT ve CuPc'yi üst üste kaplayıp birden fazla aktif polimeri tek bir yapıda kullanarak multi aktif katmanlı fotoofet üretilmiştir. Bu çok katmanlı yapının performans özellikleri incelenmiştir. Dielektrik katmanın Fotoofet özelliklerine etkisini incelemek için polimer jel dielektrik kullanarak üretilen sandviç yapıları transistörlerin ışığa tepkisi incelenmiştir. Işık tepkisi negatif olan bu aygıtların düşük sıcaklıkta performansları incelenmiştir. Üretilen bu aygıtlardan iki türün ışıkla yürütebilecek aygıt olduğu saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Organik Alan Etkili Transistörler, Polimer, Fotoresponsiviti.

SUMMARY

In this work, polymer based organic field effect transistors have been produced and investigated their performance under the light. OFET's are fabricated in bottom contact top gate design. All electrodes in OFETs were made by using photolithographic procedure. The field-effect transistors light response has been analyzed depending on time and their potential is investigated which can be used as a memory element. It has examined that MDMO:PPV, which used as active layer, molecular weight effect on phototransistor characteristics. Transistors that was produced by using MDMO-PPV with 25,000 (Polymer), 85000 (Polymer B) 400 000 (Polymer C) molecular weights their performance were observed to increase in response to light with increasing molecular weight. Multi-active layer structure has been used for improve the value of P (photoresponsivity) and R (Resposivity) which are critical parameters for photoofets. In this context P3HT and CuPc were coated successively and this two active layer used in one photoofet. To examine the o dielectric layer properties effectson the of the phototransistor, sandwiched polymer gel transistor was fabricated manufactured and examined its response of light. It was observed that light has negative effect on this devices after than it was investigated their performance at low temperatures. It was determined that two kind of transistor can be used as light regulated circuit elements.

Keywords: Organic field effect transistors, Polymers, Photoresponsivity.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında tüm yönlendirmeleri ve destekleri için Sayın Prof. Dr. Yusuf Yerli'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım esnasında maddi manevi her türlü yardımda bulunan kızımın favori amcası Sayın Yrd. Doç. Sadullah Öztürk'e, her zorlu anda hep destek olan Sayın Doç. Dr. Mustafa Erkovan ve ailesine sonsuz teşekkür ederim.

Bu aşamaya gelmemi sağlayan üzerimde emeği bulunan tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmaları esnasında ve sonrasında yardımlarından dolayı Sayın Araş. Gör. Betül Canımurbey'e teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca evde ve okulda desteğini benden hiç esirgemeyen hayat arkadaşım, iş ortağım, sevgili eşim Dr.Arif Kösemen'e sonsuz teşekkür ederim.

Son olarak tüm öğrenim hayatım boyunca benden umudunu hiç kesmeyen hep destek olan Annem ve Babama ne kadar teşekkür etsem azdır.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLOLAR DİZİNİ	xiii
1.GİRİŞ	1
2.ORGANİK YARIİLETKENLER	2
2.1. Polimerler	2
2.1.1. Kimyasal Katkılama	4
2.1.2. Elektrokimyasal Katkılama	5
2.1.3. Foto Katkılama	6
2.1.4. Yük İnjesiyon Katkılama	6
2.1.5. Non Redoks Katkılama	6
2.2. Yük Transferi	8
3.ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTORLER	11
3.1. OFET Yapısı	11
3.2. OFET Çalışma Prensibi ve Elektriksel Karakterizasyonu	12
3.2.1. Metal/Organik Yarı İletken Arayüzünde Yük İnjesiyonu	12
3.2.2. Mobilite	15
3.2.3. Açma/Kapama Akımı Oranı	16
3.2.4. Eşik Voltajı	17
4.İŞİĞA DUYARLI ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTORLER (FOTO-OFET)	18
4.1. FOTO-OFET Cihazların Çalışma Prensibi	18
4.2. FOTO-OFET Cihazların Karakterizasyonu	19
5.DENEYSEL YÖNTEM	22
5.1. OFET Yapımında Kullanılan Malzemeler	22

5.2. Kaynak-Savak Elektrotlarının Hazırlanması	22
5.3. Aktif Katman İnce Filmlerin Hazırlanması	23
5.4. Dielektrik Katmanların Hazırlanması	24
5.5. FOTOOFET' lerin Üretimi	24
5.6. Üretilen FOTOOFET lerin Elektro-Optik Karakterizasyonları	25
6.İLETKEN POLİMERLERİN İNTRİNSİK ÖZELLİKLERİNİN IŞIĞA DUYARLI ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLER ÜZERİNE ETKİLERİ	26
6.1. Giriş	26
6.2. Sonuçlar ve Değerlendirmeler	28
7.MOLEKÜLER KATKILAMA ve POLİMER-JEL DİELEKTRİK KULLANIMI İLE DÜŞÜK OPERASYON VOLTAJINA ve YÜKSEK MOBİLİTE DEĞERİNE SAHİP OFET ÜRETİMİ	38
7.1. Giriş	38
7.2. Sonuçlar ve Değerlendirmeler	40
8.TANDEM YAPI KULLANILARAK IŞIĞA DUYARLI ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİTORLERİN PERFORMANSLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ	47
8.1. Giriş	47
8.2. Sonuçlar ve Değerlendirmeler	49
9.SONUÇLAR	59
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	70

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
MDMO:PPV	: Poly[2-methoxy-5-(3',7'-dimethyloctyloxy)-1,4-phenylenevinylene]
CuPc	: Copper(II) phthalocyanine
OFET	: Organik Alan Etkili Transistör
PhotoOFET	: Fotoofet
V_{th}	: Eşik Voltajı
PMMA	: Poly(methyl methacrylate)
F4-TCNQ	: 2,3,5,6-Tetrafluoro-7,7,8,8-tetracyanoquinodimethane
V_{Ds}	: Savak kaynak voltajı
Au	: Altın
HOMO	: Elektronlar tarafından işgal edilen en yüksek enerji orbitali
LUMO	: Elektronlar tarafından işgal edilmemiş en düşük enerji orbitali

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Sigma ve Pi bağlarının Ethan molekülünde gösterimi.	4
2.2: Redoks katkılama mekanizması.	5
2.3: Elektrokimyasal doplama işleminin gösterimi.	5
2.4: Poliasetilenin foto katkılama gösterimi.	6
3.1: OFET çalışmasının şematik gösterimi.	12
3.2: Metal /organik yarı iletken arayüzünde a)dipol bariyeri olmadan b)dipol bariyeri oluşmuş durumun şematik gösterimi.	13
3.3: OFET cihazın şematik operasyon durumu gösterimi.	15
5.1: Interdigitated kaynak-savak elektrodu şematik gösterimi.	23
5.2: Üretilen FOTOOFET lerin şematik gösterimi.	24
5.3: Jel yalıtkanı kullanılan cihazların şematik gösterimi. a) P3HT ve jel PMMA ile üretilen cihaz, b) P3HT ve ince film PMMA ile üretilen cihaz, c) PMMA jel ile üretilen MIS kapasitor, d) kullanılan kimyasalların şematik gösterimi.	25
6.1: MDMO-PPV tabanlı FOTOOFET lerin Out-put karakteristikleri karanlık (içi dolu çizgiler) ve aydınlık (içi boş çizgiler, 17 mW/cm ²) koşullarda. a) Polymer A, b) Polymer B, c) Polymer C, d) V _g -Ids garfıği bütün polimerler için karanlık ve aydınlık koşullarda.	29
6.2: MDMO-PPV tabanlı Au IDT elektrot üzerine inşa edilmiş FOTOOFET ler için transfer karakteristikleri ve kaçak akım değerleri, karanlık (içi dolu noktalar) ve aydınlık (içi boş noktalar) koşullarda. a) Polimer A, b) Polimer B, c) Polimer C, d) molekül ağırlığına bağlı mobilite değişimi (aydınlık ve karanlık koşullarda).	31
6.3: Transistörlerin a)Polimer A b)Polimer B c)Polimer C V _g = 0 koşulunda d) değişik ışık şiddeti altında out-put karakteristikleri.	32
6.4: Foto akımın ışık şiddetine bağlı garfıği a) V _g = 0V, b) V _g = -40 V.	33
6.5: MDMO-PPV fototransistörlerin a)Polimer A b)Polimer B c)Polimer C 17 mW/cm ² ışık gücü altında anahtarlama özellikleri.	35

6.6:	a)Zaman bağı anahtarlama özelliği b) MDMO-PPV polimerleri için zaman sabitleri (τ).	36
7.1:	Jel dielektrik malzemesi ve PMMA ince filminin farklı frekans değerleri altında kapasitif özellikleri.	41
7.2:	PMMA dielektrik katmanı saf P3HT nin kullanıldığı OFET cihazının a) out-put b)transfer karakteristikleri.	42
7.3:	Jel dielektrik ve P3HT aktif katmanı ile üretilen (a-b) OFET lerin transfer ve out-put karakteristikleri ve jel dielektrik ve F4-TCNQ katkılı P3HT ile üretilen cihazların (c-d) out-put ve transfer karakteristikleri.	43
7.4:	Jel dielektrik ve F4-TCNQ katkılı P3HT ile üretilen OFET lerin zamana bağlı ölçümleri.	45
8.1:	P3HT (100nm), CuPc/P3HT (10nm/100nm), P3HT/CuPc/P3HT (50nm/10nm/50nm) ve CuPc katmanlarının UV-vis absorpsiyon spektrumu.	49
8.2:	Cihaz 1, 2, 3 ve 4 ün ışık altında ve karanlıkta alınan out-put karakteristikleri.	50
8.3:	Cihaz 1, b) Cihaz 2, c) Cihaz 3 ve d) Cihaz 4 ün $V_{gs}=0$ V değerinde farklı ışık şiddetlerinde out-put karakteristikleri.	52
8.4:	Cihaz 1 a), 2 b), 3 c) ve 4 d) ün karanlık (içi dolu çizgiler) ve aydınlık (içi boş çizgiler) koşullarda $V_{DS}=30$ V için alınan transfer karakteristikleri.	53
8.5:	Cihaz 5 in karanlık (içi dolu çizgiler) ve aydınlık (içi boş çizgiler) koşullarda transfer ve out-put karakteristikleri (a-b), R nin V_{gs} ye göre değişimi (c), fotosesitivitenin ışık şiddetine göre değişim grafiği (d).	54
8.6:	Cihaz 1, 2, 3 ve 4 için V_{gs} ye karşı R değerinin değişim grafiği (a), P değerinin V_{gs} değerine göre değişim grafiği (b), ışık şiddetine göre foto-akımın değişim grafiği $V_{gs}=0$ V (c), $V_{gs} = -40$ V (d).	57
8.7:	P3HT/CuPc/P3HT tabanlı tandem FOTOOFET in yapısı ve yük transfer prosesi.	58

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
6.1: Polimer A, B ve C ile üretilen FOTOOFET ler için mobilite $\mu(\text{cm}^2/\text{Vs})$ (Doyum bölgesinden), Eşik voltajı V_{th} Açma/Kapama oranı (I_{on}/I_{off}), R ve P değerleri ve kullanılan polimerlerin molekül ağırlıkları, PDI değerleri ve bant aralıkları.	30
7.1: Üretilen cihazların OFET parametrelerinin özeti.	44
8.1: Bu çalışmada üretilen bütün cihazların performans özeti.	55

1. GİRİŞ

Organik elektronik günümüzde silisyum tabanlı teknolojiye en büyük rakip olarak umut vaat etmektedir. Organik elektronik üzerine yapılan çalışmalar Nobel kimya ödülüne layık görülen Alan Heeger, Alan MacDiarmid ve Hideki Shirawa'nın yaptığı yarı iletken polimerlerin elektriksel iletkenliği üzerine yaptığı çalışma ile başlamıştır[1]. İletken polimerler kolay ve ucuz üretimi, geniş yüzeylere kolayca kaplanabilmesi, esnek altlıklar üzerinde çalışılabilme gibi avantajları sebebiyle şimdiden ticari olarak elektronik piyasasında yerini almıştır.

Günümüzde polimer tabanlı diyotlar, ışık yayan diyotlar, güneş pilleri ve alan etkili transistörler organik elektronik konusunda oldukça sık çalışılan cihazlardır. Bu aygıtların bir çeşidi olan transistörler aktif matris ekranlarda, RFID taglarde ve sensör uygulamalarında kullanılmaktadır [2-4].

2. ORGANİK YARIİLETKENLER

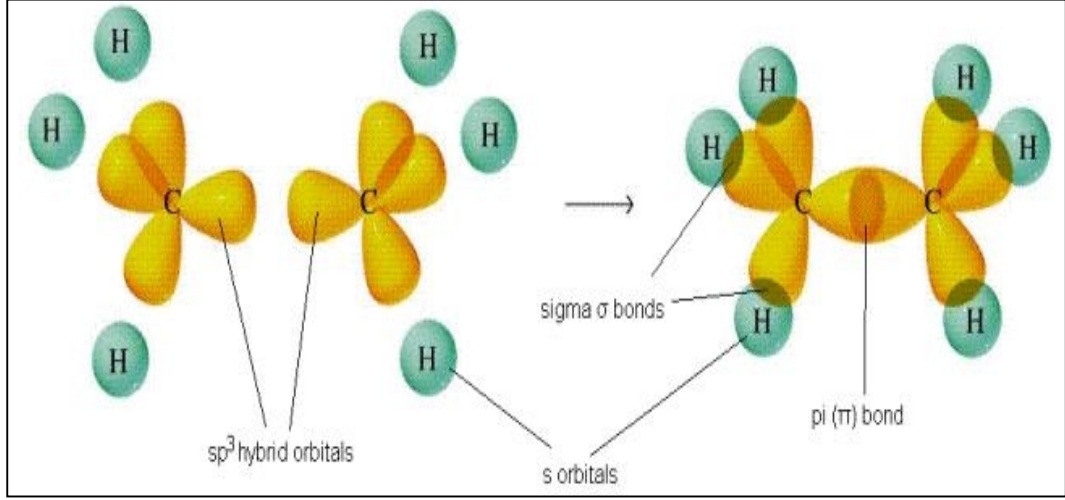
Bir karbon atomunun başka atomlarla kovalent bağ yapabileceği dört valans elektronu vardır. Karbon tek, çift ve üçlü bağ yapabilir[5]. Karbon dışında bir organik molekül başlıca hidrojen, azot ve oksijen veya sülfürde içerebilir. İzole karbon atomu dört valans elektronu içerir, bunların ikisi 2s orbitalinde ikisi 2p orbitalinde bulunur. Moleküler orbitaller bağlı ve anti bağlı olmak üzere iki şekilde bulunabilirler.

Bağlı moleküler orbitaller atomik orbitalerin ara yüzünde yapıcı şekilde oluşurlar ve normal orjinal atomik orbitallerden daha düşük enerjiye sahiptirler. Anti bağlı Bağlı moleküler orbitallerde ise atomik ara yüz orbitalleri yıkıcı etkiye sahiptir[6]. Molekülü kararlı olmasını engeller ve daha büyük enerjiye sahiptirler. Sonuç olarak atomik tek enerji seviyesinin iki moleküler enerji seviyesine ayrışması olur ve burada ayırım atomik orbitallerin kuvvet etkileşimini içerir. Temel seviyede elektronlar düşük enerji seviyelerini doldurur bu molekül için en düşük enerjiyi verir. Elektronlar tarafından işgal edilen en yüksek enerji orbitaline HOMO işgal edilmemiş en düşük enerji orbitaline LUMO denir. Atomik orbitaller arası etkileşim molekül orbital simetrisi sınıfları olan σ ve π ile kategorize edilebilir. Sigma bağı çekirdekler arası ters simetrikten, pi değildir. π bağı σ bağından daha zayıf olduğundan dolayı daha yüksek enerji orbitallerine sahiptir. Bunlara karşı anti bağ orbitalleri σ^* ve π^* olarak adlandırılır[7].

2.1. Polimerler

Polimerler makro moleküllerdir ve monomerik birimlerin birbirleriyle kovalent olarak bağlanarak uzun zincirler oluşturmasını sağlayan polimerizasyon işlemi üzerine oluşurlar. Organik polimerin omurgasını temel olarak kovalent bağlı karbon atomları oluşturur. Bir karbon atomu $1s^2 2s^2 2p_x^1 2p_y^1$ elektronik temel durum seviyesinde bulunur ve bu nedenle sadece iki elektronu diğer atomlarla kovalent bağ yapabilir. Karbon atomu etrafındaki yakın atomlar bir karbon atomunun 2s elektronlarını boş 2p orbitallerine geçmesini destekler ve böylece bir uyarılmış durumdaki karbon atomu ($1s^2 2s^1 2p_x^1 2p_y^1 2p_z^1$) bağ yapmak için dört valans elektronun sahip olur. Polimerik malzemelerin iletkenliği yalıtkanlıktan yarı iletkenliğe ve iletkenliğe kadar değişebilir. Bu polimer zinciri oluşturan karbon atomlarının elektronlarının

oluşturduğu elektronik durumlarına ve bunların birbirleriyle nasıl etkileştiğine bağlıdır. Sıradan yalıtkan bir polimer sp³ hibritleşmesi yapmış 4 hibrid orbitalindeki karbon atomları kendi aralarında 109.5 derece açığa sahip tetrahedral bir yapı oluştururlar. Bu sebeple her bir hibrit orbital σ bağı ile gelen atoma tek bağı ile bağlanır. Diğer yandan yarı iletken polimerler sp² hibritleşmesine sahiptir.sp² orbitalindeki 4 karbon valans elektronunun 3 ü 120 derece ile düzlemsel olarak bulunurken kalan bir elektron pertübe olmamış p orbitali ile gösterilir (2pz) kalan orbitallere dik olarak yerleşir. Hibrit orbitaller gelen atom ile güçlü lokalize σ bağı yaparlarken kalan 2pz orbitali komşu iki atomla üst üste binerek π ve π^* orbitallerini oluştururlar. Böylece σ bağındaki lokalize elektronlar polimer zincirinin omurgasını oluştururlar ve mekanik özelliklerde baskın olurlar, π bağındaki elektronlar ise zincir boyunca delokolizedir ve konjuge polimerin optik ve elektriksel özelliklerinde baskın olurlar[8]. Temel elektronik seviyede π bağı moleküler orbitalleri elektronlar doldurur ve yüksek enerjili π^* orbitalleri boş kalır. Yarılmış enerji seviyeleri sayısı ve π,π^* orbitalleri sayısı konjuge polimerdeki karbon atomu sayısına orantılıdır. Sonsuz uzunluktaki konjuge polimerde ayrılmış enerji seviyeleri o kadar yakın olur ki sürekli bandlar oluşur. Eğer her iki komşu karbon atomunun arasındaki bağlar eşit uzunlukta olursa bu tek boyutlu metal durumunda yarı dolu bandmış gibi olur. Lakin bu durum Peierl in karasızlık teoremine göre enerjik olarak tercih edilen bir durum değildir[9].Çünkü teoreme göre tek boyutlu metal latis bozulmasına karşı kararlı değildir. Bunların yerine konjuge sistemin enerjisi π bandlarını σ bağlarının içine katarak çifte bağı yapıp enerji azaltılabilir. Bu yapı dağılımı tek (uzun) çift (kısa) bağı alternatifini sunar, bu sebeple Eg 1-4 eVarası dolu π ile boş π^* arasında açılan bir band aralığına sahip olur. Bu nedenle polimere yarıiletken denmektedir. Tüm yarıiletken polimerlerde ve inorganik yarı iletkenlerde band aralığı aynı değerlerdedir[10].



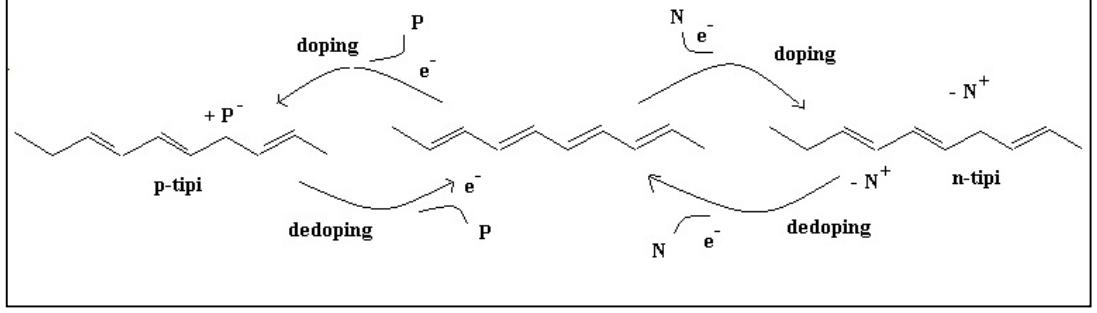
Şekil 2.1: Sigma ve Pi bağlarının Ethan molekülünde gösterimi.

π ve π^* bandlarını valans ve iletkenlik bandı gibi kabul edilebilir. En basit organik moleküllerden biri olan alkenlerin karbon atomları lineer zinciri tek bağlarla hidrojen atomlarına bağlıdır. Bir alken içerisinde her karbon atomu bir 2s üç 2p orbitali hibritize olarak yeni sp^3 orbitalini oluştururlar. sp^3 orbitalleri dört tane kovalent σ -bağı oluştururlar. σ -bağı içerisindeki elektronlar uzayda lokalizedir. Bu şekilde bağlanmayla oluşan sistemlerin geniş band aralığı vardır bu sebeple alkenler yalıtkandır.

Genel olarak elektriksel iletkenlik katkılama yoluyla yükseltgenip polimer içersineyük sokulmasıyla oluşturulabilir. Bu katkılama türleri kimyasal, elektrokimyasal katkılama, foto katkılama, yük injeksion katkılama, non redoks katkılamadır.

2.1.1. Kimyasal Katkılama

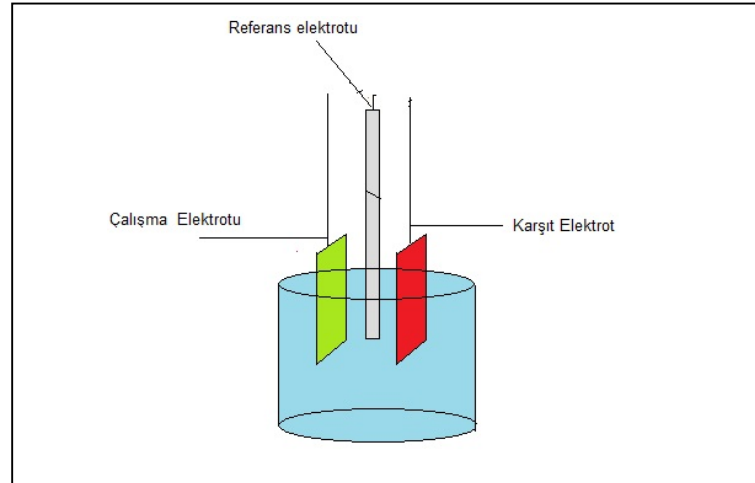
Tüm konjuge polimerlerin π omurga sistemleri elektron akseptor ya da donörleri tarafından kısmen yükseltgenir (p tipi redoks) yada indirgenir (n tipi redox). Bu yöntemle olan katkılama türüne kimyasal katkılama denir[11].



Şekil 2.2: .Redoks katkılama mekanizması.

2.1.2. Elektrokimyasal Katkılama

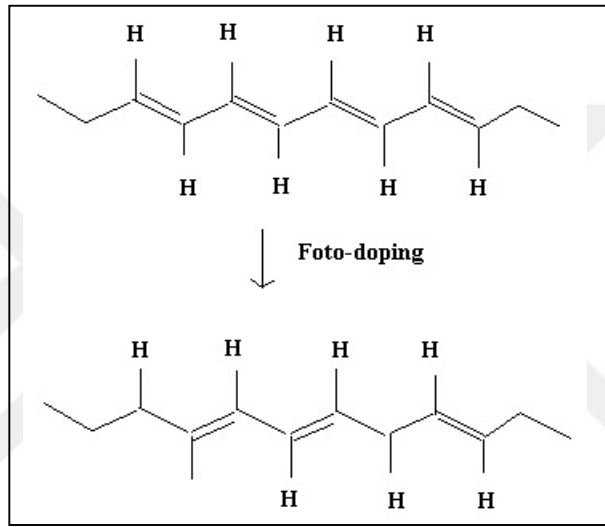
π -elektronlarının kojugasyonundan oluşan polimerleri elektrokimyasal yöntemle yükseltgeyip indirgeyerek doplama işlemi gerçekleştirilebilir. p-tipi katkılama işlemi, polimer filmi içerisinde tuz çözünmüş çözücü içerisinde daldırarak bir güç kaynağı ile DC güç kaynağının pozitif tarafına bağlayarak, negatif terminalde çözücü içerisindeki elektroda bağlayarak anodik oksitasyon işlemi ile gerçekleştirilir. Benzer şekilde polimer filmi içerisinde tuz çözünmüş olan çözelti içersine yerleştirdikten sonra DC güç kaynağının negatif terminalini buna, pozitif terminalde çözelti içerisinde bulunan elektroda bağlı olacak şekilde katodik indirgenme işlemi gerçekleştirilebilir[12].



Şekil 2.3: Elektrokimyasal doplama işleminin gösterimi.

2.1.3. Foto Katkılama

Konjuge makro moleküller eğer band aralığı enerjisinden daha yüksek enerjili fotonlarla uyarılırsa elektronları valans bandından iletkenlik bandına doğru çıkarır. Eğer bu uyarılma sürekli değilse elektronlar ve boşluklar rekombinasyon yaparak yok olurlar. Eğer aydınlatma devam ederken bir potansiyel uygulanırsa ve bu elektron ve boşlukların ayrılmasına sebep olursa fotoiletkenlik ortaya çıkar. Bu şekilde olan doplama işlemi foto katkılama diye adlandırılır[13].



Şekil 2.4: Poliasetilenin foto katkılama gösterimi.

2.1.4. Yük İnjesiyon Katkılama

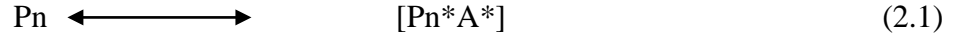
Yük injesiyonkatkılamai FET cihazlarda görülür. MIS (metal, yalıtkan, yarı iletken) oluşmuş bir yapıya, uygun potansiyel uygulandığında yük taşıyıcıların polimerin iletkenlik bandına injekte olmasıyla gözlemlenir[14].

2.1.5. Non Redoks Katkılama

Redoks tipi katkılamaten farklı olarak bu işlemde polimer omurgasını oluşturan elektronlarda herhangi bir değişim olmazken, enerji seviyelerinde tekrar bir ayarlanma olur. Kullanılan yükler malzemenin katkılama seviyesine bağlı olarak farklı seviyelerde bulunurlar bunlara soliton, polaron ve bipolaron denir[15].

2.1.5.1.Soliton

Katkılama işleminde dopant (donor) tarafından tek elektron verimi veya polimer dopant(akseptor) tarafından tek elektron alımı sonucu ortaya çıkan türe nötral soliton denir.



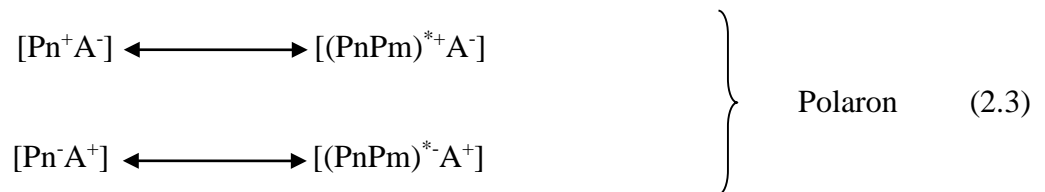
Eğer elektron çifti dopant verildiyse (anyon) yada alındıysa (katyon),yükülü soliton oluşur.



Solitonda bağımsız yük, iki faza ayrılmış bağlı elektronun zıt yönde eş enerji seviyelerine sahip olmasıyla gözlemlenebilir. Bu sebeple soliton polimer katkılama, yükseltgeme, indirgenme v.b. işlemler sayesinde olan bir çeşit dejenere taban seviyedir. Dejenere taban seviyeye karşılık gelen elektronlar yüksek enerjiye bağlı değildir. Böylece konjuge zincir boyunca serbestçe hareket edebilirler[16].

2.1.5.2.Polaron

Redoks işlemiyle yükülü soliton oluşumundan sonra yük transferi yükülü soliton segmentleri yada nötral konjuge polimer segmentler arasında olarak daha kompleks hale gelebilir. Bunların sonucunda radikal katyon ya da anyon oluşur.

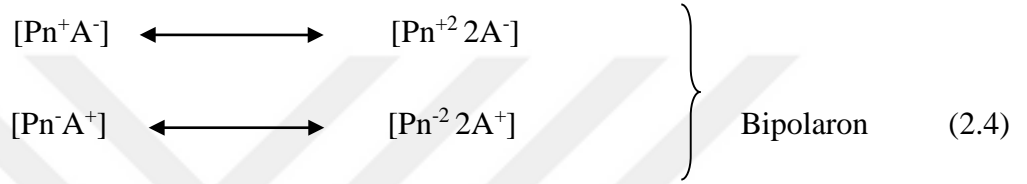


Pn ve Pm verici polimer segmentleridir. Bu sebeple polaron, (radikal katyon yada anyon) bir yük bölgesi birleşimidir ve radikaldir. Bu polaron seviyesi, çiftlenmemiş tek elektron içeren düşük enerji seviyesine yakın yeni lokalize elektronik

bir seviye olarak sonuçlanır. Polaronla ilgili enerji seviyesi stabilize olmamış bağlı orbitali temsil eder. Bu sebeple valans bandan daha yüksek enerji seviyesine sahiptir[17].

2.1.5.3. Bipolaron

Yüklü soliton ve polaron oluşumundan tek elektron transferi dışında yüklü solitonlar dopantla bir çift elektron transferiyle de oluşabilir. Bu oluşumlar dikasyon veya dianyon olabilir. Bunlara bipolaron denir[17].



Bipolaron spinsiz bir tuzaktır ve polaronun yükseltgenmesiyle oluşur. Bipolaron seviyesi iki ayrı polaron seviyesinin birleşimi olarak kabul edilebilir, ama iki polaron seviyesinden daha düşük enerji seviyesi vardır. Band aralığındaki iki polaron seviyesi yüksek doplu konjuge polimerin bipolaron band oluşturacak şekilde üzerine örtüşebilir, bu kısmen dolu bir band gibi davranır ve yüksek iletkenlik gösterir.

2.2. Yük Transferi

Düzensiz foto iletkenlerde yapılan elektriksel ölçümler göstermiştir ki; yük mobilitesi sıcaklık ve uygulanan elektriksel alana bağlıdır. Enerji düzensizliğinden dolayı yük transferi organik yarı iletkenlerde tipik inorganik yarı iletkenlerde olan band iletimi ile anlatılamaz.

Kristalize yarıiletkenler, silikon ve germanyum gibi uzun mesafeli düzene sahip olan üç boyutlu latise sahiptir.

Elektronların uzun ortalama serbest yolu vardır ve yük transferi band iletimi ile açıklanır.

Bu tarz iletimi engelleyen ana faktör yüklerin fononlar tarafından saçılmasıdır. Bu durum hareketli yüklerin latisin termal titreşimine yakalanmasıyla olur. Fonon

sayısı daha düşük seviyelerde azalırken, yük taşıyıcıların mobilitesi azalan sıcaklıkla artar[18].

Konjuge polimerlerde ve çoğu organik yarı iletkenlerde yükler enerjik düzensizliğe göre lokalize olmuştur. Yükün konjuge segment üzerinde delokalize olmasına rağmen, bu segmentlerin büyüklüğü sınırlıdır. Yüklerin hareketi segmentten segmente atlayacak şekilde sınırlıdır. Bu transfer hopping teorisiyle açıklanır ki bu bölgeden bölgeye fonon destekli bir tünellemedir. Fonon absorbe ederek bir yük taşıyıcısı zıplayacak yeterli enerji kazanır. Sonuç olarak yük mobilitesi sıcaklıkla beraber yükselir.

Pek çok hopping modeli vardır. Bunların pek çoğu Miller ve Abraham tarafından önerilen hopping oranı temel alınarak yapılmıştır. i bölgesinden işgal edilmemiş j bölgesine yük taşıyıcıların zıplama oranı W_{ij} , uzaysal mesafe R_{ij} ve iki bölge arası enerji farkı $\Delta\epsilon = \epsilon_i - \epsilon_j$ olmak üzere

$$W_{ij} = v_0 \exp(-2\alpha R_{ij}) \begin{cases} \exp\left(-\frac{\Delta\epsilon}{k_B T}\right) & \Delta\epsilon > 0 \\ 1 & \Delta\epsilon \leq 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

tünelleme olasılığını göstermektedir. Sonuç olarak hopping mesafesiyle exponansiyel azalma oranı olur. Sağdaki eksponansiyel fonon yoğunluğunun hesabıdır. İşgal edilmemiş seviyeler düşük enerjilerde olduğunda bu terim tek olur, aksi halde hopping termal desteklenmiş olur[19].

Bassler ise, bir yük iletim modelini düzensiz organik sistemler için önermektedir. Bu uzaysal ve enerjik düzensizliğe sahip bir sistemde hopping sürecini temel almıştır. Hopping oranı formül 1.1 deki gibi kabul edilmiştir. HOMO ve LUMO seviyelerinin genişlemesi tanımlamak için, gaussian yoğunluk seviyeleri kullanılmıştır.

Gaussian seçimini gaussian şekilli optik spektra gözlemlenmesiyle desteklemiştir. Böyle sistemlerde iletim analitik olarak çözülemeyeceğinden monte carlo simülasyonu kullanılmıştır. Sonuç yük mobilitesinin sıcaklık ve elektrik alanın bir fonksiyonu olduğunu tanımlamaktadır[19].

Geniş yoğunluk seviyeleri düşük mobilitelere ve güçlü bir sıcaklık bağımlılığına eğilimlidir. Deneysel sonuçlar sadece yüksek elektrik alan altında iyi tanımlanabilir. Enerji seviyeleri arası ilişki hesaba katılırsa deneyle uyum artırılabilir. Tipik yarı iletken polimerlerin mobilitesi deneysel olarak diyot karakteristiğinden çıkarılır ve bu

düşük ve yük yoğunluğundan bağımsız olur. Alan etkili transistörlerden çıkarılan mobilite hem daha yüksek olur hemde yük taşıyıcı yoğunluğu ile artar. Diyotlardaki yük taşıyıcı yoğunluğu genellikle transistörlerde bulunan değerden dört kat daha düşük olmaktadır. Bu mobilite farkının nedeni mobilitenin sıcaklık ve alan dışında önemli ölçüde yük taşıyıcı miktarına bağlı olmasıdır.



3. ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTORLER

3.1. OFET Yapısı

İnorganik malzeme tabanlı Metal oksit yarı iletken alan etkili transistorler elektronik endüstrisinde kritik bir öneme sahiptir. Si/GaAs teknolojisine alternatif olarak OFET ler radyo-frekans teknolojilerinde, sensor olarak, ışık yayarak veya ekranlarda piksel sürücü yada anahtarlama elemanı olarak konumlanabilir. Organik sistemler çözücüyle yada buhar fazında fabrikasyon yapabilmeyi, farklı altlıklarla hatta esnek altlıkla çalışabilmeyi ve yapısal değişimler yapabilme olanağı sağlar.

En sık kullanılan OFET cihaz yapısı ince film yapısıdır. Bu yapıda organik yarıiletken altında kapı elektrot olan bir dielektrik katman üzerine kaplanır. Yük iletimini sağlayan kontak olan kaynak ve savak yarı iletken organik filmin üzerine ya da bu filmin hemen altına kaplanabilir.

İyi bir performans gösteren OFET için[20];

- İşgal edilmiş en yüksek/en düşük işgal edilmemiş moleküler orbital(HOMO/LUMO) enerji sevipleri öyle bir konumda bulunmalıdır ki uygulanan elektrik alan ile uyarılabilinsin
- Komşu moleküller arası verimli yük göçünü, malzemenin kristal yapısı yeterli şekilde yakın orbitallerle örtüşerek sağlamalı.
- Safsızlıklar bir tuzak olarak davranmaması için katı kesinlikle çok saf olmalıdır.
- Tercihen moleküller fet altlığa paralel olacak şekilde yerleşmelidir. Çünkü en verimli yük iletimi pi-pi moleküller arası kümelenme boyunca olmaktadır.
- Yarıiletkenin kristal domainleri kaynak savak elektrodunun arasını homojen bir şekilde kaplamalıdır. Böylece film tek kristal morfolojisindeymiş gibi davranır.

Ofet aktif olduğunda negatif V_{sg} ve V_{sd} uygulandığında organik malzemeye p-kanal ve hollere çoğunluk yük taşıyıcısı diyebiliriz.

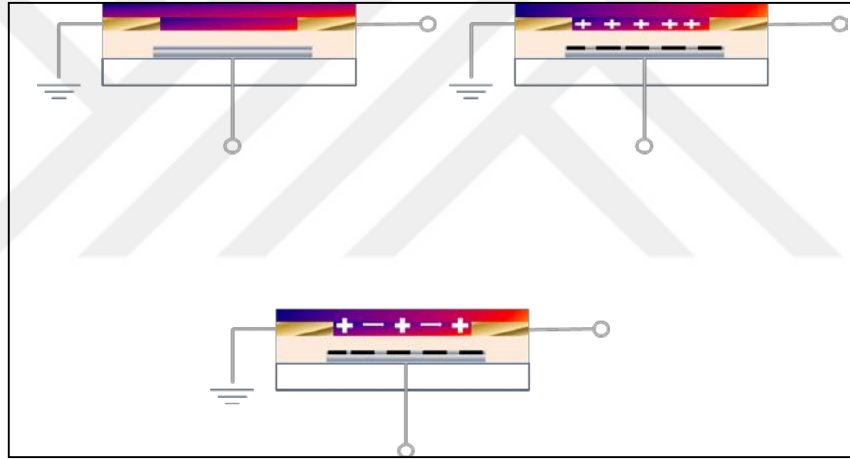
Diğer yandan eğer pozitif V_{sg} ve V_{sd} uygulandığında bir pozitif S_D akım gözlemleniyorsa yarı iletken n kanallıdır ve elektronlar hareketlidir. Bir kaç durumda OFET tüm V_{sg} ve V_{sd} polaritelerinde çalışır. Buna ambipolar yarıiletken denir. Temel

fark n ve p-tipi organik yarı iletkenin n ve p-tipi inorganik yarı iletkenden kapı voltajı işaretine göre aktif olur. Bu nedenle organik yarı iletkeni kesin bir dille n yada p tipi demek anlamlı olmaz. Kanal anlamı FET cihazın yapısı /malzeme kombinasyonuyla derinden alaklıdır.

3.2. OFET Çalışma Prensibi ve Elektriksel Karakterizasyonu

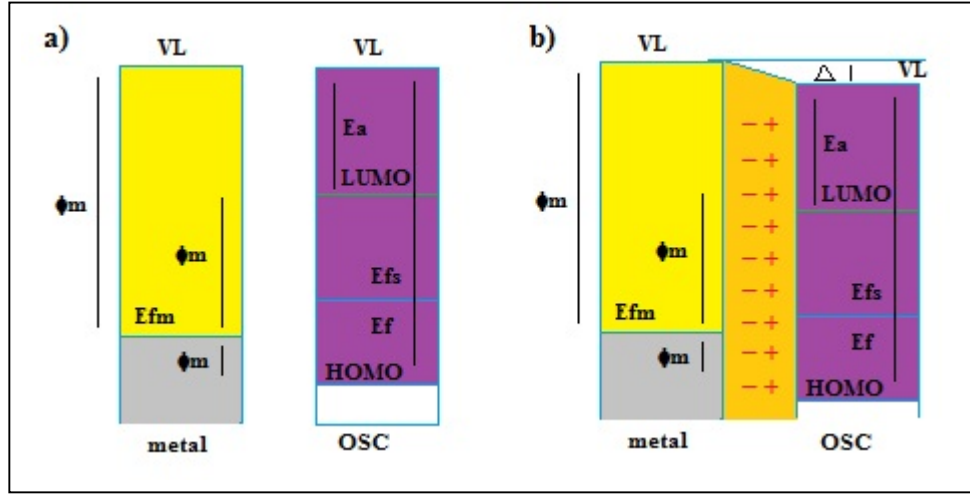
3.2.1. Metal/Organik Yarı İletken Arayüzünde Yük İnjesiyonu

Organik alan etkili transistörlerde yük transferi ana olarak iki aşamada yönetilir; metal elektrod/organik yarıiletken arayüzünde yük injesiyonu ve organik yarı iletkende kaynak ve savak elektrodları arasında oluşan kanal yoluyla yük taşınmasıdır.



Şekil 3.1: OFET çalışmasının şematik gösterimi.

Taneciklerin sınırları arası yük geçişi ve injekte oluşu şekil 3.1 le gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi öncelikle yük taşıyıcılar kaynak elektrodundan organik yarıiletken içersine elektrodlar/organik yarıiletken arayüzü yoluyla injekte olur daha sonra transistör kanalı yoluyla yük taşıyıcı geçişi olur. p-kanal transistörde elektron boşlukları kaynak elektrodundan yarıiletkenin HOMO seviyesine ,n-kanalda elektronlar elektrodan injekte olarak olarak LUMO seviyesine giderler. Elektrodan organik yarıiletkene verimli bir yük injesiyonu için,yük taşıyıcılar metal/organik yarıiletken arayüzdeki yük injesiyon bariyerinin üzerinden gelmelidir.



Şekil 3.2: Metal /organik yarı iletken arayüzünde a)dipol bariyeri olmadan, b)dipol bariyeri oluşmuş durumun şematik gösterimi.

Mott-Schottky modelinde ,bariyer yüksekliği metal elektrdodun iş fonksiyonu ile organik yariletkenin HOMO ve LUMO seviyeleri arasındaki fark olarak tanımlanır[21]. Metal/organik yarı iletkenarayüzünde oluşan bariyere schottky bariyeri denir.Boşluk injeksiyon bariyeri Φ_{bh} ve elektron injeksiyon bariyeri Φ_{be} metalin fermi seviyesine göreHOMO ve LUMO seviyesine bağlıdır. Metal /organik yarı iletken kontaklarının teorik tanımına göre ,elektron injeksiyon bariyeri alttaki gibi verilir.

$$\Phi_{be} = E_{FM} - E_{LUMO} = \Phi_m - E_A \quad (3.1)$$

Φ_m metalin çalışma fonksiyonu yani elektronu fermi seviyesinden vakum seviyesine hareket ettirmek için gereken enerjidir. Organik yarı iletkenin E_a elektron çekimi LUMO seviyesi ile vakum seviyesi enerji farkıdır.Elektron boşluğu injeksiyon bariyeri şöyle verilir,

$$\Phi_{bh} = E_{HOMO} - E_{FM} = E_1 - \Phi_m \quad (3.2)$$

E_1 ,organik yariletkenin homo seviyesi ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkı olan organik yariletkenin iyonizasyon potansiyelidir.

Mott-schottky iyi bir omik kontak modeline göre metal elektrodun OSC nin HOMO LUMO seviyelerine göre uyumlu olması gerekmektedir. Mott-schottky modeli genel bir fikir versede aslında metal/osc arayüzü daha karmaşıktır.

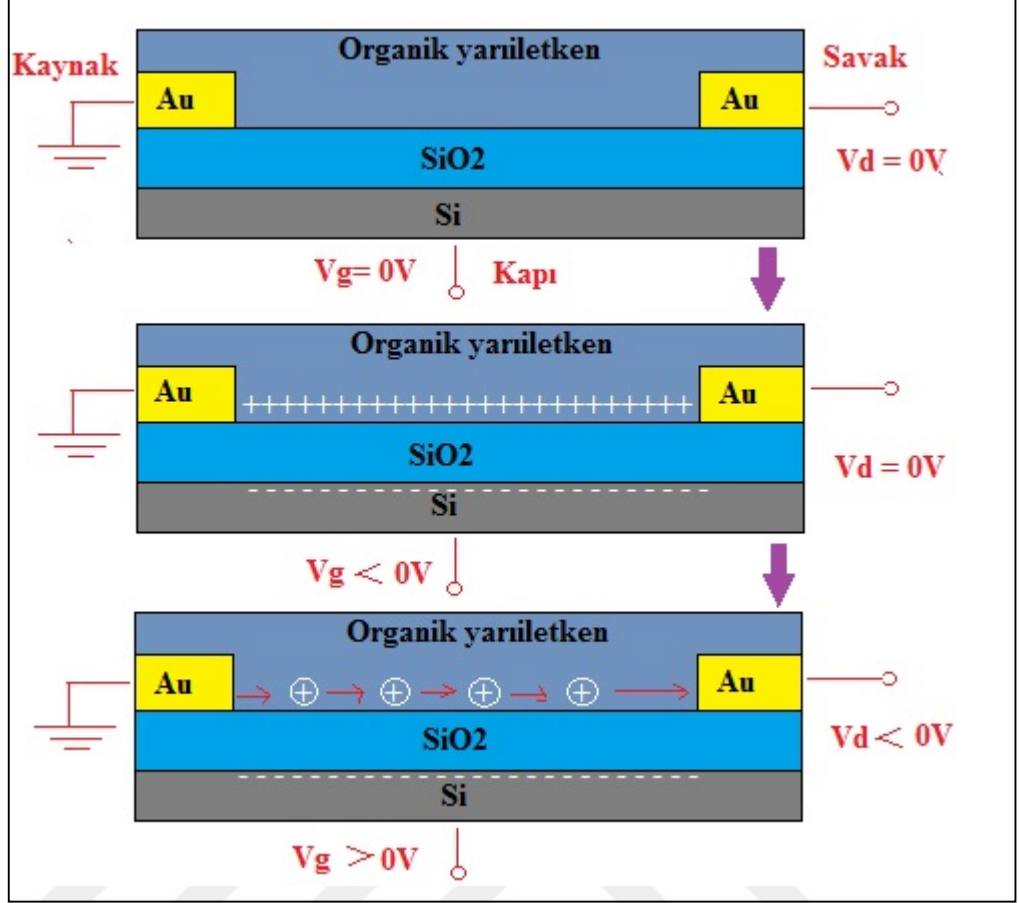
Metalin iş fonksiyonu ile organik yarı iletkenin HOMO seviyesi iyi uyuşsa bile bariyer arayüzde dipol oluşumu olabilir. Dipol tabakasının oluşmasından dolayı organik yarı iletkenin vakum seviyesi kayar ve arayüzde bir bariyer oluşur. Buna dipole bariyeri denir. Dipol bariyerin değeri arayüzdeki dipol bariyerin şiddetiyle saptanır. Eğer bir dipol bariyeri (Δ) metal/organik yarı iletken arayüzünde oluşuyorsa injeksiyon bariyeri denklem 1 ve 2den elde edilebilir;

$$\Phi_{bh} = E_{HOMO} - E_{FM} = E_1 - \Phi_m - \Delta \quad (3.3)$$

$$\Phi_{be} = E_{FM} - E_{LUMO} = \Phi_m - E_A + \Delta \quad (3.4)$$

OFETlerde dipol bariyerinin oluşması yük injeksiyonu üzerine negatif etkisi vardır. Çünkü dipol bariyeri geri itici etkiyi arttırıcıdır. Sonuç olarak metalin efektif iş fonksiyonu belirgin şekilde düşer. Çalışmalar göstermiştir ki atomik olarak temiz olan 5.2eV iş fonksiyonuna sahip altın bir yarı iletken ile kontak olarak kullanıldığında bu değer 4.5 eV civarına düşer. Bu metalin efektif iş fonksiyonunun arayüzdeki dipol bariyeri etkilenecek şekilde düşmesine sebep olur. Dipol bariyeri arttığında arayüzde büyük kontak direncine sebep olur ve arayüz yük injeksiyonunu sınırlandırır.

Ofetleri çalıştırmak için V_g kapı voltajı kapı elektrotuna V_d savak voltajı savak elektrotuna uygulanır. Kaynak elektrodu daima topraklanmış (ground) olmalıdır ($V_d=0$). Bir pozitif gerilim V_g kapı elektrotuna uygulandığında, kaynak elektrotu kapı elektrotundan daha negatif olur ve elektronlar kaynak elektrotundan injekte olmaya başlar. Öteki taraftan eğer bir negatif gerilim V_g kapı elektrotuna uygulanırsa, kaynak elektrotu kapı elektrodan daha pozitif olur ve elektron boşlukları kaynak elektrotundan injekte olur. V_g kapı elektrottan uygulanmaya başladığında dielektrik/organik yarıiletken arayüzüne yakınında yük taşıyıcılar toplanır ve kaynak ile savak arasında organik yarı iletken içerisinde iletken bir kanal oluşturur.



Şekil 3.3: OFET cihazın şematik operasyon durumu gösterimi.

Ofetin çıkış akımı ve uyarılmış yük taşıyıcıları V_g kontrolü ile kolayca ayarlanabilir. V_d savak elektroduna uygulandığında yük taşıyıcılar kaynak elektrodundan organik yarı iletken içersine injekte olurlar ve sonra iletken kanaldan savak elektroduna doğru bir geçiş başlar. Düşük besleme bölgesinde akım besleme voltajı ile lineer olarak artar ve yüksek bias voltajında doyuma ulaşır[22].

3.2.2. Mobilite

Ofetin kalitesini belirleyen önemli parametrelerden biri alan etkili mobilitedir. Aygıtın mobilitesi malzeme içersinde yük taşıyıcıların geçişinin verimine bağlıdır. Mobilite lineer ve doyum bölgesinden türetilebilir. Düşük V_d , ($|V_d| > |V_g - V_t|$), V_d nin artışıyla savak akımı lineer olarak artar (bu transistorun lineer düzeni olarak bilinir.) $|V_d| < |V_g - V_t|$ olduğu zaman, I_d ; V_d den bağımsız olur ve doyuma gider. Ofetin lineer ve saturasyon bölgesindeki savak akımı denklem 3.5 ve 3.6 da verilmiştir.

$$I_d = \frac{WC_i\mu}{L}(V_g - V_t - \frac{V_d}{2})V_d \quad (3.5)$$

$$I_d = \frac{WC_i\mu}{2L}(V_g - V_t)^2 \quad (3.6)$$

C_i yalıtkan tabakanın birim alandaki kapasitesi, V_t eşik voltajı ve μ ise alan etkili mobilitedir. İletkenliği ise savak akımının kapı voltajı ile değişimidir ve transfer eğrisinden hesaplanır.

$$g_m = \frac{\partial I_d}{\partial V_g} \quad (3.7)$$

Linear mobilite g_m den çıkarılarak şöyle gösterilebilir,

$$\mu = \frac{L}{WC_i V_d} \frac{\partial I_d}{\partial V_g} \quad (3.8)$$

Saturasyon bölgesindeki savak akımı kapı voltajının karesi ile değişir. Eşik voltajı kapı voltajının savak akımına olan eğrisinden çıkarılır ve saturasyon mobilitesi alttaki denklem kullanılarak hesaplanır[23-25].

$$\mu_{sat} = \frac{2LI_{d,sat}}{WC_i(V_g - V_t)^2} \quad (3.9)$$

3.2.3. Açma/Kapama Akımı Oranı

Akımın açma/kapama oranı maksimum akımın (açma-akımı) minimum akıma (kapama-akımı) bölünerek bulunur. Bu parametrenin sabit bir değeri yoktur.

Kapı voltajının bir fonksiyonu olan akım ölçümleri için voltaj sınırları(kapı voltajı ve savak voltajı) çalışmadan çalışmaya geçebilir ve I_d - V_g eğrisine karşılık gelen açma/kapama oranı farklı çıkabilir.

Açma/kapama oranı herhangi bir organik transistör için çok önemli bir parametredir ve esnek ekranlara ve mantık devrelere uygulanması açısından oldukça

önemlidir. Yüksek açma/kapama oranı organik esnek ekranlarda yüksek kontrast sağlarken, mantık devrelerinde açma/kapama durumları arasında temiz bir geçiş sağlar.

Eğer bir yüksek açma akımıyla açma/kapama oranı düşükse, hatta devre kapama durumundayken bile, devre yüksek miktarda enerjiyi yüksek kapama akımı sebebiyle harcar, ki bu yüksek enerji dağılımına sebep olur. Mantık devrelerinde pratik uygulamalar için düşük güç dağılımı önemli bir faktördür [23-25].

3.2.4. Eşik Voltajı

Eşik voltajı (V_t), kaynak ve savak elektrotları arasında oluşan iletkenlik kanalında bir transistor akımının akmasına neden olan minimum kapı voltajıdır. Eşik voltajında yarı iletkendeki tüm tuzaklar dolar ve termal aktive olan yük taşıyıcıları transistor geçişinde baskın rol oynar. V_t , I - V_g eğrisinden lineer fit ile örneğin I_d - V_g eğrisinden (düşük V_d ler için) yada $(I_d)^{1/2}$ - V_g eğrisinden (büyük V_d ler için) $I_d=0$ ' a kadar olan kısımdan bulunabilir [23-25].

4. IŞIĞA DUYARLI ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTORLER(FOTO-OFET)

4.1. FOTO-OFET Cihazların Çalışma Prensibi

Transistorün aktif katmanının aydınlanmasından sonra iki farklı etki gözlemlenir fotovoltajik etki ve fotoiletken etki.

Serbest elektron ve elektron boşluğu bulunan bir yarı iletken karanlıkta elektriksel iletkenlik ;

$$\sigma_0 = n_0 q \mu_{n0} + p_0 q \mu_{p0} \quad (3.10)$$

μ_{p0} ve μ_{n0} elektron boşluğu ve elektron mobilitesi, p_0 ve n_0 elektron boşluğu ve elektron yoğunluğunu temsil etmektedir.

Bir fotouyarım olduğunda tüm yük yoğunlukları tekrar değişecektir. Aydınlatma sonrası iletkenlik Δn ve Δp yük yoğunlukları, $\Delta \mu_n$ ve $\Delta \mu_p$ mobilite olmak üzere

$$\sigma_0 + \Delta \sigma = q(n_0 + \Delta n)(\mu_{n0} + \Delta \mu_n) + q(p_0 + \Delta p)(\mu_{p0} + \Delta \mu_p) \quad (3.11)$$

Beraber

$$\Delta \sigma = q[(n_0 + \Delta n)\Delta \mu_n + \Delta n \mu_{n0} + (p_0 + \Delta p)\Delta \mu_p + \Delta p \mu_{p0}] \quad (3.12)$$

Eğer $\Delta p = \Delta n$ kabul edersek üsteki denklem şu şekilde yazılabilir,

$$\Delta \sigma = q \left[n_0 \left(1 + \frac{p_0 \Delta \mu_p}{n_0 \Delta \mu_n} \right) \Delta \mu_n + \Delta n \left(1 + \frac{\mu_p}{\mu_n} \right) \mu_n \right] \quad (3.13)$$

Eğer

$$b = \frac{\mu_n}{\mu_p} = \frac{\mu_{n0} + \Delta \mu_n}{\mu_{p0} + \Delta \mu_p} = \frac{\mu_{n0}}{\mu_{p0}} = \frac{\Delta \mu_n}{\Delta \mu_p} \quad (3.14)$$

Sonra

$$\Delta\sigma = qn_0 \left(1 + \frac{p_0}{n_0 b}\right) \Delta\mu_n + q\Delta n \left(1 + \frac{1}{b}\right) \mu_n \quad (3.15)$$

Ve n- tipi yarıiletken için $n_0 \gg p_0$ kabul edersek;

$$\Delta\sigma \approx qn_0 \Delta\mu_n + q\Delta n (\mu_n + \mu_p) = \Delta\sigma_{mc} + \Delta\sigma_{exc} \quad (3.16)$$

$\Delta\sigma_{mc}$ çoğunluk yük taşıyıcı değişimine bağlı fotoiletkenliği, $\Delta\sigma_{exc}$ ise yük artımı sebebiyle olan fotoiletkenliğin ikinci terimini temsil etmektedir.

Fotoiletkenliğin teorik gösterimi fotouyarıma karşı $\Delta\sigma_{mc}$ ve $\Delta\sigma_{exc}$ katkısının göstermeyi sağlar, foto iletkenlik çoğunluk yük taşıyıcılarının mobilitesi $\Delta\sigma_{mc}$ tarafından kontrol edilir ve oluşum (generasyon) oranı yeterince yüksek olduğunda fotoiletkenlik fazlalık taşıyıcılar tarafından baskındır[21].

4.2. FOTO-OFET Cihazların Karakterizasyonu

Çoğu organik yarıiletkenlerde iletkenlik bir tip çoğunluk yük taşıyıcı tarafından sağlanır. Bir taşıyıcı transportu göz önüne alındığında denklemi sadeleştirmek için karanlıkta,

$$\sigma_0 = n_0 q \mu_{n0} \quad (3.17)$$

Ve aydınlıkta

$$\sigma_0 + \Delta\sigma = (n_0 + \Delta n) q (\mu_{n0} + \Delta\mu_n) \quad (3.18)$$

Beraber

$$\Delta\sigma = q\mu_{n0} \Delta n + qn\Delta\mu_n \quad (3.19)$$

İki tip etki oluşur üsteki denklemde,

i) yük mobilitesinde yükseliş olur,

$$\Delta\sigma = qn\Delta\mu_n \quad (3.20)$$

ii) yük yoğunluğunda yükseliş olur

$$\Delta\sigma = q\mu_{n0}\Delta n = (\Delta l/S)/E\Delta l \quad (3.21)$$

Bu nedenle fototransistörde, savak akımı optik güç yoğunluğu ile orantılı olarak (P_{opt}) yükseldiği zaman fotoiletken etki gözlemlenir ve uyarılmış fotoakım,

$$I_{ph,pc} = (q\mu nE)WD = BP_{opt} \quad (3.22)$$

şeklinde tanımlanır, μ yük mobilite, W kapı genişliği, D aktif katmanın kalınlığı ve B ise oransal faktördür[26].

Fototransistörde diğer bir etki ise fotovoltajik etkidir. Bu etki metal ve yarıiletken arayüzünde bir bariyer oluştuğunda oluşur. Bu durum schottky bariyere bağlı olarak transistor açma durumundayken açıklanır, eğer yarıiletkene yakın komşu kıtlık bölgesinde elektron-elektron boşluğu çifti oluşursa iç alan tarafından ayrılırlar ve metalik elektroda ile yarıiletken arasında bir fotovoltaj üretilir. Sonuç olarak bu etkiye kaynak altında tuzaklanan ve toplanan yüktaşıyıcıları sebep olur. Böyle fotovoltajik etkiler küçük moleküllerde görülmüştür. Bu teoriye göre aydınlanmadan sonra eşik voltajındaki kayma ΔV_{th} açık devre voltajına V_{oc} orantılıdır[27].

$$\Delta V_{th} \propto V_{oc} = \frac{nkt}{q} \ln \left(\frac{nq\lambda P_{opt}}{I_0 hc} + 1 \right) \quad (3.23)$$

Aydınlanmadan sonra kaynak ve savak arasındaki akım I_{ds} den yükselerek $I_{ds} + \Delta I_{ds}$ olur, eşik voltajı ise V_{th} tan $V_{th} - \Delta V_{th}$ olacak şekilde azalır ($\Delta V_{th} > 0$).

Böylece

$$\Delta I_{ds} = G_m \Delta V_{th} \quad (3.24)$$

G_m iletkenliktir.

Sonuç olarak fotovoltajik etki ile ortaya çıkan foto akım aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$I_{ph,pv} = G_m \Delta V_{th} = A \frac{nkt}{q} \ln \left(\frac{nq\lambda P_{opt}}{I_0 hc} + 1 \right) \quad (3.25)$$

A oransal parametredir. Başka bir önemli parametre olan fotoiletken kazanımı (g) şöyle ifade edilir;

$$g = \frac{\tau \mu E}{L} = \frac{\tau}{\tau_t} \quad (3.26)$$

τ_t çoğunluk yüklerin geçiş zamanı, τ azınlık yüklerin ömrü ve L iki elektrod arasındaki uzunluktur. Bu denklem kazancın büyük oranda L ve τ ya bağlı olduğunu gösterir, bu yüzden yüksek kazanç için τ yüksek, L düşük olmalıdır. Kazanç, azınlık taşıyıcılar yarı iletken bulk içersinde var olurken, yarı iletkeni geçen çoğunluk yük taşıyıcısının sayısıdır.

Fototransistor karakterizasyonunda OFET parametrelerine ek olarak foto akımın açık ve kapalı olduğu durumlardaki oranı (R) responsivite değeri hesaplanır.

$$R = EQE \frac{\lambda q}{hc} = \frac{I_{ph}}{P_{opt}} = \frac{I_{d,ph} - I_{d,dark}}{P_{opt}} \quad (3.27)$$

I_{ph} kaynak savak arasındaki foto akım, P_{opt} sistem üzerine uygulanan optik güç, $I_{d,ph}$, $I_{d,dark}$ aydınlık ve karanlıktaki savak akımıdır[28].

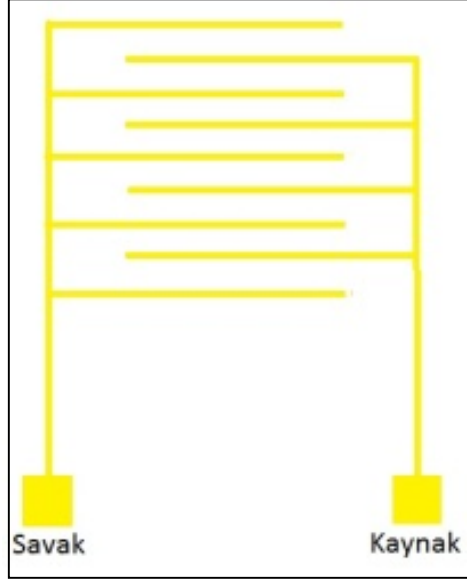
5. DENEYSEL YÖNTEM

5.1. OFET Yapımında Kullanılan Malzemeler

Bu tez kapsamında kullanılan bütün kimyasal malzemeler ticari olarak Aldrich firmasından temin edilmiştir. Aktif katman olarak; farklı molekül ağırlıklarına sahip, MDMO-PPV, P3HT çözülebilen iletken polimerler olarak ve CuPc çözülemeyen konjuge küçük molekül olarak kullanılmıştır. Üç farklı molekül ağırlığına sahip MDMO-PPV malzemesi kullanılmış ve molekül ağırlıklarına göre Polimer A (25000), Polimer B (400000) ve Polimer C (85000) olarak isimlendirilmişlerdir. Aktif katman olarak kullanılan P3HT ise 135000 molekül ağırlığına sahiptir. Moleküler katkı malzemesi olarak F4-TCNQ küçük molekülü kullanılmıştır. Bu malzeme oldukça güçlü bir elektron akseptör malzemedir. HOMO-LUMO seviyeleri 5.24 ve 8.34 eV olan bu malzeme P3HT polimerine katılanmıştır. OFET üretiminde yalıtkan katman olarak ince film PMMA ve jel formunda PMMA kullanılmıştır. PMMA yı jel formunda elde etmek için PC (Propilen karbonat) ve ACN (Acetonitrile) çözücülerini kullanılmıştır.

5.2. Kaynak-Savak Elektrotlarının Hazırlanması

Cam üzerine termal buharlaştırma yöntemi ile önce 5nm Cr ve üstüne 100nm Au kaplanır. Elektrotlar standart fotolitografik yöntem ile kazınarak oluşturulur ve sonuç olarak interdigitated (IDT) savak-kaynak elektrotları oluşturulmuş olur (Şekil 5.1). elektrotların kanal aralığı 50 µm ve kanal uzunluğu 12 cm olacak şekilde ayarlanır.



Şekil 5.1: Interdigitated kaynak-savak elektrodu şematik gösterimi.

5.3. Aktif Katman İnce Filmlerin Hazırlanması

MDMO-PPV aktif katmanı hazırlamak için bütün molekül ağırlıklarındaki MDMO-PPV ler 1.2 diklorobenzen çözücüsü içinde 50 °C de 2 saat süreyle çözülmüşlerdir. Polimer A için 5 mg/ml, Polimer B için 12 mg/ml ve Polimer C için 6 mg/ml oranlarında çözeltiler hazırlanmıştır. Daha sonra bu çözeltiler döndürerek kaplama yöntemi ile IDT kaynak-savak elektrotları üzerine kaplanmış ve 110 °C sıcaklıkta 10 dk tavlama yapılmıştır. Bu yapı 6. bölümde kullanılmıştır.

P3HT aktif katmanı 10mg/ml oranında 1,2 diklorobenzen çözücüsünde hazırlanan çözeltinin döndürerek kaplama yöntemi ile IDT elektrotlar üzerine kaplanması ile elde edilmiştir. Hazırlanan ince filmler 150 °C 15dk tavlama yapılmıştır. Bu yapı 7. ve 8. bölümlerde kullanılmıştır. P3HT ye F4-TCNQ katlamak için ağırlıkça 1:0.1 (P3HT:F4-TCNQ) oranında F4-TCNQ P3HT çözeltisine eklenmiş ve geri kalan herşey katkısız P3HT ile aynı şekilde yapılmıştır. Bu yapı 7. kısımda kullanılmıştır.

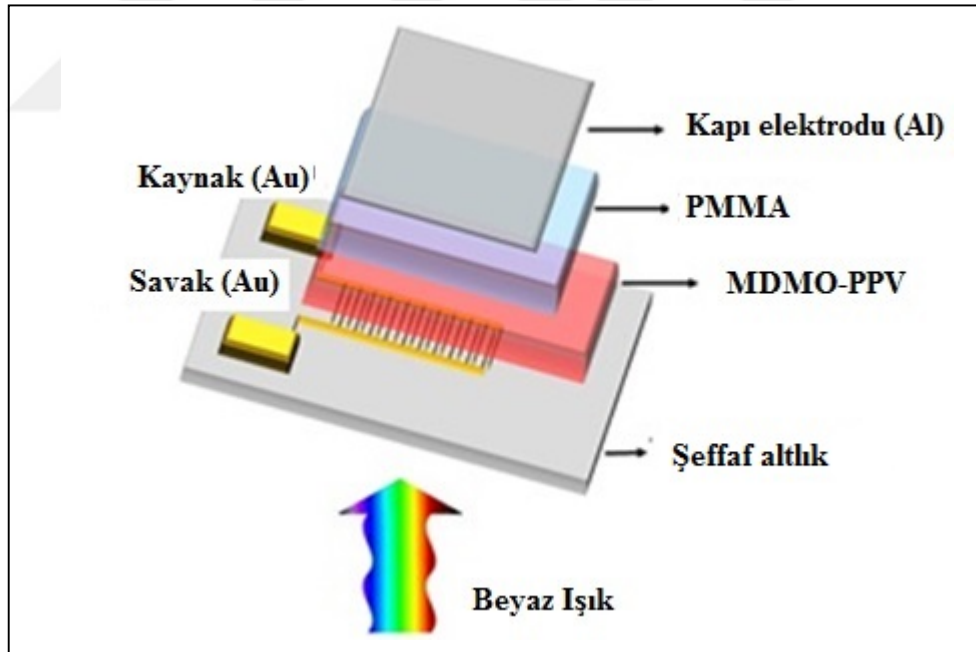
CuPc aktif katmanı ise termal buharlaştırma ile IDT elektrot yüzeyine 4 nm/s hızla kaplanmıştır. Bu yapı 8. kısımda kullanılmıştır.

5.4. Dielektrik Katmanların Hazırlanması

Bütün bölümlerde dielektrik katman olarak PMMA yalıtkan polimeri kullanılmıştır. 7. kısımda bunun yanında jel formunda PMMA dielektrik katman olarak kullanılmıştır. PMMA ince film hazırlamak için öncelikle PMMA etilasetat içinde 70 °C sıcaklıkta 2 saat boyunca karıştırılarak çözülmüştür (60 mg/ml). Hazırlanan PMMA çözeltisi aktif katmanlar üzerine döndürerek kaplama yöntemi ile kaplanmış ve 110 °C 10 dk tavlansmıştır. Bu yapı bütün bölümlerde kullanılmıştır.

Jel formunda PMMA elde etmek için PMMA öncelikle AC içinde 200 °C sıcaklıkta çözülmüş ve içine PC eklenerek jel formu alana kadar karıştırılmıştır. Karışım jel formu aldıktan sonra soğutularak aktif katmanın üzerine sürülerek kullanılmıştır. Bu yapı 7. kısımda kullanılmıştır.

5.5. FOTOOFET' lerin Üretimi

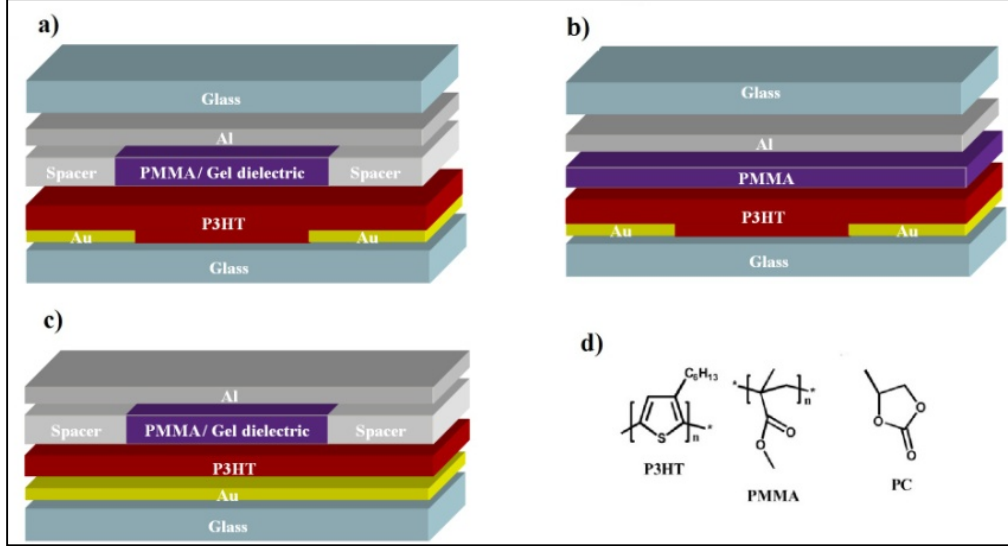


Şekil 5.2: Üretilen FOTOOFET lerin şematik gösterimi.

Bu çalışmada kullanılan bütün OFET ler alt kontak üst kapı tasarımında üretilmişlerdir.

IDT üzerine aktif katman kaplanır ve aktif katman üzerine yalıtkan katman kaplandıktan sonra kapı elektrodu olarak Al yalıtkan katman üzerine termal

buharlaştırma ile 50nm kalınlıkta kaplanmıştır. Fakat jel PMMA'nın yalıtkan olarak kullanıldığı çalışmada Jel sürüldükten sonra üzerine ITO elektrot olarak kapatılmış ve sandviç şeklinde cihaz üretilmiştir.



Şekil 5.3: Jel yalıtkanı kullanılan cihazların şematik gösterimi. a) P3HT ve jel PMMA ile üretilen cihaz, b) P3HT ve ince film PMMA ile üretilen cihaz, c) PMMA jel ile üretilen MIS kapasitor, d) kullanılan kimyasalların şematik gösterimi.

5.6. Üretilen FOTOOFET lerin Elektro-Optik Karakterizasyonları

Deneylerde kullanılan ışık kaynağının gücü StellarNet sistemiyle karakterize edilmiştir. Üretilen OFET lerin karanlık ve aydınlık ortamdaki transfer ve out-put karakteristikleri Keithley 4200SCS yarı iletken karakterizasyon sistemi ile atmosfer koşullarında elde edilmiştir. Üretilen aktif katmanların UV-Vis absorbans grafikleri Scinco UV-Vis sistemi ile alınmıştır.

6. İLETKEN POLİMERLERİN İNTRİNSİK ÖZELLİKLERİNİN IŞIĞA DUYARLI ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLER ÜZERİNE ETKİLERİ

6.1. Giriş

Bu bölümde konjuge polimerlerin intrinsik özelliklerinin ışığa duyarlı organik alan etkili transistörlerin (FOTOOFET) elektro-optiksel özelliklerini etkileyebildiği gösterilmiştir. FOTOOFET' ler üç farklı molekül ağırlığına sahip poly[2-methoxy,5-(3',7'-dimethyl-octyloxy)]-p-phenylene vinylene (MDMO-PPV) polimeri kullanılarak üretilmişlerdir. Kanal akımının ve alan etkili mobilite değerinin polimerin molekül ağırlığı arttıkça arttığı gözlenmiştir. Transistörlerin ışıkla anahtarlama özellikleri ve elektro-optiksel karakteristikleri polimerin polidispersitesine (PDI) açıkça bağlı olduğu ortaya konmuştur.

Organik malzemeler ucuz ve kolay işlenebilir olmalarından ötürü optoelektronik cihaz uygulamaları için son yıllarda ciddi anlamda dikkat çekmektedirler. FOTOOFET' ler optik dönüştürücüler, ışığa duyarlı cihazlar ve görüntü sensörlerinde kullanılabilen önemli elektronik cihazlardır [29,30]. MDMO-PPV çok çalışılmış iyi bilinen bir polimer yarı iletken ve OLED [31,32], OFET [33,34] ve OPV [35,36] üretimlerinde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. PPV türevlerinin elektriksel ve elektro-optiksel performanslarının bu malzemelerin molekül ağırlıklarına ve intrinsik özelliklerine bağlı olduğu daha önceden birçok kez rapor edilmiştir [37,38].

FOTOOFET' ler OFET cihazlarda olduğu gibi kaynak, savak ve kapı olmak üzere üç terminale sahiptirler, OFET lerde savak ile kaynak arasında ki akım (I_{ds}) belli bir surce-darin potansiyeli (V_{ds}) altında kapıya uygulanan potansiyel (V_g) ile control edilebilir, benzer şekilde FOTOOFET' ler için ışığa duyarlı organik yarı iletkenlerin kullanımı ile ışıkla uyarılmış yük taşıyıcıların iletim kanalına eklenmesi ile kanal iletkenliği ışık şiddetine bağlı olarak artar [39]. FOTOOFET' lerde ışık altında iki etki gözlenir bunlardan ilki fotovoltajik etkidir diğeri ise fotoiletkenlik etkisidir. Işık altında, eşik voltajı (V_{th}) daha pozitif yada daha negatif voltaj değerlerine kayar.

Aktif katmanın p-tip bir organik yarı iletkenin kullanıldığı FOTOOFET' ler için ışık aktif katmanda soğrulduğu zaman ışıkla oluşmuş elektron boşlukları savak

elektroduna doğru giderler ve elektronlar kaynak elektrodu etrafında toplanırlar ve bu sayede organik yarı iletken ile kaynak elektrodu arasındaki enjeksiyon bariyeri azalmış olur. Işık altında oluşan düşük enjeksiyon bariyeri kontak direncinin azalması ile eşik voltajının (V_{th}) kaymasına ve I_{ds} nin artmasına sebep olur. eğer FOTOOFET kapalı durumdaysa I_{ds} nin ışık şiddetine göre artışı doğrusal olur buna fotoiletkenlik etkisi denir. FOTOOFET açık durumdaysa fotovoltajik etki sebebiyle I_{ds} nin ışık şiddetine göre artışı eksponansiyel olur [40-43].

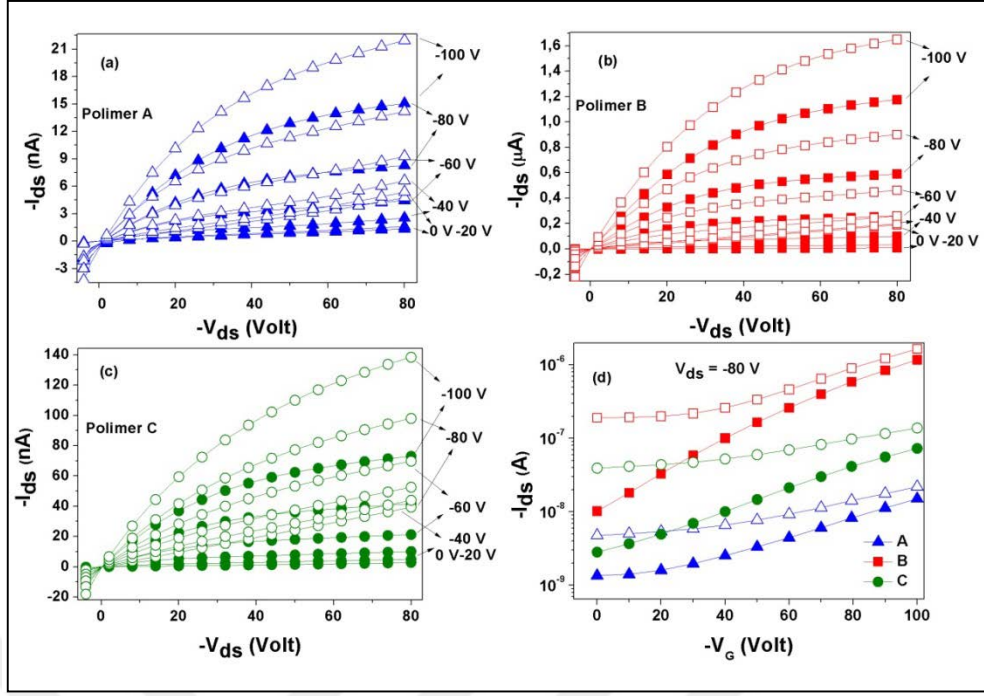
OFET' ler üzerine uzun yıllardır çalışmalar polimerik yarı iletkenlerden tutunda küçük moleküllere kadar geniş bir malzeme spektrumuyla devam etmektedir [23-26]. İdeal bir FOTOOFET için kullanılan aktif malzemenin hem yüksek mobilite değerine hemde yüksek ışık hassasiyetine sahip olmalıdır. küçük moleküller ve çözülebilen polimerik yarı iletkenlerin performansları karşılaştırıldığında küçük moleküllerin FOTOOFET üretimi için ciddi bir potansiye sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Fakat düşük maliyetli ve geniş alanlı optoelektronik cihaz üretimi için çözülebilen polimerik malzemelerin geliştirilmesi önem kazanmıştır. Polimer tabanlı FOTOOFET' ler ucuz maliyetli baskı yöntemleri ile esnek tabanlar üzerinde üretilebilirler. Polimerik yarı iletkenlerin bu umut vaat eden özellikleri düşük maliyetli, kolay üretilebilen ve geniş alanlı entegre devre üretimi için öncülük edebilir. FOTOOFET' ler üzerine yapılan yayınların bir çoğu organik yarı iletken malzeme, film kalınlıkları ve kontak etkileri üzerine yoğunlaşır [44]. FOTOOFET' lerin performansının yalnızca cihaz yapısına bağlı olmadığı daha önceki çalışmalarda gösterilmiştir [45]. Cihaz performansının yalnızca cihaz yapısı ve geometrisine bağlı olmadığı bunun yanında kullanılan polimerik malzemenin molekül ağırlığı ve polidispersivitesine de bağlı olduğu düşünülebilir.

Organik elektronik bünyesinde en çok araştırılan polimerlerden birde poly (p-phenylenevinylene)s (PPV) ve türevleridir. PPV çözülemeyen bir polimerdir fakat bazı yan gruplar PPV zincirine eklenecek çözülebilen yapıya kavuşabilir [46]. PPV nin çözülebilen formlarından biride poly [2-methoxy,5-(3',7'-dimethyloctyloxy)]-1,4-phenylene vinylene (MDMO-PPV) dir. MDMO-PPV kararlılığı, çözünürlüğü ve makul mobilite değeri ile p-tip organik elektronikte sıklıkla kullanılan bir polimerdir. Polimerlerin intrinsik özelliklerinin organik cihazların üzerine etkileri tam olarak anlaşılammış olsa bile molekül ağırlığı artışı ile cihaz performansının arttığı çalışmalar yapılmıştır [47,48]. Yüksek molekül ağırlığına sahip polimer daha uzun

polimer zincirine sahip demektir bu da yük transferinin daha kolay yapılmasını sağlar ve mobilite artışına sebep olur [49]. MDMO-PPV ile yapılan bazı çalışmalar molekül ağırlığının yanında polidispersiviteninde OFET performansına ciddi anlamda etki yaptığını ortaya koymuştur. [50]. Bu bölümde MDMO-PPV nin molekül ağırlığının ve polidispersivitesinin FOTOOFET performansı üzerine etkileri araştırılmıştır. Üç farklı molekül ağırlığında MDMO-PPV aktif katman olarak ve Poly(methyl methacrylate) (PMMA) dielektrik katmanı olarak kullanılmıştır. FOTOOFET' lerin Transfer ve output özellikleri ışık altında araştırılmıştır. Bunların yanında FOTOOFET' lerin fotoanahtarlama ve zamana bağlı anahtarlama özellikleride araştırılmıştır. polimerleri intrinsik özelliklerinin FOTOOFET' lerin elektriksel özelliklerine direk etki ettiği ortaya konmuştur. Bunun yanında Molekül ağırlığının ve PDI değerlerinin polimerin yük taşıma özelliğine direk etmesinden ötürü polimerlerin ışık algılama özellikleride bunlarla kontrol edilebileceği ortaya konmuştur.

6.2. Sonuçlar ve Değerlendirmeler

Farklı molekül ağırlıklarına sahip MDMO-PPV ler kullanılarak mobilite (μ), açma/kapama oranı (Ion/off), eşik voltajı (V_{th}), foto akımın karanlık akıma oranı ($P=I_{ph}/I_{dark}$) ve fotoresposiviti gibi temel cihaz özelliklerinin ortaya konması için üst kapı-alt kontak yapıda FOTOOFET' ler üretilmiştir. Şekil 6.1 bütün polimerler için karanlıkta ve $17mW/cm^2$ ışık altında farklı kapı voltajları için out-put karakteristiklerini vermektedir. Farklı molekül ağırlıklara sahip bütün polimerler ile üretilen cihazların hepsi karanlıkta doyuma gitmişlerdir. Fakat aydınlık ortamda doyum gözlenmemiştir (Şekil 6.2 (a),(b),(c)). Şekil 6.2 (d) kapı voltajına bağlı savak akımının değişimini karanlık ve aydınlık ortam için göstermektedir. Işıkla uyarılmış bir sürü yük organik yarı iletken katman ışığı soğurduğu zaman oluşur ve bu fazla yükler Ids akımında bir artışa sebep olur. Bu durum ışığın da aynı kaynak, savak ve kapı terminalleri gibi kanal içindeki yüklerin kontrolünde kullanılabileceğini gösterir.



Şekil 6.1: MDMO-PPV tabanlı FOTOOFET lerin Out-put karakteristikleri karanlık (içi dolu çizgiler) ve aydınlık (içi boş çizgiler, 17 mW/cm^2) koşullarda. a) Polymer A, b) Polymer B, c) Polymer C, d) V_g - I_{ds} garfiği bütün polimerler için karanlık ve aydınlık koşullarda.

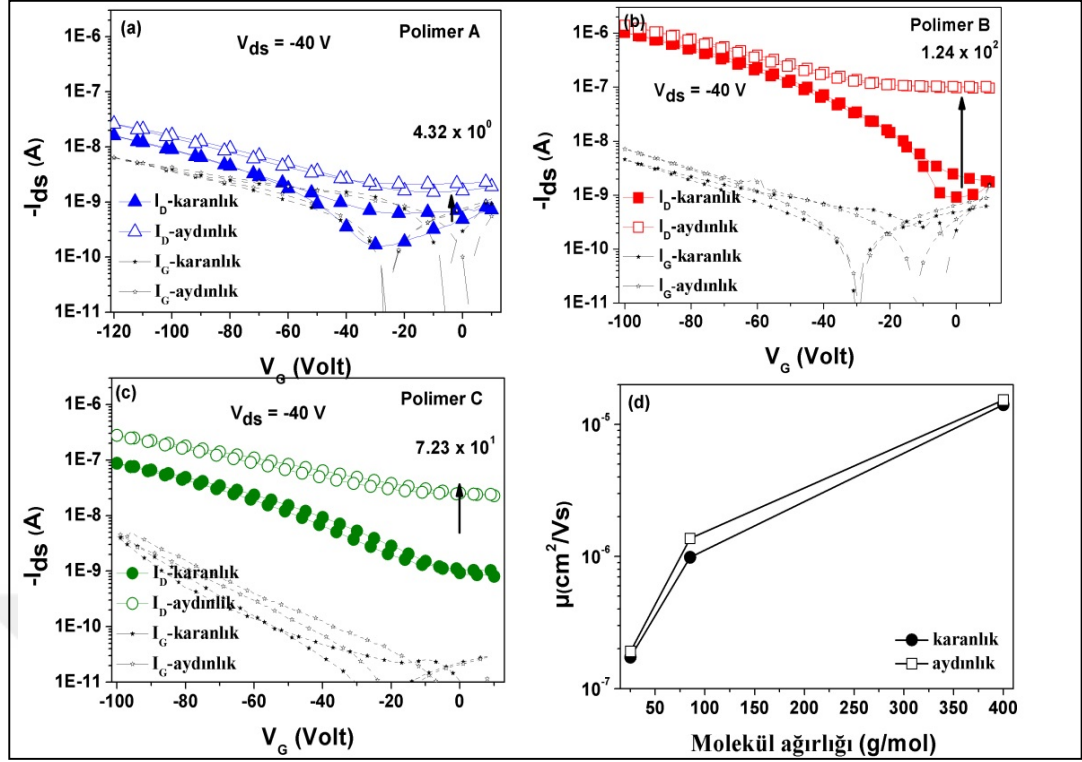
Bu çalışmada kullanılan polimer A, B ve C için molekül ağırlıkları ve polidispersivite değerleri ref [50]' ten alınmıştır. Tablo 1' de bu polimer A, B ve C ile üretilen FOTOOFET ler için mobilite değerleri, eşik voltajı değerleri, açma/kapama oranları, fotosensitivite (P) ve fotoresposivite (R) değerleri verilmiştir. Şekil 6.1 a), b) ve c) de transfer karakteristikleri ve FOTOOFET lerin -40 V savak voltajı altında ve 17 mW/cm^2 ışık gücü altında elde edilen kaçak akım değerleri verilmiştir. Kaçak akımların her üç polimer için de aynı hemen hemen aynı düzeyde olması dielektrik kalınlıklarının hepsi için hemen hemen aynı olduğunu gösterir. P değeri, en yüksek molekül ağırlığına (450000) ve ortalama PDI değerine sahip polimer B için 124 olarak hesaplanmıştır. Polimer A en düşük molekül ağırlığı (25000) ile en düşük performansa sahiptir. Polimer C için ise P değeri 72 olarak polimer A ve Polimer B nin ortasında çıkmıştır ve polimer C nin molekül ağırlığıda ortalama bir değerdir (85000). Şekil 6.1 (d)' de açıkça görüldüğü gibi P değeri molekül ağırlığına ve PDI değerine kuvvetlice bağlıdır.

Tablo 6.1: Polimer A, B ve C ile üretilen FOTOOFET ler için mobilite μ (cm²/Vs) (Doyum bölgesinden), Eşik voltajı V_{th} , Açma/Kapama oranı (I_{on}/I_{off}), R ve P değerleri ve kullanılan polimerlerin molekül ağırlıkları, PDI değerleri ve bant aralıkları.

Polymers	M_n (g/mol)	M_w (g/Mol)	PDI (M_n/M_w)	$E_{g, abs}$ (eV)
A	25,000	88,000	3,5	2,16
B	450,000	1,900,000	4,2	2,14
C	85,000	1,400,000	16,8	2,15

Polymers	μ (cm ² /V.s)	V_{th} (V)	$I_{on/off}$	R (mA/W)	P (I_{Ph}/I_{Dark})
A	1.73×10^{-7}	27	0.6×10^2	0.015	4.32×10^0
B	1.41×10^{-5}	4	1.1×10^3	0.12	1.24×10^2
C	9.86×10^{-7}	15	1.26×10^2	0.054	7.23×10^1

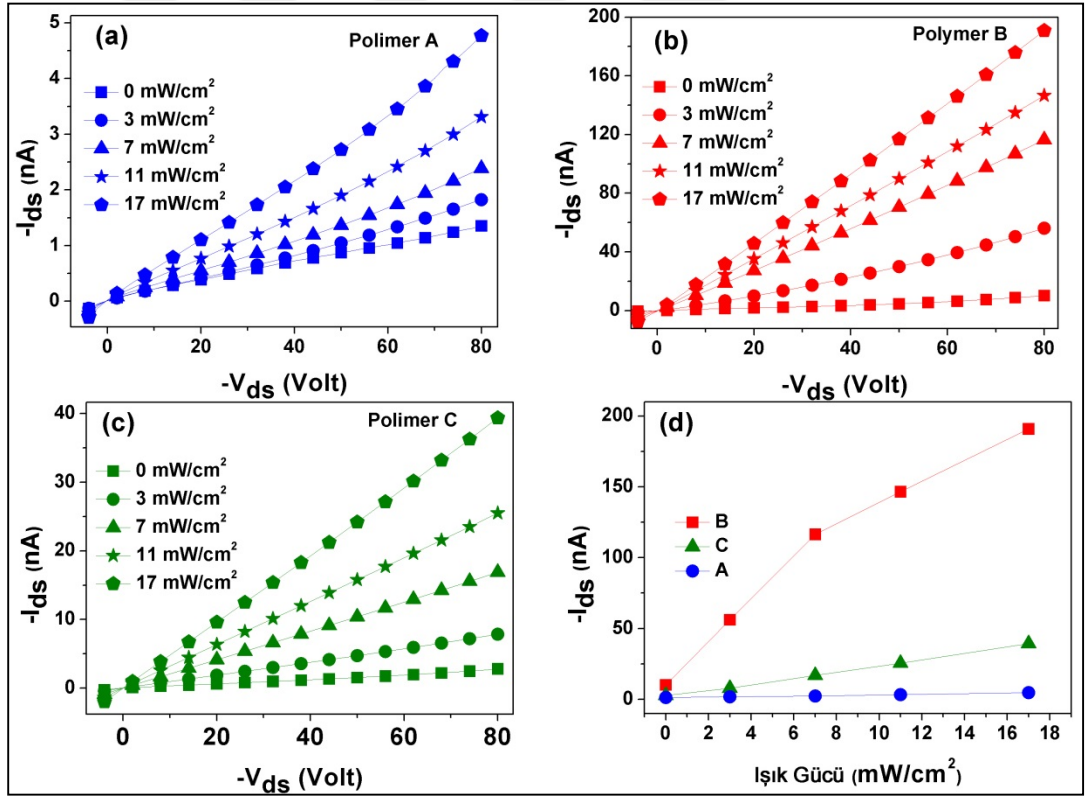
Tarama yönünün değiştirilmesi ile transfer transistörlerin transfer eğrisinde bir histerisis ve eşik voltajında daha yüksek voltajlara kayma gözlenmektedir (Şekil 6.1). Eşik voltajının kayması dielektrik-yarıiletken arayüzünde oluşan yük katmanının sebep olduğu built-in elektrik alanına dayandırılır [51]. Bu yüzden eşik voltajının kayması ve histerisis gözlenmesi yük taşıyıcı yoğunluğuna, tuzak yoğunluğuna, kontak malzemelerinin fermi seviyelerine, uygulanan voltaj gerilimine ve ışık yoğunluğuna bağlı olabilir.



Şekil 6.2: MDMO-PPV tabanlı Au IDT elektrot üzerine inşa edilmiş FOTOOFET ler için transfer karakteristikleri ve kaçak akım değerleri, karanlık (içi dolu noktalar) ve aydınlık (içi boş noktalar) koşullarda. a) Polimer A, b) Polimer B, c) Polimer C, d) molekül ağırlığına bağlı mobilite değişimi (aydınlık ve karanlık koşullarda).

Tablo 6.1 den açıkça görüldüğü gibi aktif katman olarak kullanılan polimerlerin molekül ağırlıkları OFET parametreleri üzerinde çok etkilidir. Polimer B bir polimer yarı iletken olarak neredeyse ideal intrisik özelliklere (yüksek molekül ağırlığı ve düşük PDI değeri) sahiptir bu yüzden yüksek kanal akımı yüksek açma/kapama oranı ve düşük V_{th} değeri ile en iyi performansa sahiptir. Polimer A, B ve C nin performansları karşılaştırıldığında en yüksek mobilite ($\mu_{sat} = 1.41 \times 10^{-5}$ cm²/Vs), en yüksek açma/kapama oranı (1.1×10^3) ve en düşük V_{th} değeri (4 V) polimer B ye aittir. Polimer A ise en düşük mobilite ($\mu_{sat} = 1.73 \times 10^{-7}$ cm²/Vs), açma/kapama oranı (0.6×10^2) ve en yüksek V_{th} değerine (27 V) sahiptir. Bu çalışmada ayrıca PDI değerinin azalmasının foto transistör parametrelerine olumlu katkı sağladığı gözlenmiştir. Şekil 6.2 Polimer A, B ve C ile üretilen FOTOOFET' lerin transfer karakteristiklerini aydınlık ve karanlık ortam için vermektedir bunun yanında her üç polimer içinde P değerleri verilmektedir. MDMO:PPV polimerinin P değeri üzerine molekül ağırlığı ve PDI değerinin etkisi oldukça fazladır.

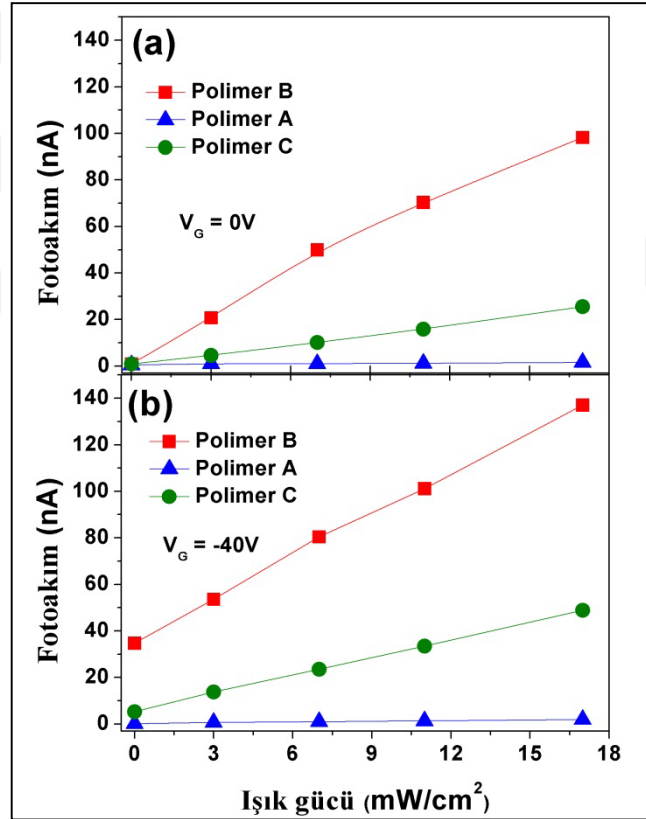
Polimer B en yüksek molekül ağırlığı ve ortalama PDI değeri ile en yüksek P değerine ($1,24 \times 10^2$), polimer A ise en düşük molekül ağırlığı ve en düşük PDI değeri ile en düşük P değerine (4,32) sahiptir. Polimer C ise ortalama molekül ağırlığı ve PDI değeri ile ortalama P değerine ($7,23 \times 10^1$) sahiptir. Karanlık ve aydınlık akım arasındaki fark düşük kapı voltajında en yüksek değerini alırken kapı voltajı arttıkça azalmaktadır. bunun sebebi I_{ds} düşük kapı voltajında ışık ile kontrol edilirken, bütün tuzak seviyelerinin kapı voltajı ile doldurulmasından sebep yüksek kapı voltajında kapı voltajı değeri ile kontrol edilir. Uzun polimer zincirleri daha fazla foton soğurulmasına sebep olur ve yüksek foto akım sağlar. Benzeri şekilde düşük PDI değeri daha iyi zincir konformasyonu sağlayarak daha az tuzak seviyesi oluşturur. Polimer B nin en yüksek P değerine sahip olması bu şekilde açıklanabilir ve Polimer B nin opto-elektronik cihazlarda kullanılan transistör üretiminde potansiyel uygulama bulabileceği söylenebilir.



Şekil 6.3: Transistörlerin a)Polimer A, b)Polimer B, c)Polimer C $V_g = 0$ koşulunda d) değişik ışık şiddeti altında out-put karakteristikleri.

Şekil 6.3 polimerlerin farklı ışık şiddetleri altında kapı potansiyel uygulanmadan elde edilen foto-anahtarlama davranışları verilmektedir.

Transistörler uygulanan ışık kontrol edilmiş ve out-put karakteristikleri birbirleriyle neredeyse yakın çıkmıştır (Şekil 6.3 a), b) ve c)). Karanlık koşullarda bütün cihazlar nanoamper mertebesinde I_{ds} akımı göstermiştir. Şekil 6.3 ten açıkça görüldüğü gibi I_{ds} akımı uygulanan ışık ile şiddeti değiştirilerek kontrol edilmiştir ve out-put karakteristikleri beklenen akım değerlerinde çıkmıştır. akım değerlerinin molekül ağırlığı ile değiştiği açıkça görülmektedir. Bu sonuçlar ışığın kapı voltajı yerine transistoru kontrol etmek için kullanılabileceğini göstermektedir. Şekil 6.3 d) aydınlatma şiddetinin gücüne bağlı I_{ds} değişimin vermektedir ($V_{ds}=-80$ V). Polimer B en yüksek molekül ağırlığı ve ortalama PDI değeri ile ışık altında mükemmel out-put karakteristiği sergilemiştir. Bu sonuçlar aynı zamanda Şekil 6.4 te farklı kapı voltajları ile desteklenmiştir.

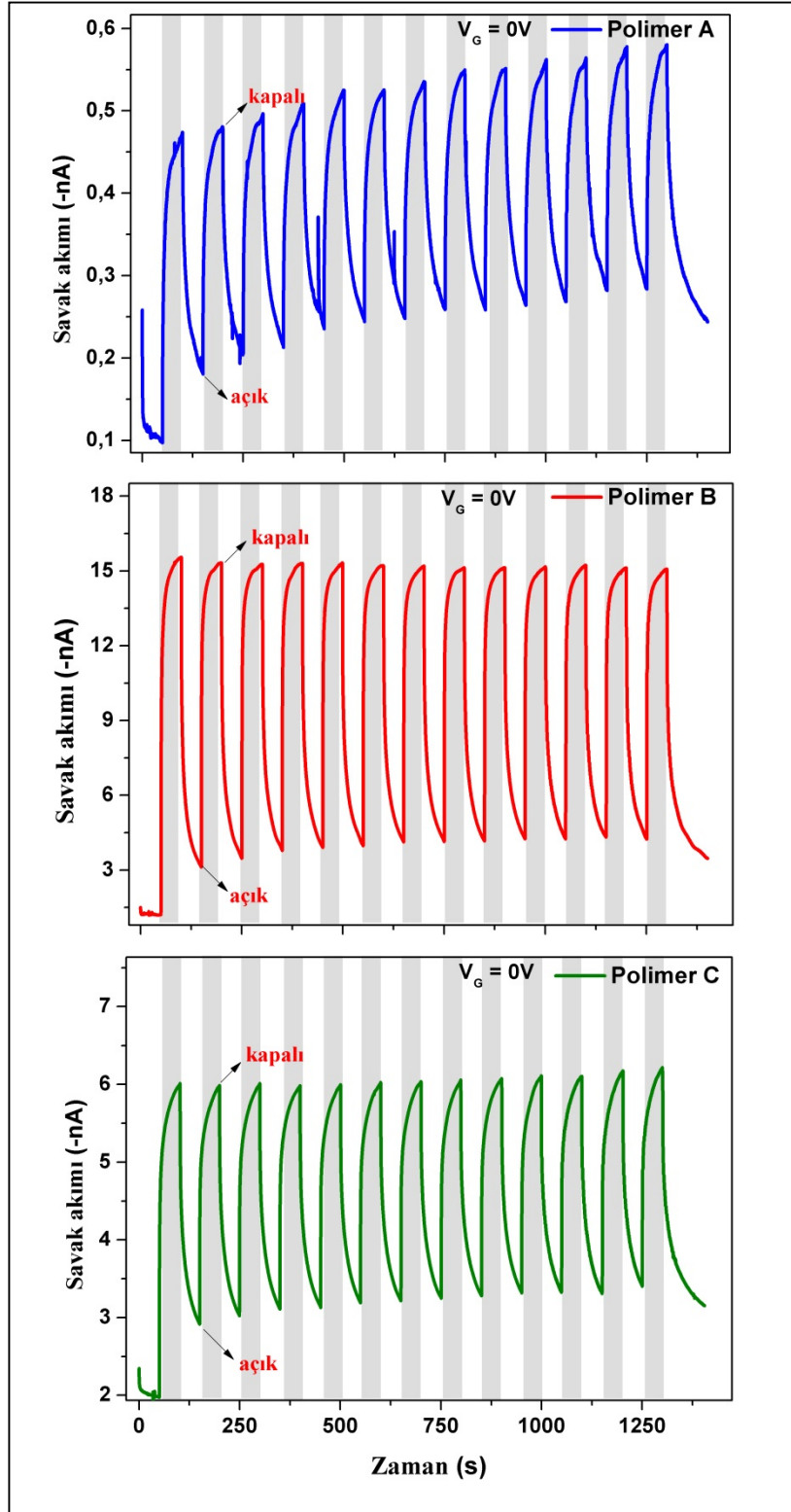


Şekil 6.4: Foto akımın ışık şiddetine bağlı garfiği a) $V_g = 0$ V, b) $V_g = -40$ V.

Şekil 6.5 her üç polimer içinde foto anahtarlama özelliklerini $V_g = 0$ V koşullarında vermektir. Kapı voltajı olamadan, cihazlar ışık kaynağının açık ve kapalı olması ile anahtarlanarak kontrol edilebilir.

Cihazların karanlık akımlarının nanoamper mertebesinde olduğu gözlenmektedir çünkü transistörler kapalı durumdadır ($V_g = 0$ V) (Şekil 6.5 a), b) ve c)). Şekil 6.5 ten de anlaşılabacağı gibi I_{ds} akımındaki artış ışıkla uyarılmış yük taşıyıcı sayısının artışı ile gerçekleşir. Işıklı uyarılmış I_{ds} 1.5 nA den 15 nA değerine ışığın açılması ile aniden fırlar ve 3nA civarına ışığın kapanması ile geri döner (Polimer B). Polimer A en düşük performansı sergilerken Polimer C Polimer B ile neredeyse aynı performansı daha düşük akım düzeyinde sergiler.

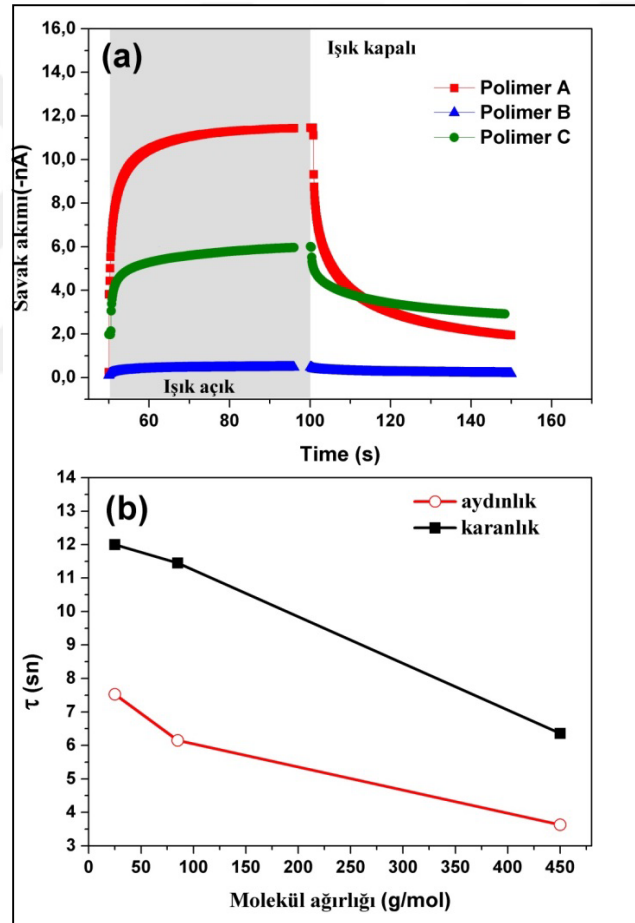




Şekil 6.5: MDMO-PPV fototransistörlerin a)Polimer A, b)Polimer B, c)Polimer C, 17 mW/cm^2 ışık gücü altında anahtarlama özellikleri.

Bütün bunların yanında FOTOOFET' ler için zamana bağlı tepki ölçümleride bu çalışmada yapılmıştır (Şekil 6.6).

Tepki tek bir tepki süresi ile tanımlanabilir (Kohlrausch's law) ve akım artışı ve azalması ekponansiyel davranış baz alınarak fit edilebilir [52]. Işık açıldığı zaman akım tepki süresi sabitleri 7.53, 3.63 ve 6.15 sn olarak sırasıyla polimer A, B ve C için hesaplanmıştır. ışık kapandığı zaman akımın releksasyon zaman sabitleri 12.6, 6.36 ve 11.45 gibi daha uzun zamanlar olarak sırasıyla tespit edilmiştir. relaksasyon zamanı ışıkla oluşan yüklerin rekombinasyonu ile alakalı olduğu için intrinsik özelliklerinin iyileştirilmesi ile geliştirilerek daha hızlı tepki sürelerine ulaşılabilir. Şekil 6.6 b) zaman sabitinin molekül ağırlığına bağımlılığını vermektedir. Polimer B en iyi intrinsik özelliğe sahip olmasından ötürü zaman sabitleri diğer polimer içinde en düşük çıkmıştır.



Şekil 6.6: a) Zaman bağı anahtarlama özelliği, b) MDMO-PPV polimerleri için zaman sabitleri (τ).

Sonuç olarak bu çalışmada farklı molekül ağırlığına ve PDI değerine sahip MDMO:PPV polimerlerinin FOTOOFET özellikleri incelenmiştir.

MDMO:PPV tabanlı FOTOOFET'lerin elektro-optiksel karakteriztikleri ve parametreleri molekül ağırlığına PDI değerine kuvvetlice bağlı olduğu gösterilmiştir. Yüksek molekül ağırlığı yüksek soğurma sağladığı için kanal akımı ve P ve R değerlerinde artış sağlar. Diğer taraftan yüksek PDI değeri çok fazla tuzak oluşumuna neden olduğu için P ve R değerlerini olumsuz etkiler. Bu sonuçlar ışık soğrulması, yük taşınımı, ve yük tuzaklanması/ayırışması bakımından açıklanır. Yüksek molekül ağırlığı ve düşük PDI değerinin daha verimli olduğu bu bakımdan ortaya konabilir. Algılama için molekül ağırlığı ve PDI değerinin ayarlanması FOTOOFET ler için daha geniş uygulama fırsatlarının yakalanmasını sağlayabilir.



7. MOLEKÜLER KATKILAMA ve POLİMER-JEL DİELEKTRİK KULLANIMI İLE DÜŞÜK OPERASYON VOLTAJINA ve YÜKSEK MOBİLİTE DEĞERİNE SAHİP OFET ÜRETİMİ

7.1. Giriş

Bu bölümde çözültide hazırlanabilen organik alan etkili transistörlerin (OFET) jel dielektrik malzeme kullanarak ve aktif katmanı moleküler anlamda katkılayarak performanslarının artırılmasına yönelik yeni bir yöntem ortaya konmuştur. Performans artışını ortaya koyabilmek için yalıtkan katman olarak Poly (methylnmethacrylate) (PMMA) ve aktif katman olarak Poly (3-hexylthiophene-2,5-diyl) (P3HT) nin kullanıldığı OFET cihazı üretilmiştir. Jel formunda PMMA dielektrik malzemesi üretmek için Propilen carbonate (PC) PMMA zincirleri arasında girtilir ve bu jel yapı OFET sisteminde dielektrik katman olarak kullanılmıştır. Jel dielektrik kullanımı ile mobilite değeri 5.72×10^{-3} değerinden $0.26 \text{ cm}^2 \text{ V.s}^{-1}$ değerine düşmüş ve çalışma potansiyelide -40 V civarından -0.8 V civarına düşmüştür. Daha sonra iyi bir moleküler katkılama malzemesi olan 2,3,5,6-tetrafluoro-7,7,8,8-tetracyanoquinodimethane (F4-TCNQ) P3HT içine katkılanarak mobilite değeri $1.1 \text{ cm}^2 \text{ V.s}^{-1}$ değerine yükseltilmiştir. Performans artışı, jelin yüksek dielektrik özellikleri sayesinde daha iyi yük indüklenmesi ve moleküler katkılama ile aktif katman içindeki yük yoğunluğunun artırılması ile tuzak seviyelerinin doldurulmasına bağlanmıştır.

OFET' ler organik aktif matriks ekranlar, robotik, akıllı kartlar, radyo frekansı tanımlayıcı etiketler, elektronik kağıtlar, sensörler gibi bir çok uygulama alanında mekanik esneklikleri, hafiflikleri, transparan olmaları ve ucuz olmaları gibi eşsiz özelliklerinden dolayı kullanılmaktadırlar [53-56]. OFET' lerin performanslarının anorganiklere performanslarının yetersiz kalmasından dolayı ana eğilim bu cihazların elektriksel özelliklerinin iyileştirilmesine yöneliktir. Son zamanlarda OFET' ler farklı cihaz yapılarının ve daha iyi özelliklere sahip malzemelerin geliştirilmesi ile umut vaat etmektedir [57,58]. P3HT yüksek mobilite değeri, ince filmi yapıldığında kendi kendine organize olma eğilimi ve görünür bölgede yüksek absorpsiyon katsayısına sahiptir.

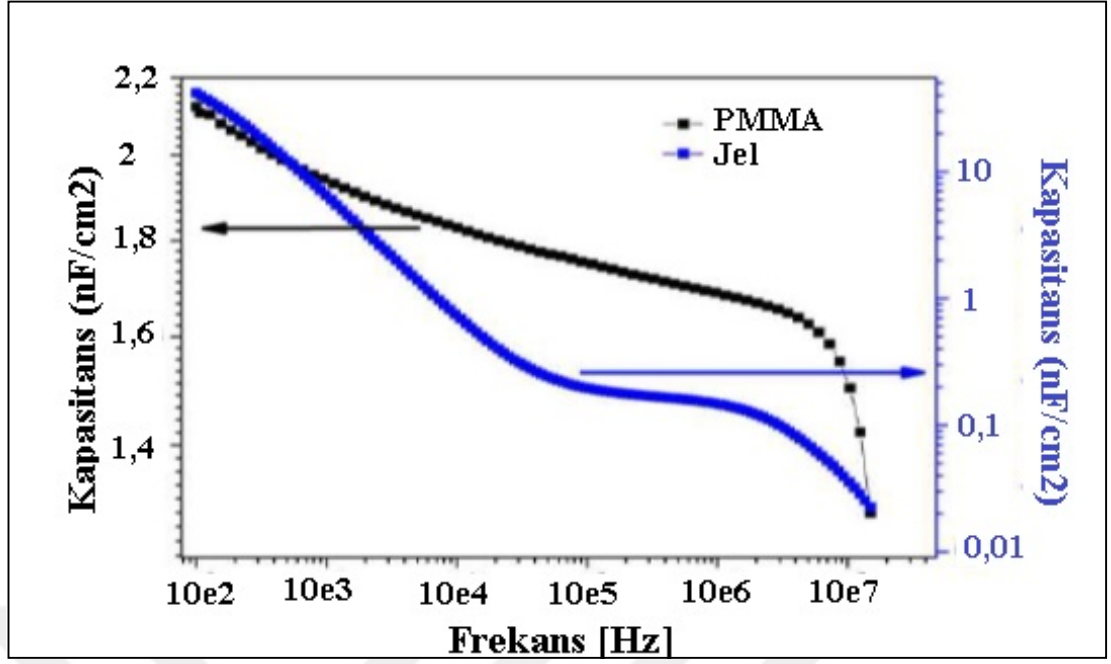
Bu sebeplerden dolayı OFET lerde sıklıkla kullanılan bir organik yarı iletken malzemedir. P3HT temelli OFET lerin yüksek kaynama noktasına sahip çözücü kullanımı, çeşitli ısıl işlemler ve kapı elektrot yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi ile düşük operasyon voltajında (-6 V) düşük eşik voltajı ile (-1.1 V) çalışabildiği daha önceki çalışmalarda gösterilmiştir [59-60].

Konjuge yarı iletken polimerlerin moleküler anlamda katılanabildiği bazı çalışmalarda gösterilmiştir. P-tip iletkenlik sergileyen P3HT literatürde elektron akseptör olarak sıklıkla kullanılan F4-TCNQ katkılama malzemesi ile katılanmıştır [61,62]. Bazı araştırma grupları düşük konsantasyonlarda F4-TCNQ katkısının P3HT nin elektriksel özelliklerini iyileştirdiğini göstermişlerdir [63,64]. Uygun enerji seviyelerine sahip katkılama molekülleri güçlü bir elektron akseptör olan F4-TCNQ' nün en düşük moleküler boş orbital seviyesinden (LUMO) P3HT nin en yüksek dolu moleküler orbital seviyesine (HOMO) elektron transfer edebilir [65]. Bu da kararlı yük transfer komplekslerinin oluşumuna sebep olur ve aktif yarı iletkenin fermi seviyesinin HOMO seviyesine doğru kademeli olarak kaymasına sebep olur. P-tip katkılama elektron boşluğu iletkenliğini artırır ve elektrotlar arasındaki potansiyel bariyerinin azalmasına sebep olur [66-69]. Kapı yalıtkanı malzemesi sadece OFET in performansı için değil aynı zamanda cihazın kararlılığı içinde çok kritik öneme sahiptir. OFET cihazları düşük operasyon voltajlarına, yüksek mobilite değerlerine ve yüksek açma/kapama oranlarına sahip olmalıdırlar. Yüksek kapasitif özelliklere sahip kapı yalıtkanı aktif katman içinde daha fazla yük toplanmasına sebep olur. Böylece OFET ler düşük operasyon voltajlarında daha yüksek performans sergiler. PMMA düşük dielektrik sabitine sahip, pürüzsüz ve hidrofobik bir yüzeye sahip iyi bilinen bir polimerik dielektrik malzemedir [70,71]. Ukah ve çalışma arkadaşları dielektirik malzemenin hazırlandığı çözücü cihaz performansını oldukça etkilediğini göstermişlerdir ve bunun çözücünün dipol momentiyile alakalı olduğunu ortaya koymuşlardır. Propilen karbonat (PC) içininde çözülmüş PMMA yalıtkanı kullanılarak hazırlanan OFET cihazları için kararlı ve düşük operasyon voltajı (-3 V) elde etmişlerdir. PC yüksek dipol momentine (20°C de 4.9 D), yüksek dielektrik sabitine (25°C de 64.42), düşük donma noktasına (-49°C) ve yüksek kaynama noktasına (241°C) sahip bir çözücüdür [71,72]. PC bunların yanında jel hazırlanması için plastikleştirici olarakta kullanılmaktadır [73].

PC maddesi PMMA zincirleri arasına yerleşerek zincirleri birbirinden ayırır ve birbirleriyle etkileşimini engelleyerek malzemenin daha esnek olmasını sağlar. Yüksek kapasite değeri ($\sim 10 \mu\text{F}/\text{cm}^2$) elde etmek için elektrolit kullanımı oldukça yaygındır ve bu sayede iyon-jel kapı dielektrik katmanı oluşturularak OFET lerde kullanılır [74-76]. Yüksek performanslı ve düşük operasyon voltajına sahip (2 V) OFET' ler polielektrotlerin iyon-jel dielektrik olarak kullanımıyla üretilmişlerdir [77,78]. Fakat elektrolit tabanlı OFET ler iyon içeriklerinden ötürü kararlı yapıya sahip değildirler. Bu çalışmada operasyon voltajını ve mobilite değerini geliştirmek için iki basit yöntem önerdik. Bunlardan ilki; iyonik olmayan bir jel dielektrik malzeme kullanarak aktif katmanda daha fazla yük indüklenmesi sağlanamaması, ikincisi ise; aktif yarı iletkenin elektron akseptor bir malzeme ile katkılanmasıdır. Kontrol cihazı olarak dielektrik katman olarak PMMA ve aktif katman olarak P3HT' nin kullanıldığı cihaz üretilmiş ve ortalama bir performans elde edilmiştir. Yalıtkan katmanda PC ve aktif katmanda F4-TCNQ kullanımı ile üstün bir performans elde edilmiştir.

7.2. Sonuçlar ve Değerlendirmeler

Jel dielektrik katman kullanımı ve aktif katmanın moleküler kullanılması olarak operasyon voltajını ve mobilite değerini geliştirmek için iki yaklaşım ortaya konmuştur. PMMA ince filminin ve jel dielektrik katmanın kapasitif özellikleri Şekil 7.1 de verilmiştir. Jelin ve PMMA nın kapasitesi Şekil 7.1 den 100Hz frekans değerinde sırasıyla $43\text{nF}/\text{cm}^2$ ve $3.9\text{nF}/\text{cm}^2$ olarak ölçülmüştür. PMMA nın kapasitif özelliklerinin içine PC eklenmesiyle açıkça değiştiği şekil 7.1 den görülmektedir. PC yüksek dielektrik sabitine sahip ve protonsız bir plastikleştirici malzemedir ve güçlü dipol-dipol etkileşimiyle normal bir polar sıvı gibi davranır [79]. Bu malzeme PMMA zincirleri arasına girerek uçtan-uca mesafenin karekök ortalama değeriyle alakalı olarak jel özelliği kazandırır ve böylece PMMA çok üstün dielektrik özellikler kazanır [80]. Uçtan-uca mesafenin karekök ortalaması dipol momentin artışıyla artar bu genellikle çözücü ve polimer arasındaki kuvvetlerin etkileşiminin iyileştirilmesi ile alakalıdır. Jel dielektriğin kapasite değeri frekans artışıyla beklendiği gibi düşmektedir çünkü PC nin polarizasyonu polimer zincirleri arasında kısıtlanır. Böylece toplam polarizasyon tepki süresi yüksek frekanslarda kısıtlanır.

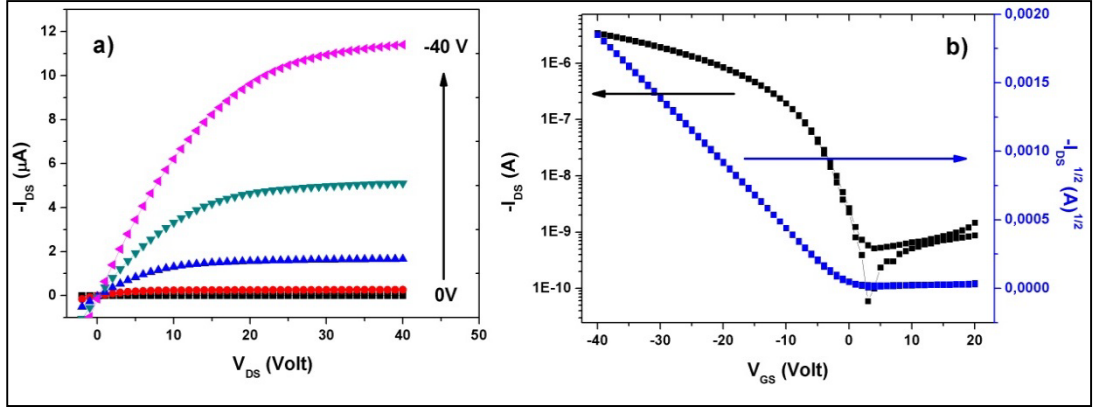


Şekil 7.1: Jel dielektrik malzemesi ve PMMA ince filminin farklı frekans değerleri altında kapasitif özellikleri.

Jel dielektrik ve moleküler doplamanın OFET performansı üzerine etkisini görebilmek için katkısız P3HT ve incefilm PMMA'nın kullanıldığı bir OFET cihazı üretilmiş ve karakterize edilmiştir. Şekil 7.2 bu OFET cihazının transfer ve out-put karakteristiklerini vermektedir. Bu cihazın transistor parametreleri tablo 2 de verilmiştir. Mobilite değeri doyum bölgesinden denklem 1 kullanılarak hesaplanmıştır.

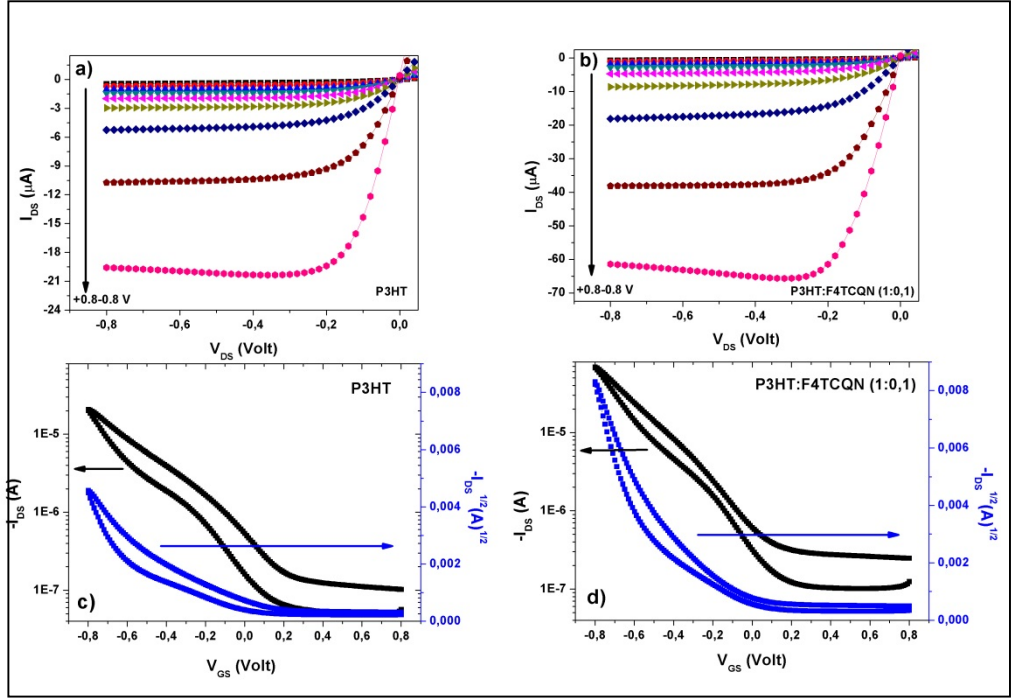
$$\mu_{sat} = \frac{2L}{WC_i} \left(\frac{\partial(I_{ds,sat})^{1/2}}{\partial V_{gs}} \right)^2 \quad (7.1)$$

Burada L ve W sırasıyla kanal uzunluğu ve genişliğidir, C_i dielektrik katmanın etkietkin kapasitesidir. PMMA tabanlı OFET cihazı -40 V operasyon voltajı, 1,5x10³ açma/kapama oranı ve -2 V eşik voltajı değeri sergilemiştir. Transfer karakteristiği +10V ile -40 V arasında alınmış ve mobilite değeri 5,72x10⁻³ cm²V⁻¹s⁻¹ olarak hesaplanmış ve önceki çalışmalarla kıyaslanmıştır [81]. OFET performansını arttırmak için PMMA jel formuna döndürülmüş ve P3HT ise F4-TCNQ ile moleküler anlamda katkılanmıştır.



Şekil 7.2: PMMA dielektrik katmanı saf P3HT nin kullanıldığı OFET cihazının a) out-put b)transfer karakteristikleri.

Şekil 7.3 (a) ve (b) dielektrik olarak PMMA jelin ve katkısız P3HT nin kullanıldığı cihazın out-put ve transfer karakteristiklerini vermektedir. Jel dielektrik katmanın performansa etkisi oldukça açıkça görülmektedir. Jel dielektrik mobilite değerini neredeyse 100 kat arttırmaktadır ve operasyon voltajını -0.8 V değerine çekmektedir. Dielektrik olarak jel yalıtkanın kullanıldığı OFET cihazı mükemmel V_{th} değeri göstermiştir, V_{th} değeri kanal akımının akışının başladığı voltaj ile alakalıdır ($V_{gs} > V_{th}$) ve OFET bu noktada çalışmaya başlar [82]. V_{th} değerinin yük taşıyıcı yoğunluğuna, kontak malzemelerinin fermi seviyelerine potansiyel gerilimine ve ışık uygulanmasına bağlı olduğu daha önceden ortaya konmuştur [83]. Bunların yanında farklı dielektrik/polimer arayüzleri ve yarı iletken morfolojisinin tuzak oluşumuna etki sağlayarak V_{th} değerinin değişimini sağladığıda gösterilmiştir [84-87].



Şekil 7.3: Jel dielektrik ve P3HT aktif katmanı ile üretilen a) OFET lerin out-put karakteristikleri b) OFET lerin transfer karakteristikleri ve jel dielektrik ve F4-TCNQ katkı P3HT ile üretilen cihazların c) out-put d) transfer karakteristikleri.

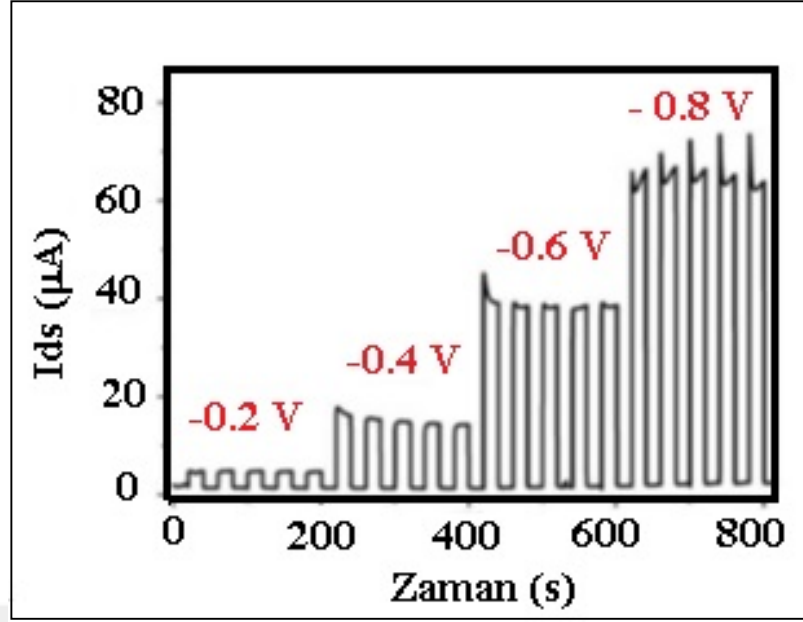
Şekil 7.3 a) ve b)) dielektrik olarak jel PMMA nın ve F4-TCNQ katkı P3HT aktif katman olarak kullanıldığı OFET cihazının output karakteristiğini, c) ve d) dielektrik olarak jel PMMA nın ve F4-TCNQ katkı P3HT aktif katman olarak kullanıldığı OFET cihazının transfer karakteristiğini vermektedir. Moleküler katkıyla tuzak seviyeleri doldurularak omik kayıpların ve seri direncin azalması sağlanır ve cihaz performansında iyileşme olur [88]. F4-TCNQ maddesinin polimere ortak çözültite çözülerek katılanamsı ile yapılan bir çok çalışmada sadece iletkenliğin değil mobilitenin ciddi anlamda arttığı gösterilmiştir [89-91]. Katkı P3HT ve jel dielektrik ile hazırlana cihazın çok iyi doyum gösterdiği mobilite değerinin $1.1 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ değerine yükseldiği gözlenmiştir. Mobilite değerindeki bu artış yük taşıyıcı konsantrasyonunun artışıyla alakalı olabilir. Tablo 1 mobilite, V_{th} , açma/kapama oranı ve operasyon voltajı değerlerini PMMA-P3HT, Jel-P3HT ve Jel-P3HT:F4-TCNQ sistemleri için vermektedir. Bu yüksek performans değeri elektrolit dielektrik ve kendiliğinden oluşan katmanlar için gösterilmiştir [92-95]. Alan ile indüklenmiş organik yarı iletkenlerdeki yük taşıyıcı mobilitesinin taşıyıcı yoğunluğuna kuvvetlicebağlı olmasının iyi bilindiği gibi yüksek yük taşıyıcı mobilitesi kanaldaki yüksek yük yoğunluğundan oluşabilir [96].

Yüksek yük yoğunluğu tuzak seviyelerinin azalması ve tuzaklanmış yüklerden kaynaklanan kapı dielektrik malzemesi civarında elektrostatik potansiyel çeşitliliğinin genel olarak düzenlenmesi ve bu alan etkilerinin kombine edilmesi yüksek taşıyıcı mobilitesine sebep olur. V_{th} değeri dielektrik malzemenin kapasitesinden, kontak malzemelerinden ve arayüz tuzak seviyelerinden etkilenir. Bu çalışmada altın kontak malzemesi olarak bütün OFET cihazlarda kullanılmıştır bu sebeple herhangi bir kontak etkisi gözlenmemiştir. Fakat dielektrik katmanın kapasite değeri elde edilen daha iyi performansa atıf edilebilir. Bütün bunların yanında F4-TCNQ kullanıldığında V_{th} değerinde çok küçük bir kayma meydana gelir (Tablo7. 1).

Tablo 7.1: Üretilen cihazların OFET parametrelerinin özeti.

	V(Operatıon voltage)	I_{on/off}	V_{th}(V)	μ(cm² V.s⁻¹)
P3HT/PMMA	-60	1.5x10²	-5V	5.72x10⁻³
P3HT/GEL	-0.8	4x10²	-0.1V	0.26
P3HT:F4TCNQ/GEL	-0.8	8x10²	-0.09V	1.1

Moleküler katkılama arayüz tuzaklarını azaltarak yük taşıyıcıları için daha iyi yollar oluşmasını sağlar. Dielektrik katmanın V_{th} değerini operasyon voltajını açıkça etkilediği görülmektedir. Ukah ve çalışma arkadaşları PMMA yı PC içinde çözüp döndürerek kaplama ile Al kaplı cam üzerine kaplamışlar ve 100 °C de 1 saat tavlamışlardır. Dielektrik katmanın hazırlanmasında çözücü seçiminin hayati öneme sahip olduğunu ortaya koymuşlardır [97]. Bu çalışmada ise PC buharlaştırılmayarak dielektrik katman içinde ek bir dielektrik kaynak olarak kullanılmıştır. Böylece toplam dielektriğin PC kullanımı ile 100 Hz de 3 nF/cm² den 50nF/cm² ye yükseldiği gözlenmiştir.



Şekil 7.4: Jel dielektrik ve F4-TCNQ katkılı P3HT ile üretilen OFET lerin zamana bağlı ölçümleri.

Şekil 7.4 zaman bağlı Ids değişimini vermektedir. Vds -0.5 V ta sabit tutularak Vgs -0.2 V tan -0.8 V a kadar 0.2 V adımlarla değiştirilmiştir ve her adım için 20 sn beklenmiştir. Bu ölçümler sadece en yüksek performans sergileyen P3HT:F4-TCNQ / Jel tabanlı cihaz için atmosfer koşullarda alınmıştır. Şekil 7.4 ten açıkça görülmektedir ki ölçülen cihaz voltaj gerilimi altında kararlılığını korumuş ve bütün kapı voltajlarına hızlı tepki vermiştir. Düşük kapı voltajlarında Ids her anahtarlamada neredeyse sabit kalırken -0.6 V ve -0.8 V kapı voltajlarında akımda anlık artış gözlenmiştir. Kapı voltajı arttığı zaman yük taşıyıcıları aniden yarı iletkene nüfus eder. Bu yüzden cihazın kanal akımı ani artış gösterir. Ids değeri çok kısa bir sürede normal seviyesine geri dönerken bu şekilde kalır [98].

Sonuç olarak; OFET lerin mobilite ve operasyon voltajı değerini geliştirmek için jel kapı yalıtkanı ve aktif katmanın moleküler katkılanması birlikte aynı OFET sisteminde uygulanmış ve ciddi performans artışı sağlanmıştır. İlk olarak PMMA yalıtkan polimeri PC kullanılarak jel formuna sokulmuş ve dielektrik özellikleri geliştirilmiştir. Jel dielektrik kullanımı ile kararlı, düşük operasyon voltajına (-0.8 V), düşük V_{th} (0.1 V) değerine ve yüksek mobilite ($0.26 \text{ cm}^2\text{V}^{-1} \text{ s}^{-1}$) değerine sahip OFET elde edilmiştir. İkinci olarak moleküler katkılama ile aktif katmanın özellikleri iyileştirilmiş bunun için F4-TCNQ katkı malzemesi kullanılmıştır ve mobilite değeri $1.1 \text{ cm}^2\text{V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ değerine çıkmıştır.

Bu sonuçlar OFET performansını arttırmak için jel dielektrik kullanımı ve moleküler doplamanın kolay ve kullanışlı yöntemler olduğunu ortaya koymuştur.



8. TANDEM YAPI KULLANILARAK IŞIĞA DUYARLI ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİTORLERİN PERFORMANSLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ

8.1. Giriş

Işığa duyarlı organic alan etkili transistörler (FOTOOFET) ve fotodiyotlar esneklikleri, işleme kolaylıkları ve geniş alanlara rahat uygulanabilmeleri gibi ilgi çekici avantajlarından ötürü oldukça yoğun bir şekilde araştırmaktadırlar. FOTOOFET ler bir çeşit üç terminalli opto-elektronik cihazlardır ve ışık bu cihazlarda harici bir terminal gibi kapı voltajı ile indüklenen yüklere ek olarak yük oluşumu sağlayarak kanaldaki yük taşıyıcılarının kontrolünü sağlar [28].

FOTOOFET' ler fotodiyotlar ile karşılaştırıldığında düşük gürültü seviyesine sahip olmalarının yanında daha yüksek fotosensitivite (P) ve responsivite (R) değerlerine sahip olmalarından dolayı daha geniş uygulama alanı bulmaktadırlar. FOTOOFET lerde foto akım hem kapı voltajı hemde ışık şiddeti ile kontrol edilebilir. Bu sayede FOTOOFET ler çok düşük ışık şiddetlerini dedekte edebilir ve üstüne üstlük ışığın algılanması ve sinyalin yükseltilmesinin tek bir cihazda toplanmasından dolayı bu cihazlar ışık dedektörleri, ışık anahtarları ve hafıza elemanları gibi opto elektronik uygulamalarda kolaylıkla adapte olabilirler [21].

Fototransistörlerin potansiyeli tek kristal silikon ışığa duyarlı yarı iletkenler , amorf silikon ve InAlAs–InGaAs gibi çeşitli anorganik yarı iletkenler kullanılarak gösterilmiştir ve bu malzemelerin kullanıldığı cihazların resposivitesi 400 A W^{-1} gibi çok yüksek bir değere ulaşmıştır [46]. Fakat anorganik yarı iletkenler yüksek sıcaklık gerektiren işlemlere ihtiyaç duymaları, yüksek vakum şartlarına ihtiyaç duymalarından ötürü bu cihazların üretimini çok pahalı yapar. Organik yarı iletkenler anorganik rakiplerine göre mekanik esneklikleri, hafiflikleri ve geniş alanlara ucuz yöntemler ile uygulanabilmeleri gibi özelliklerinden ötürü daha üstün performans sergilerler

Fakat organik yarı iletkenler yüksek performans sergilemeleri için yüksek ışığa duyarlılığa ve yüksek yük taşıyıcı yoğunluğuna sahip olmaları gerekmektedir. Bu deavantajın üstesinden gelebilmek için organik tek kristal fototransistorler, nano tel fototransistorler ve ince film fototransistorler gibi çeşitli yapıda cihazlar üretilmiştir.

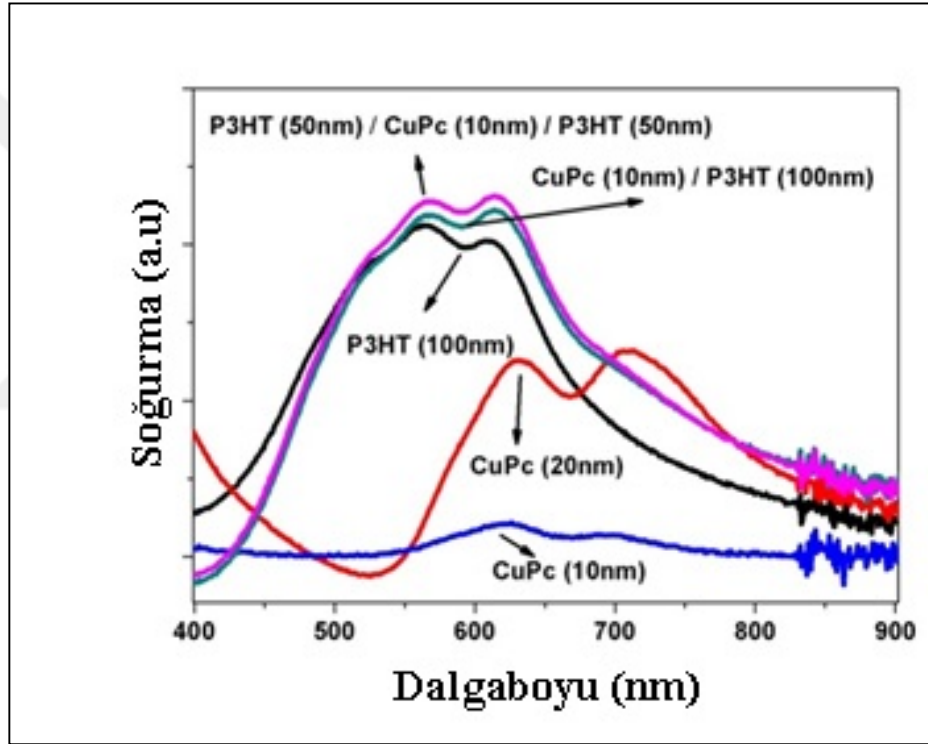
Yüksek yük yoğunluğuna sahip olmalarından ötürü organik tek kristaller ve nano teller tek kristal Si fototransistorlerde daha iyi performans sergilemişlerdir. Fakat bu yapıların pratik uygulamalar için üretim zorluklarından ötürü çok kullanışlı değildir]. Tek kristal organik katman, organik düzlemsel hetero eklemler ve bulk hetero eklem yapılar foto transistorlerde sıklıkla kullanılırlar tek katman organik FOTOOFET ler için aktif yarı iletkenler elektron akseptör veya elektron donör özelliği sergiler. tek katman organik FOTOOFET lerin R değeri genellikle düşük çıkar çünkü bu yapıda kullanılan aktif yarıiletken malzemelerin yük taşıyıcı mobiliteleri düşük ve eksiton ayrışma verimleri zayıftır. Düzlemsel veya bulk hetero eklem yapıların her ikisinde de elektron donör malzeme ışığa duyarlı katman olarak kullanılır ve yüksek taşıyıcı mobilitesine sahip elektron akseptör malzeme yüksek performanslı FOTOOFET üretmek için kanal katmanı olarak kullanılır. Donor - akseptör arayüzünde eksiton ayrışması daha verimli olduğu için bu yapıda FOTOOFET performansı artar [99]. FOTOOFET lerdeki ana proses ışık altında ışıkla uyarılmış yük taşıyıcıların oluşması ve yük taşıyıcıların hem ışıkla hemde Vds potansiyeli ile enjeksiyonun sağlanmasıdır. Yüksek performanslı FOTOOFET ler için yük taşıyıcı oluşumu için yüksek optiksel soğurma ve alan etkili akım için yüksek taşıyıcı mobilitesi gereklidir. Birçok organik yarı iletken malzemeler kesikli soğurma sergiler ve spektrumun bir kısmını soğurur buda verimsiz eksiton oluşumu sağlar. Tandem yapıda FOTOOFET lerin birbirini tamamlayan katmanlar kullanılarak üretilmesi cihaz performansını arttırmak için makul bir çözüm sunabilir. Literatürde bildiğimiz kadarıyla FOTOOFET lerin tandem yapı kullanılarak üretimi henüz gösterilmemiştir.

Bu çalışmada, tandem FOTOOFET yeni bir çok katmanlı organik düzlemsel eklem yapıda olacak şekilde üretilmiştir, üretilen çok katmanlı yapı P3HT/CuPc/P3HT şeklindedir. Bu yapıda bütün katmanlarda foto eksitonların oluşumu ve ayrılması sağlanırken yük taşınması mobilitesi daha yüksek olan P3HT katmanının gerçekleşir. Tandem yapıdaki FOTOOFET in performansı P3HT ve CuPc den oluşan tek katmanlı FOTOOFET lere nazaran mükemmel sonuçlar vermiştir.

Bu çalışmada önerilen tandem yapı daha yüksek performanslı FOTOOFET lerin üretimi için ileri taşıyıcı bir model olabilir.

8.2. Sonuçlar ve Değerlendirmeler

P3HT, CuPc ve iki katmanlı P3HT-CuPc filmlerinin soğurma spektrumları Şekil 8.1 de verilmiştir. P3HT 450 nm ile 600 nm arasında ışığı soğurur ve soğurma pik noktası 510 nm de yer alır. CuPc 550 nm ile 750 nm arasında ışığı soğurur ve P3HT ye gre daha geniş bir soğurma spektrumu sağlar. İki katmanlı yapı kullanıldığında soğurma spektrum aralığının artması beklenir. Şekil 8.1 soğurma spektrumunun tek katmanlara gre daha geniş olduğu açıkça grlmektedir. Spektrum aralığındaki bu artış kanalda ışıkla uyarılmış eksitonların oluşumunun artışını sağlar.



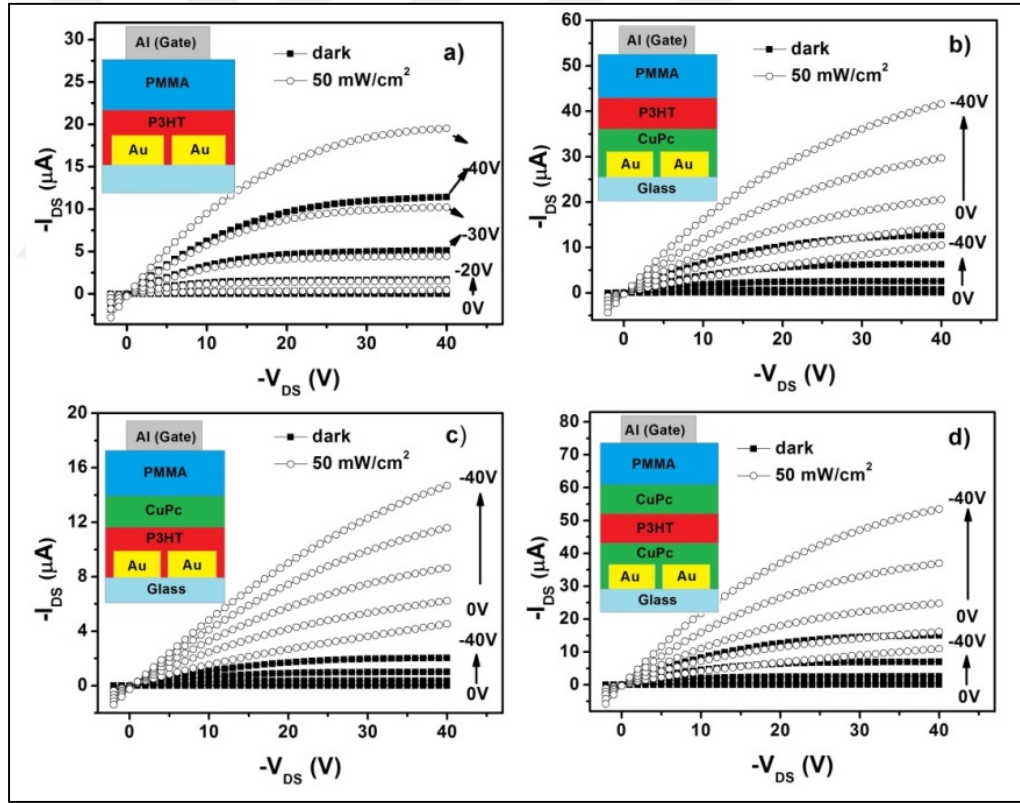
Şekil 8.1: P3HT (100nm), CuPc/P3HT (10nm/100nm), P3HT/CuPc/P3HT (50nm/10nm/50nm) ve CuPc katmanlarının UV-vis absorpsiyon spektrumu.

Bu alışmada tandem yapının avantajlarını grmek için 5 farklı cihaz retilmiştir bunlar sırasınla;

- Au (S-D)/P3HT(100nm)/PMMA(600nm)/Al(kapı):Cihaz 1
- Au(S-D)/CuPc(10nm)/P3HT(100nm)/PMMA(600nm)/Al:Cihaz 2
- Au (S-D)/P3HT(100nm)/CuPc(10nm)/PMMA(600nm)/Al:Cihaz 3

- Au (S-D)/P3HT(50nm)/CuPc(10nm)/P3HT(50nm)/PMMA(600nm)/Al:Cihaz 4
- Au(S-D)/CuPc(100nm)/PMMA(600nm)/Al:Cihaz 5

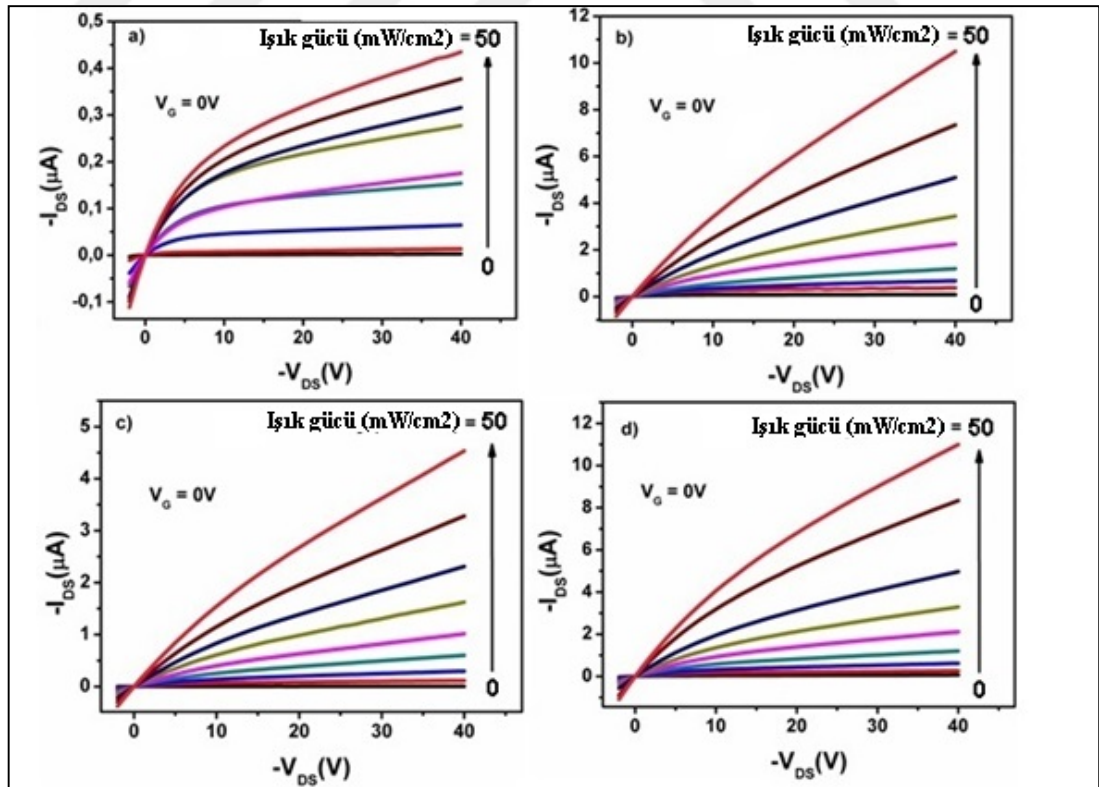
Şekil 8.2 Cihaz 1, 2, 3 ve 4 için karanlık ve aydınlık ortamda alınan out-put karakteristiklerini vermektedir. Şekil 8.2 de görüldüğü gibi bütün cihazlar negatif kaynak-savak voltajı (V_{ds}) ve kapı voltajı (V_g) altında karanlıkta tipik bir p-tip alan etkili taransistör karakteristiği göstermektedir. Şekil 8.2 (a) sadece P3HT aktif katmanından oluşan OFET cihazının out-put eğrilerini vermektedir. Cihaz ideal out-put karakteristiğini hem karanlık hemde aydınlık ortamda sergilemektedir. Şekil 2 (a) açıkça görülmektedir ki 50mW/cm^2 gücündeki ışık şiddeti altında cihazın doyum bölgesindeki I_{ds} değeri karanlık ortamdakine göre 2 kat artmaktadır ($V_{gs} = -40\text{ V}$, $V_{ds} = -40\text{ V}$).



Şekil 8.2: Cihaz 1, 2, 3 ve 4 ün ışık altında ve karanlıkta alınan out-put karakteristikleri.

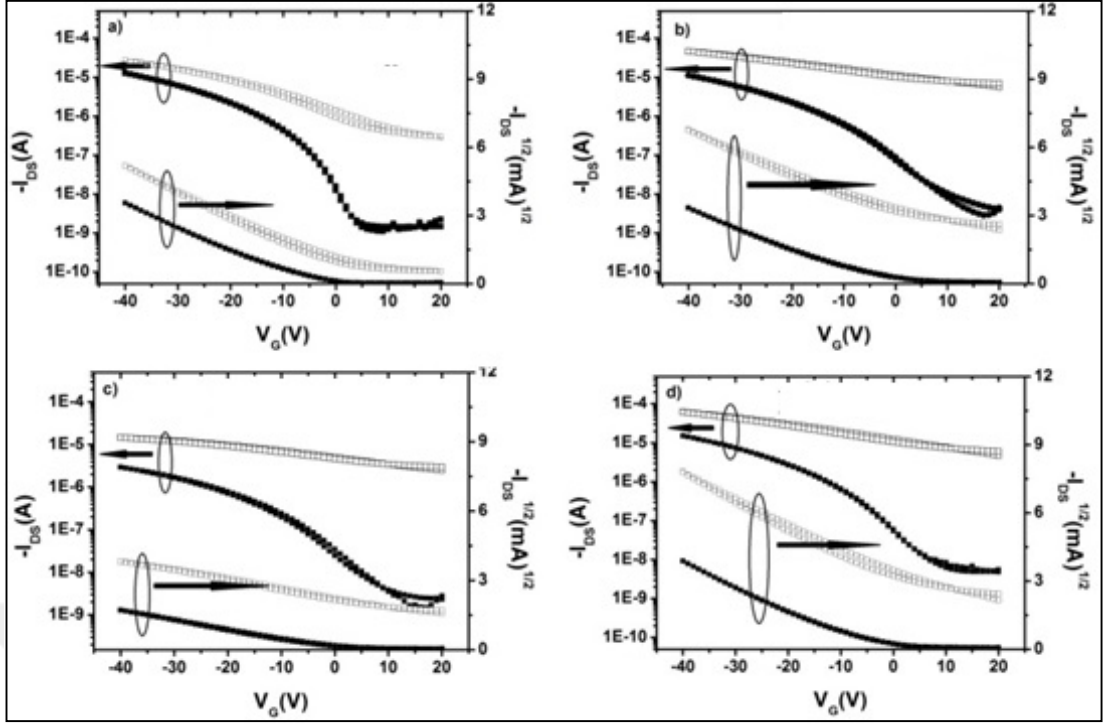
Daha sonra CuPc katmanı ekstra foton soğuru katman olarak cihaz performansını arttırmak için sisteme eklenir. Şekil 8.2 (b) de görüldüğü gibi altta CuPc üstte P3HT olacak şekilde Cihaz 2 tek katman P3HT li Cihaz 1 den daha yüksek

performans sergilemiştir. Doyum bölgesinde ki I_{ds} değeri Cihaz 4 teki I_{ds} değeriyle neredeyse aynıdır, bu P3HT nin tandem yapı içinde kanalın bulunduğu yük taşıyıcı katman olarak verimli olduğunu göstermektedir. 50mW/cm^2 ışık gücü altında doyum bölgesindeki I_{ds} değeri karanlıktaki değeriyle karşılaştırıldığında 4 kat arttığı görülmektedir. Fakat transistor davranışı ideal durumdan biraz sapar ve yüksek V_{ds} değerlerinde doyum azalır. CuPc katmanının tandem yapı içinde soğurucu katman olarak daha verimli olacağı anlamı bu durumdan çıkarılabilir. Şekil 8.2 (c) de gösterildiği gibi altta P3HT üstte CuPc şeklinde üretilen Cihaz 3, Cihaz 2 ye göre düşük performans sergilemiştir. Bunun sebebi CuPc katmanı ile yalıtkan PMMA katmanı arayüzünün iyi çalışmaması olabilir. Bu sonuç ileriki bölümde ele alacağımız Şekil 8.3 tartışılan sonuçlarla da uyumludur. Şekil 8.2 (d) Cihaz 4 ün out-put eğrilerini verir ve en iyi performansı bu cihaz sergiler. Bu cihaz yapısında altta P3HT oratada CuPc üstte P3HT atmanları sırasıyla yerleştirilir. I_{ds} değeri Cihaz 2 ve 4 için doyum bölgesinde neredeyse aynıdır. Bu durum P3HT katmanının yük taşıyıcı katman olarak kullanılmasının bu yapıda daha verimli olduğunu gösterir. 50mW/cm^2 ışık altında I_{ds} akımı karanlık I_{ds} akımına göre 5 kat artmıştır.



Şekil 8.3:a) Cihaz 1, b) Cihaz 2, c) Cihaz 3 ve d) Cihaz 4 ün $V_{gs} = 0\text{ V}$ değerinde farklı ışık şiddetlerinde out-put karakteristikleri.

Gelen ışığın enerjisi organik yarı iletkenin bant aralığına eşit yada büyükse soğrulur ve foto eksitonlar oluşur, daha sonra bunlar ayrışarak serbest elektron ve elektron boşluğu olurlar ve I_{ds} akımının artışına sebep olurlar. Sonuç olarak aydınlatma FOTOOFET lerin özelliklerinin kontrol edilebilmesi için çok önemli bir parametredir. Şekil 8.3 te $V_g = 0$ durumunda farklı ışık güçleri altında I_{ds} - V_{ds} grafikleri verilmiştir. Bütün FOTOOFET lerin I_{ds} değeri ışık şiddeti ile kademeli olarak artmaktadır ve OFET lerin klasik out-put eğrisi gibi davranır. Bu davranış gelen ışığın ekstra terminal gibi kullanılabileceğini gösterir ve transistörün diğer terminalleri (savak, kaynak, kapı) ile birlikte kontrol edilebileceğini gösterir [100,101]. Şekil 8.3 (a) Cihaz 1 in 50mW/cm^2 şiddete kadar farklı ışık şiddetleri altında out-put eğrisini göstermektedir. Cihaz diğer çok katmanlı yapılara göre düşük performans göstermektedir. Bu durum sadece P3HT aktif katmanın dar soğurmna aralığından ötürü kanalda daha az ışıkla uyarılmış eksiton oluşumuna bağlanabilir. Sisteme ekstra soğurucu katman eklenmesi ile ışıkla oluşan akımda tandem yapının daha geniş soğurma aralığına sahip olmasından ötürü ciddi anlamda artış meydana gelir. Cihaz 3, Cihaz 1 ve Cihaz 2 ile karşılaştırıldığında daha düşük performans sergiler. Çünkü ışıkla uyarılmış yükler CuPc / PMMA arayüzünde tuzaklanırlar. Cihaz 1 ve Cihaz 4 neredeyse aynı performansı gösterirler.



Şekil 8.4: a) Cihaz 1, b) Cihaz 2 c) Cihaz 3 ve d) Cihaz 4 ün karanlık (içi dolu çizgiler) ve aydınlık (içi boş çizgiler) koşullarda $V_{DS}=30$ V için alınan transfer karakteristikleri.

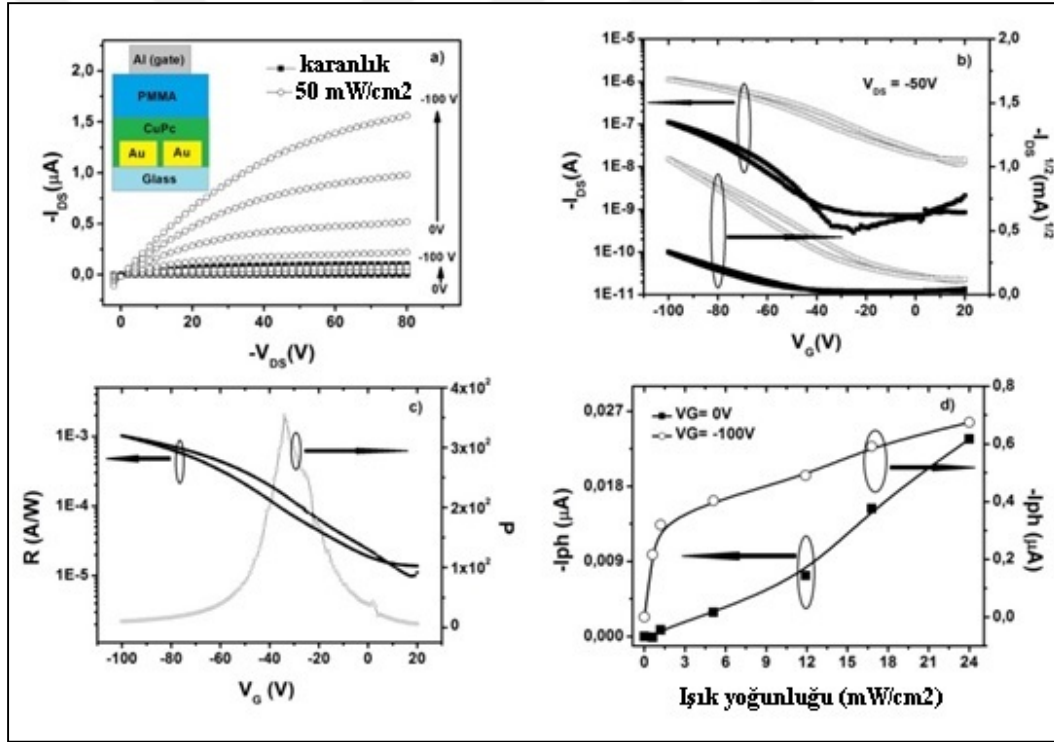
Şekil 8.4 bütün cihazların aydınlık (50 mW/cm^2) ve karanlık ortamda transfer karakteristiklerini gösterir ($V_{ds}=30$ V). Şekil 8.4 ten açıkça görülmektedirki bütün cihazlar ideal kapı modülasyonuna sahiptirler ve yaklaşık 10^3 mertebesinde açma/kapama oranına sahiptirler. $[I_{DS}]^{1/2} - V_G$ grafiği de şekil 8.4 aydınlık ve karanlık ortam için verilmektedir. Doyum mobilitesi (μ_{sat}) bu grafikten aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$I_{DS} = \left(\frac{WC_i}{2L}\right)\mu(V_G - V_{th})^2 \quad (8.1)$$

Burada W kanal aralığı, L kanal uzunluğu, V_{th} eşik voltajı ve C_i dielektrik malzemenin etkin kapasitesini göstermektedir. Şekil 8.4 a) Cihaz 1 in transfer karakteristiğini göstermektedir ve mobilite değeri, V_{th} değeri ve açma kapama oranı sırasıyla 2×10^{-3} , -7.5 V ve $\sim 10^3$ olarak hesaplanmıştır.

Sisteme P3HT ile S-D elektrotları arasında kalcak şekilde CuPc (10 nm) katmanı eklendiğinde mobilete değerinin çok azalarak 1.5×10^{-3} değerine ulaştığı, V_{th} değerinin -6.5 V değeri ile daha pozitif bir değere kaydığı fakat açma/kapama oranının neredeyse aynı kaldığı gözlenmektedir. (Şekil 8.4 b), Cihaz 2). Bu durum, araya gelen CuPc

katmanının pozitif yüklerin elektrolara enjeksiyonunu HOMO seviyelerinin neredeyse P3HT ile aynı olmasından ötürü değiştirilmemesine atf edilebilir. CuPc (10nm) katmanı P3HT ile PMMA arasına yerleştirildiği zaman mobilite değeri 2.84×10^{-4} değerine düşer ve V_{th} değeri daha pozitif bir değer olan +0.62 V değerine kayar (Şekil 8.4 c), Cihaz 3). Cihaz 3 teki mobilite düşüşü CuPc/PMMA arayüzünde yüklerinin tuzaklanması ve taşıyıcı yığılmasının azalması ile ilişkilendirilebilir. Eğer CuPc (10nm) katmanı iki P3HT katmanı arasına yerleştirilirse mobilete değeri 2.4×10^{-3} olarak ölçülür (Şekil 8.4 d), Cihaz 4) ve bu değer neredeyse tek P3HT katmanlı cihazla (Cihaz 1) aynıdır. Bütün OFET parametreleri Tablo 8.1 de özetlenmiştir. Bütün bu cihazların yanın da sadece CuPc aktif katmanı ile bir cihaz yapılmıştır ve Cihaz 5 olarak isimlendirilmiştir (Şekil 8.5).



Şekil 8.5: a) Cihaz 5 in karanlık (içi dolu çizgiler) ve aydınlık (içi boş çizgiler) koşullarda out-put karakteristikleri, b) Cihaz 5 in karanlık (içi dolu çizgiler) ve aydınlık (içi boş çizgiler) koşullarda transfer karakteristikleri, c) R nin V_{gs} ye göre değişimi, d) Fotosesitivitenin ışık şiddetine göre değişim grafiği

Cihaz 5 diğer cihazlara nazaran çok düşük performans sergilemiştir. Mobilite değeri yaklaşık 10^{-5} mertebesinde hesaplanmıştır. Tablo 8.1 de hem karanlık koşullar hemde aydınlık koşullar için bütün transistör parametreleri özetlenmiştir. Bütün cihazların beyaz ışık altında alınan transfer karakteristikleri ve beyaz ışığın çalışma

parametrelerine etkileri Şekil 8.4 te verilmiştir. Bütün cihazlar için kapama akım değeri ışık altında artar ve V_{th} değeri daha pozitif değerlere kayar. Bütün cihazların ışık altında doyum mobilite değeri hesaplanmıştır ve karanlık durumdaki değerleriyle neredeyse aynı kaldığı gözlenmiştir (Tablo 8.1). V_{th} değerindeki kayma önceden yapılmış bazı çalışmalarda da gözlenmiş ve aktif katmanda oluşan ışıkla uyarılmış elektronlara bağlanmıştır [102-103]. Işık altında soğurulan fotonlar elektron ve elektron boşluğu oluşumuna sebep olurlar ve ışıkla oluşan elektronlar pozitif yüklü tuzak seviyelerini deneyeleyerek V_{th} değerinde kaymaya sebep olurlar [104-109].

Tablo 8.1: Bu çalışmada üretilen bütün cihazların performans özeti.

Cihazlar	R (mA/W)	Max. value of P	V _{th}	μ_{Dark} (cm ² /Vs)	μ_{Light} (cm ² /Vs)
Cihaz 1	14.25 (at V _G =-40V)	5.95 x 10 ²	-7.5V	0.002	0.002
Cihaz 2	34.74 (at V _G =-40V)	2.1 x 10 ³	-5.11V	0.0015	0.0014
Cihaz 3	11.58 (at V _G =-40V)	1.3 x 10 ³	0.62V	0.00028	0.00024
Cihaz 4	45.85 (at V _G =-40V)	1.9 x 10 ³	-6.5V	0.0024	0.0022
Cihaz 5	1.1 (at V _G =-100V)	3.53 X 10 ²	-44.3V	0.000012	0.000032

FOTOOFET lerin çalışması fotovoltajik ve fotoiletkenlik olarak iki farklı etki ile açıklanabilir [36]. FOTOOFET ler açık durumda çalışırken fotovoltajik etki hakimdir. Işıkla uyarılmış eksitonlar aktif katmanda oluşur ve serbest elektron ve elektron boşluğu olarak ayrışır, ışıkla uyarılmış elektronlar kaynak elektrodu altında bir fotovoltaj indüklerler ve aktif katman ile kaynak elektrodu arasındaki enjeksiyon bariyerini etkin bir şekilde düşürür. Bunun yanında kontak direnci ışık altında azalır. kontak direncinin ve enjeksiyon bariyerinin azalmasından ötürü V_{th} değeri daha pozitif değerlere kayar ve I_{ds} ciddi anlamda artar.

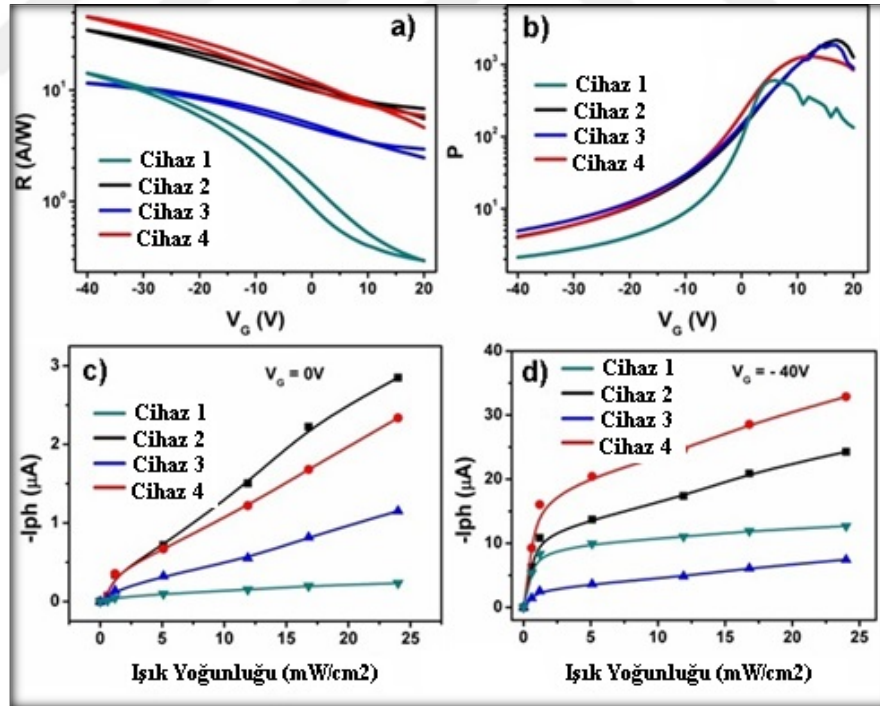
Fotovoltajik etki aşağıdaki denklem ile ifade edilir .

$$I_{ph,pv} = G_m \Delta V_{th} = AkT \left[\ln \left(1 + \frac{\eta q \lambda P_{opt}}{I_{pd} hc} \right) \right] / q \quad (8.2)$$

Burada G_m iletkenlik, A orantı sabiti, ΔV_{th} eşik voltajı kayması, I_{pd} azınlık yük taşıyıcıları için karanlık akımı, η kuantum verimliliği ve P_{opt} gelen ışığın şiddeti dir. Bu çalışmada ekstra soğurucu katman olarak CuPc kullanılmıştır ve bu katmanın Şekil 8.4 açıkça görüldüğü gibi sadece P3HT ve CuPc katmanlarından Cihaz 1 ve Cihaz 5 e kıyasla bütün cihazlar için foto-akımı artırır (Cihaz 2, Cihaz 3, Cihaz 4). Bu durum CuPc ve P3HT katmanlarının birlikte aynı cihaz içinde birlikte kullanımı ile daha fazla foton soğurulur ve aktif katmanda daha fazla ışıkla oluşan yük taşıyıcıları oluşur ve bu kaynak elektrodu altında daha fazla azınlık yük taşıyıcısının tuzaklanmasına sebep olur. Sonuç olarak FOTOOFET performansı ekstra soğurucu katman kullanılarak artırılmış olur.

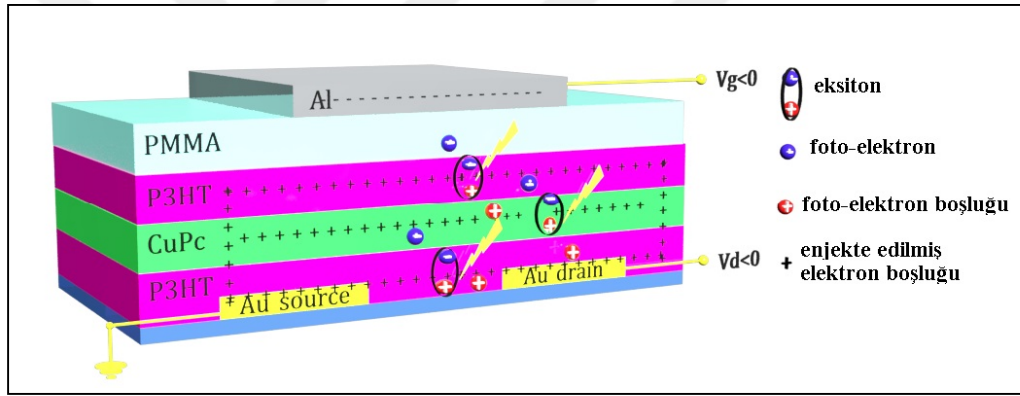
FOTOOFET kapalı durumda ise foto-iletkenlik cihazın çalışmasında baskın durumda olur ve aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$I_{ph,pc} = (q\mu_p E)WD = BP_{opt} \quad (8.3)$$



Şekil 8.6: a) Cihaz 1, 2, 3 ve 4 için V_{gs} ye karşı R değerinin değişim grafiği, b) P değerinin V_{gs} değerine göre değişim grafiği, c) Işık şiddetininine göre foto-akımın değişim grafiği $V_{gs} = 0$ V , d) Işık şiddetininine göre foto-akımın değişim grafiği $V_{gs} = -40$ V.

Bir FOTOOFET in performansı R ve P değerleri ile belirlenir. Şekil 8.6 a) ve b) R ve P değerlerinin V_g değerine göre değişimini vermektedir. CuPc katmanının ekstra soğurucu katman olarak kullanımı R ve P değerini FOTOOFET cihazı için arttırdığı açıkça görülmektedir. Elde edilen R ve P değerleri bütün cihazlar için Tablo 8.1 de özetlenmiştir. Şekil 8.6 d) ve c) sırasıyla kapalı ve açık durumdaki FOTOOFET ler için foto-akım ışık şiddeti grafiğini vermektedir. Elde edilen grafikler incelendiğinde kapalı durumdaki eğriler foto-iletkenlik etkisiyle, açık durumdaki eğriler fotovoltaj etkisiyle uyumlu oldukları açıkça görülmektedir. Fotovoltaj etkide ışık şiddeti arttıkça doğum gözlenirken foto-iletkenlik etkide doyum gözlenmez. Tandem FOTOOFET tabanlı P3HT/CuPc/P3HT yapısının enerji seviyesi yaklaşımı ve kanal işleyişi, yük transfer prosesi ve basitleştirilmiş enerji seviyeleri bakımından Şekil 8.7 de gösterilebilir.



Şekil 8.7: P3HT/CuPc/P3HT tabanlı tandem FOTOOFET in yapısı ve yük transfer prosesi.

Tandem FOTOOFET in performans artışı tek katmanlı P3HT ve CuPc cihazlarla karşılaştırıldığında cihaz içinde oluşan fiziksel olayların analizi ile daha iyi anlaşılabilir (Şekil 8.7).

- i) bütün katmanlarda optik spektrumun farklı bölgeri ile foto-eksitonların oluşumu.
- ii) bütün katmanlarda foto-eksitonların difüzyonu
- iii) eksitonların serbest elektron ve elektron boşluklarına ayrışması (genellikle kaynak elektrodu civarında)
- iv) V_g ve V_{ds} ile oluşan elektron boşluklarının taşınması
- v) elektron boşlukların katmanlar arası savak elektroduna doğru ilerlemesi

FOTOOFET lerde ışık altında gerçekleşen başlıca prosesler yük taşıyıcılarının oluşumu ve taşınmasıdır. Yüksek ışık absorpsiyonu foto-yük taşıyıcılarının oluşumu yüksek taşıyıcı mobilitesi için gereklidir. FOTOOFET üzerine yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu geleneksel tek katmanlı yapı üzerine kurulmuştur. Bu çalışmada çok katmanlı yapıların FOTOOFET performansını iyileştirdiği yeni bir tandem yapı yaklaşımı ortaya konmuştur.



9. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında öncelikle farklı molekül ağırlığına ve PDI değerine sahip MDMO:PPV polimerlerinin FOTOOFET özellikleri incelenmiştir. MDMO:PPV tabanlı FOTOOFET'lerin elektro-optiksel karakteriztikleri ve parametreleri molekül ağırlığına PDI değerlerine kuvvetlice bağlı olduğu gösterilmiştir. Yüksek molekül ağırlığı yüksek soğurma sağladığı için kanal akımı ve P ve R değerlerinde artış sağlar. Diğer taraftan yüksek PDI değeri çok fazla tuzak oluşumuna neden olduğu için P ve R değerlerini olumsuz etkiler. Bu sonuçlar ışık soğrulması, yük taşınımı, ve yük tuzaklanması/ayrışması bakımından açıklanır. Yüksek molekül ağırlığı ve düşük PDI değerinin daha verimli olduğu bu bakımdan ortaya konabilir. Algılama için molekül ağırlığı ve PDI değerinin ayarlanması FOTOOFET ler için daha geniş uygulama fırsatlarının yakalanmasını sağlayabilir.

Çalışmanın ikinci kısmında ise OFET lerin mobilite ve operasyon voltajı değerini geliştirmek için jel kapı yalıtkanı ve aktif katmanın moleküler katkılanması birlikte aynı OFET sisteminde uygulanmış ve ciddi performans artışı sağlanmıştır. İlk olarak PMMA yalıtkan polimeri PC kullanılarak jel formuna sokulmuş ve dielektrik özellikleri geliştirilmiştir. Jel dielektrik kullanımı ile kararlı, düşük operasyon voltajına (-0.8 V), düşük V_{th} (0.1 V) değerine ve yüksek mobilite ($0.26 \text{ cm}^2\text{V}^{-1} \text{ s}^{-1}$) değerine sahip OFET elde edilmiştir. İkinci olarak moleküler katkı ile aktif katmanın özellikleri iyileştirilmiş bunun için F4-TCNQ katkı malzemesi kullanılmıştır ve mobilite değeri $1.1 \text{ cm}^2\text{V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ değerine çıkmıştır. Bu sonuçlar OFET performansını arttırmak için jel dielektrik kullanımı ve moleküler doplamanın kolay ve kullanışlı yöntemler olduğunu ortaya koymuştur.

Son olarak FOTOOFET lerin gelişiminde önemli bir basamak olacağını düşündüğümüz tandem (çok katmanlı) yapıda FOTOOFET ler üretilerek karakterize edilmiştir. Bu yapı için CuPc ve P3HT aktif katmanları üst üste kaplanarak aynı OFET cihazı içinde kullanılmıştır. Çok katmanlı yapılar ile elde edilen fotoresposivite değeri tek katmanlı cihazlara göre 3 kattan fazla artış göstermiştir. Bu çalışmada, tandem FOTOOFET yeni birçok katmanlı organik düzlemsel eklem yapıda olacak şekilde üretilmiştir, üretilen çok katmanlı yapı P3HT/CuPc/P3HT şeklindedir. Bu yapıda bütün katmanlarda foto eksitonların oluşumu ve ayrılması sağlanırken yük taşınması mobilitesi daha yüksek olan P3HT katmanın gerçekleşir. Tandem yapıdaki

FOTOOFET in performansı P3HT ve CuPc den oluşan tek katmanlı FOTOOFET lere nazaran mükemmel sonuçlar vermiştir. Bu çalışmada önerilen tandem yapı daha yüksek performanslı FOTOOFET lerin üretimi için ileri taşıyıcı bir model olabilir.



KAYNAKLAR

- [1] Chiang C. K., Fincher C. R., Park Jr., Y. W., Heeger A. J., Shirakawa H., Louis E. J., Gau S. C., MacDiarmid Alan G. (1977), "Electrical Conductivity in Doped Polyacetylene", *Physical Review Letters*, 40, 1472.
- [2] Peng B., Ren X., Wang Z., Wang X., Roberts C. R., Chan P. K. L. (2014) "High performance organic transistor active-matrix driver developed on paper substrate" *Scientific Reports*, 4, 6430.
- [3] Tinivella R., Camarchia V., Pirola M., Shen S., Ghione G. (2011) "Simulation and design of OFET RFIDs through an analog/digital physics-based library" *Organic Electronics*, 12, (8), 1328–1335.
- [4] Yu J., Yu X., Zhang L., Zeng H. (2012) "Ammonia gas sensor based on pentacene organic field-effect transistor" *Sensors and Actuators B: Chemical*, (173), 133–138.
- [5] Coropceanu V., Cornil J., Filho D. A. S., Olivier Y., Silbey R., Bredas J.L. (2007) "Charge Transport in Organic Semiconductors" *Chemical Review*, 107, 926-952.
- [6] Heeger A.J. (2001) "Semiconducting and Metallic Polymers: The Fourth Generation of Polymeric Materials", *Journal of Physical Chemistry B*, 105 (36), 8475–8491.
- [7] Moliton A., Hiorns R. C. (2004) "Review of electronic and optical properties of semiconducting π -conjugated polymers: applications in optoelectronics" , *Polymer International*, 53, (10) ,1397–1412.
- [8] Köhler A., Santos D. A., Beljonne D., Shuai Z., Brédas J.-L., Holmes A. B., Kraus A., Müllen K., Friend R. H. (1998) "Charge separation in localized and delocalized electronic states in polymeric semiconductors", *Nature*, 392, 903-906.
- [9] Brazovskii S. A., Kirova N. N., Matveenko S. I. (1984) "Peierls effect in conducting polymers", *Soviet Physics (2) Journal of Experimental and Theoretical Physics* 59.
- [10] Hadziioannou G., Malliaras G.G. (2007) "Semiconducting Polymers" 1st Edition, Wiley VCH.
- [11] Dekker M. (2007) "Handbook of Conducting Polymers", Vol 1&2 T. A. Skotheim, J. Reynolds, Editors, CRC Press.
- [12] Stilwell D. E., Su-Moon (1988) "Electrochemistry of Conductive Polymers II . Electrochemical Studies on Growth Properties of Polyaniline" *Journal of Electrochemical Society*, 135, (9), 2254-2262.

- [13] MacDiarmid A. G. (2001) "Synthetic Metals: A Novel Role for Organic Polymers (Nobel Lecture)" *Angewandte Chemie International Edition*, 40, 2581 – 2590.
- [14] Bredas J. L., Calbert J. P., Silva F. D. A., Cornil J.(2001) "Organic semiconductors: A theoretical characterization of the basic parameters governing charge transport" *PNAS*, 99, (9) ,5804-5809.
- [15] Heeger A. J., Kivelson S., Schrieffer J. R., Su W. -P (1988) "Solitons in conducting polymers" *Reviews of Modern Physics*, 60, 781.
- [16] Baughman R. H., Bredas J. L.,Chance R. R., Elsenbaumer R. L.,Shacklette L. W.,(1982) "Structural basis for semiconducting and metallic polymer dopant systems" *Chemical Reviews*, 8 (22), 209–222.
- [17] Kar P. (2013), "Doping in Conjugated Polymers" ,1st Edition, Wiley VCH.
- [18] Jinc P. (1990) "Doping Mechanism of Conjugated Polymer with Conjugated Triple Bond" *Science in China*, 34, 61-67.
- [19] Kittel C.(1996) ,"Katıhal Fiziğine Giriş", 1. Baskı, Palme Yayıncılık.
- [20] Stallinga P.,(2011) "Electronic Transport in Organic Materials: Comparison of Band Theory with Percolation/(Variable Range) Hopping Theory" *Advanced Materials*, 23, (30) ,3356–3362.
- [21] Lucas B., Trigaud T., Videlot-Ackermann C. (2012) "Organic transistors and phototransistors based on small molecules" *Polymer International*, 61, (3), 374–389.
- [22] Facchetti A. (2007) "Semiconductors for organic transistors" *Materials Today*, 10, (3), 28–37.
- [23] Coropceanu V., Li H., Winget P., Zhu L., Bredas J.L. (2013) "Electronic-Structure Theory of Organic Semiconductors:Charge-Transport Parameters and Metal/Organic" Interfaces *Annual Review of Materials Research*, 43, 63–87.
- [24] Kymissis I. ,(2009), "Organic Field Effect Transistors Theory, Fabrication and Characterization" ,1st Edition , Springer.
- [25] Mas-Torrent M., Rovira C.,(2008) "Novel small molecules for organic field-effect transistors: towards processability and high performance" *Chemical Society Review*, 37, 827-838.
- [26] Horowitz G. (1998), "Organic Field Effect Transistors" *Advanced Materials*, 10, (5), 365-377.
- [27] Horowitz G., Hajlaoui R., Bouchriha H., Bourguiga R., Hajlaoui M.(1998) "The Concept of "Threshold Voltage" in Organic Field-Effect Transistors" *Advanced Materials*, 10, (12), 923–927.

- [28] Baeg K., Binda M., Natali D., Caironi M., Noh Y. (2013) “Organic light Detectors: Photodiodes and Phototransistors” *Advanced Materials*, 25, 4267-4295.
- [29] Saragi T.P.I, Pudzich R., Fuhrmann T., Salbeck J. (2004) “Organic phototransistor based on intramolecular charge transfer in a bifunctional spiro compound.” *Applied Physics Letters*, 84(13), 2334–2336.
- [30] Yakuphanoglu F., Farooq W.-A., (2011) “Flexible pentacene organic field-effect phototransistor” *Synthetic Metals*, 161, (5/6), 379–383.
- [31] Xu F., Wang C., Yang L., Yin S., Wedel A., Janietz S., Krueger H., Hua Y. (2005) “PPV-derivatives containing phenothiazine and alkyloxy-substituted oxadiazole/Phenyl units for OLED” *Synthetic Metals*, 152, 221–224.
- [32] Chang C., Tsai F., Jhuo S., Chen M. (2008) “Enhanced OLED performance upon photolithographic patterning by using an atomic-layer-deposited buffer layer” *Organic Electronics*, 9, 667–672.
- [33] Todescato F., Capelli R., Dinelli F., Murgia M., Camaioni N., Yang M., Bozio R., Muccini M (2008) “Correlation between dielectric/organic interface properties and key electrical parameters in PPV-based OFETs” *Journal of Physical Chemistry B*, 112, 10130–10136.
- [34] Koyanagi T., Furukawa S., Tsutsui K., Wada Y., Furukawa Y. (2006) “Voltage-Induced Infrared Absorption from Polymer Field-Effect Transistors” *Vibrational Spectroscopy*, 42, 156–160.
- [35] Barkhouse D. A. R., Bishop H. E., Henry B.M., Webster G.R., Burn P. L., Assender H.E. (2010) “Improving efficiency of MEH-PPV/TiO₂ solar cells by lithium salt modification” *Organic Electronics*, 11, 649–657.
- [36] van Duren J.K., Yang X., Loos J., Bulle-Lieuwma C.W.T., Sieval A.B., Hummelen J.C., Janssen R.A.J. (2004) “Relating the Morphology of Poly(*p*-phenylene vinylene)/ Methanofullerene Blends to Solar-Cell Performance” *Advanced Functional Materials*, 14, 425-434.
- [37] Shaked S., Tal S., Roichman Y., Razin A., Xiao S., Eichen Y., Tessler N. (2003) “Charge Density and Film Morphology dependence of charge mobility in polymer field effect transistor” *Advanced Materials*, 15, 913-916.
- [38] Lee W., Kong H., Oh S., Shim H., Kang I. (2009) “Field-effect transistors based on PPV derivatives as a semiconducting layer” *Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry*, 47, 111–120.
- [39] Noh Y.Y., Kim D.Y., Yoshida Y., Yase K., Jung B.J., Lim E, Shim H.K.(2005) “High-photosensitivity p-channel organic phototransistors based on a biphenyl end-capped fused bithiophene oligomer” *Applied Physics Letters*, 86 (4), 043501.

- [40] Pal T., Arif M., Khondaker S. I. (2010) “High performance organic phototransistor based on regioregular poly(3-hexylthiophene)” *Nanotechnology*, 21, 325201.
- [41] Tu D., Pagliara S., Cingolani R., Pisignano D. (2011) “An electrospun fiber phototransistor by the conjugated polymer MEH-PPV” *Applied Physics Letters*, 98, 023307.
- [42] Guo Y., Du C., Yu G., Di C., Jiang S., Xi H., Zheng J., Yan S., Yu C., Hu W., Liu Y. (2010) “High-Performance Phototransistors Based on Organic Microribbons Prepared by a Solution Self-Assembly Process” *Advanced Functional Materials*, 20, 1019–1024.
- [43] Selleo A., Street R.A., (2003) “Light-induced bias stress reversal in polyfluorene thin film transistors” *Journal of Applied Physics*, 94, 471.
- [44] Dutta S., Narayan K.S., (2005), “Photocurrent spectroscopy under depletion mode of transparent polymer field-effect transistors” *Applied Physics Letters*, 87, 193505.
- [45] Breban M., Romero D.B., Mezheny S., Ballaratto V. W., Williams E.D., (2005). “Photocurrent probe of field-dependent mobility in organic thin-film transistors” *Applied Physics Letters*, 87, 203503.
- [46] Choi C. S., Kang H. S., Choi W. Y., Kim H. J, Choi W. J., Kim D. H., Jang K. C., Seo K. S., (2003) “High optical responsivity of InAlAs-InGaAs metamorphic high-electron mobility transistor on GaAs substrate with composite channels” *IEEE Photonics Technology Letters*, 15, 846.
- [47] Kang H. S., Choi C. S., Choi W. Y., Kim D. H., Seo K. S., (2004) “Characterization of phototransistor internal gain in metamorphic high-electron-mobility transistors” *Applied Physics Letters*, 84, 3780.
- [48] Xu Y. F., Berger P. R., Wilson J. N., Bunz U. H. F., (2004) “Photoresponsivity of polymer thin-film transistors based on polyphenyleneethynylene derivative with improved hole injection” *Applied Physics Letters*, 85, 4219.
- [49] Chu T., Lu J., Beaupre S., Zhang Y., Pouliot J., Zhou J., Najari A., Leclerc M., Tao Y. (2012) “Effect of the Molecular Weight and the Side Chain Lengths on the Photovoltaic Performance of Dithienosilole/Thienopyrrolodione Copolymers” *Advanced Functional Materials*, 22, 2345–2351.
- [50] Tunc A.V., Ecker B., Dogruyol Z., Jüchter S., Ugur A.L., Erdogmus A., San S.E., Parisi J., von Hauff E. (2012) “Influence of molecular weight on the short-channel effect in polymer-based field-effect transistors” *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, 50, 117–124.
- [51] Hamilton M. C., Martin S., Kanicki J., (2004) “Thin-film organic polymer phototransistors” *IEEE Transactions Electron Devices*, 51, 877.

- [52] Narayan K. S., Kumar N. (2001) "Light responsive polymer field-effect transistor" *Applied Physics Letters*, 79, 1891.
- [53] Kwon J.H., Chung M.H., Oh T.Y., Ju B.K., Yakuphanoglu F. (2010) "Enhanced electrical and photosensing properties of pentacene organic thin-film phototransistors by modifying the gate dielectric thickness" *Microelectronic Engineering*, 87, 2306–2311.
- [54] X.Liu, M. Zhang, G.Dong, X. Zhang, Y.Wang, L. Duan, L. Wang, Y.Qiu (2014) "The effect of oxygen content on the performance of low-voltage organic phototransistor memory" *Organic Electronics*, 15, (7), 1664–1671.
- [55] Braun D., Heeger A.J., (1991) "Visible light emission from semiconducting polymer diodes" *Applied Physical Letters*, 58, 1982.
- [56] Zen A., Pflaum J., Hirschmann S., Zhuang W., Jaiser F., Asawapirom U., Rabe J. P., Scherf U., Neher D. (2004) "Effect of Molecular Weight and Annealing of Poly(3-hexylthiophene)s on the Performance of Organic Field-Effect Transistors" *Advanced Materials*, 14, 757-764.
- [57] Ma W., Kim J. Y., Lee K., Heeger A. J. (2007) "Effect of the Molecular Weight of Poly(3-hexylthiophene) on the Morphology and Performance of Polymer Bulk Heterojunction Solar Cells" *Macromolecule Rapid Communication*, 28, 1776–1780.
- [58] Yan F., Li J., Mok S. M., (2009) "Highly photosensitive thin film transistors based on a composite of poly (3-hexylthiophene) and titania nanoparticles" *Journal of Applied Physics*, 106, 074501.
- [59] Dutta S., Narayan K. S. (2004) "Gate-Voltage Control of Optically-Induced Charges and Memory Effects in Polymer Field-Effect Transistors" *Advanced Materials*, 16, 2151.
- [60] Arnold M. S., Zimmerman J. D., Renshaw C. K., Xu X., Lunt R.R., Austin C. M., Forrest S.R. (2009) "Broad spectral response using carbon nanotube/organic semiconductor/C60 photodetectors" *Nano Letters*, 9, 3354-3358.
- [61] Anthopoulos T. D. (2007) "Electro-optical circuits based on light-sensing ambipolar organic field-effect transistors" *Applied Physics Letters*, 91, 113513.
- [62] Yao B., Lv W., Chen D., Fan G., Zhou M., Peng Y. (2012) "Photoresponsivity enhancement of pentacene organic phototransistors by introducing C60 buffer layer under source/drain electrodes" *Applied Physics Letters*, 101, 163301.
- [63] El Gemayel M., Treier M., Musumeci C., Li C., Müllen K., Samori P., (2012) "Tuning the photoresponse in organic field-effect transistors", *Journal of American Chemical Society*, 134, 2429–2433.
- [64] Salleo A., Street R.A., (2003) "Light-induced bias stress reversal in polyfluorene thin-film transistors" *Journal of Applied Physics*, 94, 471.

- [65] Dutta S., Narayan K. S., (2003). “Nonexponential relaxation of photoinduced conductance in organic field effect transistors” *Physical Review B*, 68 ,125208.
- [66] Scheinert S., G. Paasch, I. Hörselmann, A. Herasimovich, (2010) “Low-Cost Submicrometer Organic Field-Effect Transistors” *Advanced Polymer Science*, 223, 155-188.
- [67] Liao C., Yan F., (2013) “Organic semiconductors in organic thin-film transistor-based chemical and biological sensors” *Polymer reviews*, 53, 352.
- [68] Deschler F., Da Como E., Limmer T., Tautz R., Godde T., Bayer M., von Hauff E., Yilmaz S., Allard S., Scherf U., Feldmann J., (2011) “Reduced charge transfer exciton recombination in organic semiconductor heterojunctions by molecular doping” *Physical Review Letters*, 107, 127402.
- [69] Torsi L., Magliulo M., Manoli K., Palazzo G., (2013) “Organic field-effect transistor sensors: a tutorial review” *Chemical Society Review*, 42, 8612-8628.
- [70] Dimitrakopoulos C.D., Furman B.K., Graham T., Hegde S., Purushothaman S., (1998) “Field-effect transistors comprising molecular beam deposited [alpha],[omega]-di-hexyl-hexathienylene and polymeric insulator” *Synthetic Metals*, 92, 47.
- [71] Ukah N. B., Granstrom J., Sanganna Gari R. R., King, G. M., Guha S., (2011) “Low-operating voltage and stable organic field-effect transistors with poly (methyl methacrylate) gate dielectric solution deposited from a high dipole moment solvent” *Applied Physics Letters*, 99, 243302.
- [72] Chao S., Wrighton M. S. J., (1987) “Solid-state Microelectrochemistry: Electrical Characteristics of a Solid-state Microelectrochemical Transistor Based on Poly (3methylthiophene)” *American Chemical Society*, 109, 2197.
- [73] Machado W.S., Hummelgen I.A., (2012) “Low-voltage poly (3-hexylthiophene)/ poly (vinyl alcohol) field-effect transistor and inverter” *IEEE Transactions Electron Devices*, 59, 1529.
- [74] Yim K.H., Whiting G. L., Murphy C. E., Halls J. J. M., Burroughes J. H., Friend R. H., Kim J.S., (2008) “Controlling Electrical Properties of Conjugated Polymers via a Solution-Based p-Type Doping” *Advanced Materials*, 20, 3319.
- [75] Panzer M. J., Frisbie C. D. (2007) “Ion Gel Gated Polymer Thin-Film Transistors”, *Journal of the American Chemical Society*, 129, 6599-6607.
- [76] Ma L., Lee W. H., Park Y. D., Kim J. S., Lee H. S., Cho K. (2008), “High performance polythiophene thin-film transistors doped with very small amounts of an electron acceptor” *Applied Physics Letters*, 92 ,(6), 063310.

- [77] Pingel P., Schwarzl R., Neher D., (2012) "Effect of molecular p-doping on hole density and mobility in poly(3-hexylthiophene)" *Applied Physics Letters*, 100 (14) 143303.
- [78] Aziz E. F., Vollmer A., Eisebitt S., Eberhardt W., Pingel P., Neher D., Koch N. (2007), "Localized Charge Transfer in a Molecularly Doped Conducting Polymer" *Advanced Materials*, 19, 3257.
- [79] Pernstich K. P., Haas S., Oberhoff D., Goldmann C., Gundlach D. J., Batlogg B., Rashid A. N., Schitter G., (2004) "Threshold voltage shift in organic field effect transistors by dipole monolayers on the gate insulator" *Journal of Applied Physics*, 96, 6431.
- [80] Hou X., Siow K. S., (2000) "Mechanical properties and ionic conductivities of plasticized polymer electrolytes based on ABS/PMMA blends" *Polymers*, 41, 8689–8696.
- [81] Herlogsson B. L., Crispin X., Robinson N. D., Sandberg M., Hagel O. J., Gustafsson G., Berggren M., (2007) "Low-Voltage Polymer Field-Effect Transistors Gated via a Proton Conductor" *Advanced Materials*, 19, 97–101.
- [82] Di C., Liu Y., Yu G., Zhu D., (2009) "Interface engineering: an effective approach toward high-performance organic field-effect transistors" *Accounts of Chemical Research*, 42, 1573.
- [83] Le N. C. H., Gubala V., Clancy E., Barry T., Smith T. J., Williams D. E., (2012) "Ultrathin and smooth poly (methyl methacrylate)(PMMA) films for label-free biomolecule detection with total internal reflection ellipsometry (TIRE)" *Biosensors and Bioelectronics*, 36, 250.
- [84] Sokolov A. N., Tee B. C-K., Bettinger C. J., Tok J. B.-H., Bao Z., (2012) "Chemical and Engineering Approaches to Enable Organic Field-Effect Transistors for Electronic Skin Applications" *Accounts of Chemical Research*, 45, 371.
- [85] Bao Z., Dodabalapur A., Lovinger A. J., (1996) "Organic Field-Effect Transistors with High Mobility Based on Copper Phthalocyanine" *Applied Physics Letters*, 69, 4108.
- [85] Lee K. H., Schwenn P. E., Smith A. R. G., Cavaye H., Shaw P. E., James M., Krueger K. B., Gentle I. R., Meredith P., Burn P. L., (2011) "Morphology of all-solution-processed bilayer organic solar cells" *Advanced Materials*, 23, 766.
- [86] Sirringhaus H., Brown P. J., Friend R. H., Nielsen M. M., Bechgaard K., Langeveld-Voss B. M. W., Spiering A. J. H., Janssen R. A. J., Meijer E. W., Herwig P., de Leeuw D. M., (1999) "Two-dimensional charge transport in self-organized, high-mobility conjugated polymers" *Nature*, 401, 685.
- [87] Mitra S., Shukla A. K., Sampath S. J., (2001) "Electrochemical capacitors with plasticized gel-polymer electrolytes" *Power Sources*, 101, 213.

- [88] Panzer M. J., Frisbie C. J., (2005) “Exploiting Ionic Coupling in Electronic Devices: Electrolyte-Gated Organic Field-Effect Transistors” *American Chemical Society*, 127, 6960.
- [89] Lee J., Kaake L. G., Cho J. H., Zhu X.-Y., Lodge P., Frisbie C. D., (2009) “Ion Gel-Gated Polymer Thin-Film Transistors: Operating Mechanism and Characterization of Gate Dielectric Capacitance, Switching Speed, and Stability” *Journal Physical Chemical C*, 113, 8972.
- [90] Lee S.W., Lee H. J., Choi J. H., Koh W. G., Myoung J. M., Hur J. H., Park J. J., Cho J. H., Jeong U., (2010) “Periodic array of polyelectrolyte-gated organic transistors from electrospun poly(3-hexylthiophene) nanofibers” *Nano Letters*, 10, 347.
- [91] Chandra S., Sekhon S., Arora N., (2000) “PMMA based protonic polymer gel electrolytes” *Ionics*, 6, 112-118.
- [92] Tung K.-L., Lu K.-T., Ruan R.-C., Lai J.-Y., (2006) “Molecular Dynamics Study of the Effect of Solvent Types on the Dynamic Properties of Polymer Chains in Solution” *Desalination*, 192, 380.
- [93] Yim K. H., Whiting G. L., Murphy C. E., Halls J. J M., Burroughes J. H., Friend R. H., Kim J. S., (2008) “Controlling electrical properties of conjugated polymers via a solution-based p-type doping”, *Advanced Materials*, 20,3319.
- [94] Zhang Y., de Boer B., Blom P. W. M., (2009) “Controllable Molecular Doping and Charge Transport in Solution-Processed Polymer Semiconducting Layers” *Advanced Functional Materials*, 19, 1901.
- [95] J. Drechsel, B. Männig, D. Gebeyehu, M. Pfeiffer, K. Leo, H. Hoppe, (2004) “MIP-type organic solar cells incorporating phthalocyanine/fullerene mixed layers and doped wide-gap transport layers” *Organic Electronics*, 5, 175.
- [96] Torsi L., Dodabalapur A., Rothberg L. J., Fung A. W. P, Katz H. E., (1998) “Charge transport in oligothiophene field-effect transistors” *Physical Review B*, 57, 2271.
- [97] Singh T., Sariciftci N. S., (2006) “Progress in plastic electronics devices” *Annual Review Materials*, 36, 199.
- [98] Horowitz G., Lang P., Aubin M. H., (2004) “Extracting Parameters from the Current–Voltage Characteristics of Organic Field-Effect Transistors” *Advanced Functional Materials*, 14, 11.
- [99] Zhang L., Yang D., Yang S., Zou B., (2014) “Solution-processed P3HT-based photodetector with field-effect transistor configuration” *Applied Physics. A*, 116 ,1511–1516.

- [100] Bao Z., Locklin J., (2007) "Organic Field-Effect Transistors" CRC Press, 1st Edition, New York
- [101] Zhang Y. A., Blom P. W. M, (2010) "Enhancement of the hole injection into regioregular poly(3-hexylthiophene) by molecular doping" Applied Physics Letters, 97, 083303.
- [102] Veldman D., Ipek O., Meskers S. C. J., Sweelssen J., Koetse M. M., Veenstra S. C., Kroon J. M., van Bavel S. S., Loos J., Janssen R. A. J. (2008) "Compositional and electric field dependence of the dissociation of charge transfer excitons in alternating polyfluorene copolymer/fullerene blends", Journal of the American Chemical Society, 130 (24) 7721–7735.
- [103] Mandoc M. M., Kooistra F. B., Hummelen J. C., Boer B. de, Blom P. W. M. (2007) "Effect of traps on the performance of bulk heterojunction organic solar cells" Applied Physics Letters, 91, 263505.
- [104] Shang L., Liu M., Tu D., Liu G., Liu X., Ji Z., (2009) "Low-Voltage Organic Field-Effect Transistor With PMMA/ZrO Bilayer Dielectric" IEEE Transactions on Electron Devices, 56,3.
- [105] Kraus M., Richler S., Opitz A., Brutting W., Haas S., Hasegawa T., Hinderhofer A., Schreiber F. (2010) "High-mobility copper-phthalocyanine field-effect transistors with tetratetracontane passivation layer and organic metal contacts" Journal of Applied Physics, 107, 094503.
- [106] . Korodi I. G, Lehmann D., Hietschold M., Zahn D. R. T. , "Improving the mobility of CuPc OFETS by varying the preparation conditions" Applied Physics A, 111, (3), 767-773.
- [107] Tanase C., Meijer E.J., Blom P.W.M., De Leeuw D.M., (2003) "Unification of the Hole Transport in Polymeric Field-Effect Transistors and Light-Emitting Diodes" Physical Review Letters, 91, (21), 216601.
- [109] Chen C., Liu F., Wang C., Nakahara A., Russell T. P., (2011) "Bulk heterojunction photovoltaic active layers via bilayer interdiffusion" Nano Letters, 11, 2071.

ÖZGEÇMİŞ

Zühal ALPASLAN KÖSEMEN 14.05.1983 tarihinde İstanbul'da doğdu. İlk ve ortaokulu Beyoğlu Cihangir İlköğretim Okulu'nda, Lise öğrenimini Şişli Kurtuluş Lisesi'nde tamamladı. 2001 yılında liseden mezun olduktan sonra aynı yıl İstanbul Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'ne kaydoldu. Mezun olduktan sonra 2007 yılında yüksek lisansa, 2009 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında doktora başladı. Evli ve bir çocuğu vardır.

