

T.C.

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİLİKON ALTTABAN ÜZERİNDE ÜRETİLEN
ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLER
VE KARAKTERİZASYONLARI

FATİH ÖNAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE

2011

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİLİKON ALTTABAN ÜZERİNDE ÜRETİLEN
ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLER
VE KARAKTERİZASYONLARI

FATİH ÖNAL
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Prof.Dr. Sait Eren SAN

GEBZE

2011




YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 17/06/2011 tarih ve 2011/20... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 24/06/2011 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Fatih ÖNAL.....'in tez çalışması FİZİK..... Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE


(TEZ DANIŞMANI) :

Prof. Dr. Serhat Emir Say


ÜYE

: Yard. Doç. Dr. Fikret Yılmaz


ÜYE

: Yard. Doç. Dr. Mustafa Okuyan


ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../20... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZ BAŞLIĞI: SİLİKON ALTTABAN ÜZERİNDE ÜRETİLEN ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLER VE KARAKTERİZASYONLARI

TEZ YAZARI: FATİH ÖNAL

Organik alan etkili transistörler (OFET) akıllı pikseller, radyo frekansı ile tanımlama etiketleri, elektronik kartlar için sürücüler ve düz panel ekranların sürücü devreleri gibi ucuz maliyetli elektronik uygulamaların önünü açabilecek potansiyele sahiptirler. Klasik alan etkili transistörlerde aktif katman olarak silisyum gibi anorganik yarıiletken malzemeler kullanılırken, OFET’lerde organik yarıiletken malzemeler kullanılır. Poli (3-hegziltiyofen) (P3HT) çözelti bazlı kaplanabilmesi ve düşük maliyetli sebebiyle çok kullanılan bir organik yarıiletkenidir. Ek olarak, hem üzerindeki oksit tabakasının kaliteli olması hem de ticari olarak erişimin kolay olmasından dolayı silikon alt-tabanlar OFET fabrikasyonlarında çok kullanılan malzemelerdir.

Bu tez çalışmasında, iki farklı yüksek katkılı silikon alt-taban (n-tip, 100nm termal-oksit ve p-tip, 500nm termal-oksit) üzerinde organik alan etkili transistörler büyütülmüş ve karakterize edilmiştir. Karakterizasyon sonucunda eşik voltajları, akım açık/kapalı oranları ve yük-taşıyıcı mobiliteleri elde edilmiş ve birbirleri ile kıyaslanmıştır. Tüm karakterizasyon işlemleri Keithley 4200SCS cihazı ile yapılmıştır.

SUMMARY

TITLE: ORGANIC FIELD EFFECT TRANSISTORS WHICH WERE FABRICATED ON SILICON WAFERS AND THEIR CHARACTERIZATIONS

AUTHOR: FATİH ÖNAL

Organic field-effect transistors (OFETs) have potential to lead up low-cost electronic applications such as: smart pixels, radio frequency identification tags, drivers for electronic papers, and driving circuits for flat-panel displays. Where inorganic semiconductors such as silicon were used in fabrication of classical field-effect transistors as the active layer, organic semiconductors were used in fabrication of OFETs. poly(3-hexylthiophene) (P3HT) is a commonly used organic semiconductor because of its low-cost fabrication and possibility of solution based coating. In addition, silicon wafers are commonly used materials because of its both high quality oxide layer and commercially availability.

In this thesis, organic field-effect transistors were grown on two different, highly doped silicon wafers (n-type 100nm thermally-oxide and p-type and 500nm thermally-oxide) and characterized. As a result of characterization, threshold voltages, current on/off ratios and charge carrier mobilities were obtained and compared with each other. All characterizations made by Keithley 4200 SCS device.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada deney ortamının sağlanmasından teorik yardıma kadar her aşamada destek olan değerli hocalarım Prof.Dr. Sait Eren SAN, Doç.Dr. Yusuf YERLİ ve Yrd.Doç.Dr. Mustafa OKUTAN'a teőekkürü bir borç bilirim.

alışmalar sırasında desteğini ve yardımını esirgemeyen değerli arkadaşlarım Ahmet DEMİR, Arif KÖSEMEN ve Hasan TÜRKAN'a teşekkür ederim. Ayrıca bu tezin yazımındaki destek ve yardımlarından dolayı değerli arkadaşlarım Zühal ALPARSLAN ve Emel Bahar KAYA'ya teşekkür ederim.

Son olarak, ellerindeki tüm olanakları benim için kullanan annem, babam ve kardeşlerime ne kadar teşekkür etsem azdır.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1. Yarıiletkenler	1
1.2. Organik Yarıiletkenler	4
1.3. Organik Yarıiletken Malzemeler	5
1.4. Organik Yarıiletkenlerin Temel Özellikleri	7
1.4.1. Optiksel Özellikler	8
1.4.2. Yük Taşıyıcı İletimi	9
2. ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLER (OFET)	13
2.1. Transistörler	13
2.2. Organik Transistörler	15
2.3. Organik İnce-Film Transistör Mimarisi	16
2.4. OFET'lerin Çalışma Prensibi ve Parametreleri	17
2.5. İletken Kanalın Kalınlığı	21
2.6. Fabrikasyon Teknikleri	26
2.7. OFET Fabrikasyonlarında Kullanılan Malzemeler	28
2.7.1. Polimerler	29

2.7.2. Küçük Moleküller	29
2.7.3. n-Tip Yarıiletkenler	29
2.7.4. Tek Kristaller	30
2.7.5. Yalıtkanlar	31
3. DENEYSEL YÖNTEM	34
3.1. Silikon Alt-Tabanın Temizlik Aşamaları	34
3.2. Döndürerek Kaplama Yöntemi İle rr-P3HT Filmi Büyütme	34
3.3. Elektrotların Kaplanma İşlemi	36
3.4. Karakterizasyon	37
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	38
4.1. Si/100nm-SiO ₂ /rr-P3HT OTFT 'nin Çıktı (I-V) Karakteristiği	38
4.2. Si/100nm-SiO ₂ /rr-P3HT OTFT 'nin 1. İletim Karakteristiği	39
4.3. Si/100nm-SiO ₂ /rr-P3HT OTFT 'nin 2. İletim Karakteristiği	40
4.4. Si/500nm-SiO ₂ /rr-P3HT OTFT 'nin Çıktı (I-V) Karakteristiği	41
4.5. Si/500nm-SiO ₂ /rr-P3HT OTFT 'nin 1. İletim Karakteristiği	42
4.6. Si/500nm-SiO ₂ /rr-P3HT OTFT 'nin 2. İletim Karakteristiği	43
4.7. Kaynak-Oluk Arasının Elektron Mikroskopu Görüntüleri	44
5. SONUÇ VE YORUM	45
5.1. Si/100nm-SiO ₂ /rr-P3HT Çıktı (I-V) Karakteristiği	45
5.2. Si/100nm-SiO ₂ /rr-P3HT İletim Karakteristikleri	45
5.3. Si/500nm-SiO ₂ /rr-P3HT Çıktı (I-V) Karakteristiği	45
5.4. Si/500nm-SiO ₂ /rr-P3HT İletim Karakteristikleri	46
5.5. I _{on} /I _{off} Değerleri	46
5.6. Eşik Voltajları (V _T)	46
5.7. Mobiliteler	47

	X
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ	53

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Amper
V	: Uygulanan Voltaj
T	: Sıcaklık
$^{\circ}\text{C}$: Santigrat
$^{\circ}\text{K}$: Kelvin
k	: Boltzman Sabiti
s	: Saniye
E	: Elektrik Alan
j	: Akım Yoğunluğu
E_g	: Yarıiletken Band Aralığı
N_0	: Etkin Durum Yoğunluğu
n	: Toplam Yük Taşıyıcı Yoğunluğu
n_i	: Kendiliğinden Yük Taşıyıcı Yoğunluğu
d	: Katman Kalınlığı
C_i	: Birim Alan Başına Kapasitans
μ	: Yük-Taşıyıcı Mobilitesi
v	: Yük-Taşıyıcıların Sürüklenme Hızları
q	: Elektronun Yükü
ρ	: Yük Dağılımı
ϵ_s	: Elektriksel Geçirgenlik
L_D	: Debye Uzunluğu
I_g	: Bir İzole Molekülün İyonlaşma Potansiyeli
I_c	: Bir Moleküler Kristalin İyonlaşma Potansiyeli

A_g	: Bir İzole Molekülün Elektron İlgisi
A_c	: Bir Moleküler Kristalin Elektron İlgisi
V_{GS}	: Kapı-Kaynak (Gate-Source) Voltajı
V_{DS}	: Oluk-Kaynak (Drain-Source) Voltajı
V_T	: Eşik (Thershold) Voltajı
I_{DS}	: Kaynak-Oluk Akımı
I_{on}/I_{off}	: Açık/Kapalı Akım Oranı
OFET	: Organik Alan Etkili Transistör (Organic Field Effect Transistor)
OTFT	: Organik İnce-Film Transistör (Organic Thin-Film Transistor)
OLED	: Organik Işık Yayan Diyot (Organic Light Emitted Diode)
OPVC	: Organik Fotovoltaik Hücre (Organic Photovoltaic Cell)
TFT	: İnce-Film Transistör (Thin-Film Transistor)
MOSFET	: Metal Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
AM-LCD	: Aktif-Matriks Sıvı-Kristal Ekran (Active-Matrix Liquid-Crystal Display)
Si	: Silikon
SiO_2	: Silikon Dioksit
a-Si:H	: Hidrojenle Birleştirilmiş Silisyum
rr-P3HT	: Düzenli (regio-regular) Poli(3-hegziltiyofen)
P3AT	: Poli(3-alkiltiyofen)
PTV	: Poli-p-fenilenvinilen
PMMA	: Poli(metil metakrilat)
SAM	: Kendiliğinden Oluşan Tek Katman (Self-Essemble Monolayer)
PF	: Polifloren

- CMOS : Bütünleyici Metal-Oksit Yarıiletken (CMOS)
- PCBM : 6,6-fenil C61-bütiric asit metil ester
- PFO : Poli(3-alkiltiyofen)
- Alq₃ : Tris(8-hidroksikuinolin)alüminyum
- CuPc : Bakır Fitalosiyen

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Bir metalin, bir yalıtkanın ve bir katlılı yarıiletkenin enerji diyagramları	2
1.2. Katlılı bir yarıiletkenin iletkenliğinin sıcaklık bağımlılığının Arrhenius eğrisi	3
1.3. En basit konjüge π -elektron sistemi olan etilen molekülünün σ ve π bağları (sol) ve π -konjüge molekülün enerji seviyeleri (sağ)	6
1.4. Bazı prototip organik yarıiletkenlerin moleküler yapıları: PPV: poli(p-fenilvinilen), PFO: poli(3-alkiltiyofen), Alq ₃ : tris(8-hidroksikuinoli)alüminyum, fulleren C ₆₀ , CuPc: Cu-fitalosiyen, pentasen	7
1.5. Farklı fazlardaki organik moleküllerin optiksel spektralarının şematik görünümü. Δ_1 ve Δ_2 çözelti ve katıhaldeki solvent kaymalarını belirtir	8
1.6. Bir organik molekülün enerji Bir organik molekülün enerji seviyeleri şeması (sol: singlet manifold, sağ: triplet manifold) Düz çizgiler ışımali, kesik çizgiler ışımaz geçişleri gösterir	9
1.7. Bir izole molekül (sol) ve bir moleküler kristalin (sağ) enerji seviyeleri. I _g ve I _c izole molekül ve moleküler kristalin iyonlaşma potansiyelleri; A _g ve A _c elektron ilgilidir. P _e ve P _h elektron ve boşluk için kutuplanma enerjileridir.	10
1.8. Bir izole molekülün (sol), bir moleküler kristalin (orta) ve bir amorf katının (sağ) enerji seviyeleri	11
2.1. npn ve pnp yapılarına sahip transistörler	14
2.2. OTFT yapısının şematik gösterimi. İki cihaz da üst-kapı yapısına sahiptir. (a): Alt-kontak; (b): Üst-kontak	16
2.3. OTFT'nin tipik çıktı ve iletim karakteristikleri	17
2.4. Doğrusal rejimde kanal yapısı ve I _{DS} akımı	18
2.5. Kıstırılma rejiminde kanal yapısı ve I _{DS} akımı	19
2.6. OTFT'nin tipik çıktı (a) ve iletim (b) karakteristikleri	19
2.7. Pentasen'in kristal yapısı	21
2.7. Bir OTFT'nin iletken kanalına dik yük dağılımı	23

2.9.	İki farklı kapasitans değeri için yalıtan-yarıiletken arayüzüne düşen potansiyelin kapı voltajına göre değişimi	24
2.10.	Birinci tabakanın yoğunluğunun toplam yoğunluğa oranının toplam yoğunluğun ve kapı voltajının fonksiyonu olarak değişimi	25
2.11.	"Edge-on" yönelimine sahip rr-P3HT molekülü	29
2.12.	Tetrasen (sol) ve rubren (sağ) kristallerinin moleküler yapıları	31
2.13.	OTFT fabrikasyonlarında kullanılan kapı-dielektriklerinin sınıflandırılmış şekli ile şematik görünümü	32
3.1.	Termal-oksitlenmiş, yüksek katkılı Si alt-tabanların profil görünümü	34
3.2.	rr-P3HT'nin molekül yapısı	35
3.3.	Si /SiO ₂ /rr-P3HT yapısının profil görünümü	35
3.4.	Vakum buharlaştırma sistemi ve kullanılan maskenin görüntüleri	36
3.5.	Ag ve rr-P3HT'nin enerji seviyeleri şeması	36
3.6.	OTFT'nin sol halinin profil görünümü	37
3.7.	Elektriksel karakterizasyon sistemi	37
4.1.	Si/100nm-SiO ₂ /rr-P3hT OTFT 'nin Çıktı (I-V) Karakteristiği	38
4.2.	Si/100nm-SiO ₂ /rr-P3hT OTFT 'nin 1. İletim Karakteristiği	39
4.3.	Si/100nm-SiO ₂ /rr-P3hT OTFT 'nin 2. İletim Karakteristiği	40
4.4.	Si/500nm-SiO ₂ /rr-P3hT OTFT 'nin Çıktı (I-V) Karakteristiği	41
4.5.	Si/500nm-SiO ₂ /rr-P3hT OTFT'nin 1.İletim Karakteristiği	42
4.6.	Si/500nm-SiO ₂ /rr-P3hT OTFT'nin 2.İletim Karakteristiği	43
4.7.	Kaynak-oluk arasının (iletken kanal) elektron mikroskopu görüntüleri	44

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. İlk beş polyasen'in ana absorpsiyon piklerinin dalga boyları ile birlikte molekül yapıları	6
2.1. Bazı anorganik dielektrik malzemeler	33
5.1. Sonuçlar Çizelgesi	48

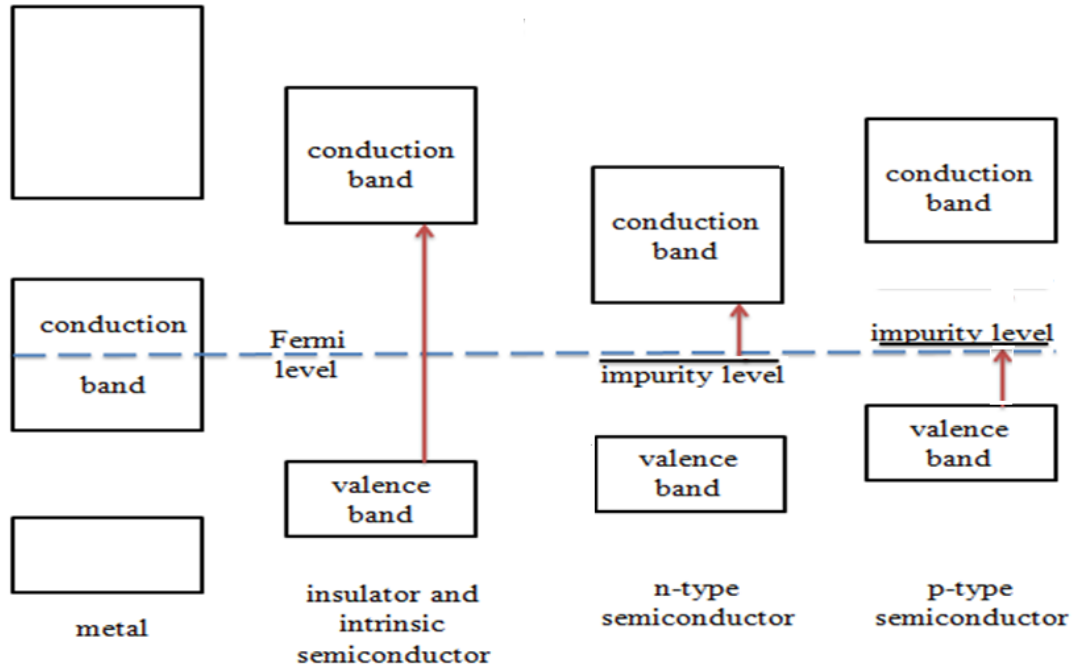
1. GİRİŞ

1.1. Yarıiletkenler

Aslında, ilk sorulması gereken soru "yarıiletken nedir?" sorusudur. Sözlükte bir yarıiletken "Elektriksel iletkenliği bir yalıtkan ile bir iletkenin elektriksel iletkenlikleri arasında olan, metal olmayan katıdır." şeklinde tanımlanır. Kelimenin ilk çıkış noktası 1911 tarihidir [1]. O tarihte katının elektriksel iletkenliği tam olarak bilinmiyordu. Klasik fizik metallerin iletkenliklerini tanımlayabiliyordu, ancak bu tanımlama metal olmayan katı malzemelerin (silikon ve benzerleri, oksitler ve sülfatlar) anormal davranışlarını açıklayamıyordu. Sıcaklık ile iletkenliğin doğru orantılı olması, fotoiletkenlik, rektifikasyon ve fotovoltaj etkiler gibi etkilerin gözlemlendiği bu anormal malzemeler için "yarıiletkenler" tabiri kullanılmaya başlandı. Bu anormallikler ancak kuantum mekaniğinin ilerlemesi ve takiben katıların band teorisinin geliştirilmesi ile açıklanabilmiştir [2]. Yarıiletkenlerin modern bir sözlükteki tanımı: "Bir yarıiletken çok düşük sıcaklıklarda bir yalıtandır, fakat onun oda sıcaklığında yüksek bir elektriksel iletkenliği vardır. Bir yalıtkan ile bir yarıiletken arasındaki fark çok iyi tanımlanamaz, ancak kabaca bir yarıiletken yeterince düşük band aralığına sahip bir yalıtandır ve iletkenlik bandı oda sıcaklığında yeteri kadar doludur." [3].

Yukarıdaki tanımlama aslında kendiliğinden (intrinsic) yarıiletkenler için geçerlidir. Yarıiletkenleri elektronikte bu kadar kullanışlı yapan özellik, bu malzemelerin elektronik özelliklerinin düzgün seçilen, az miktardaki safsızlık katkıları ile kontrollü bir şekilde değiştirilebilmesidir. Bu sürece katkılama süreci denir; katılan yarıiletkenlerde dış kaynaklı (extrinsic) yarıiletkenler denir.

Kendiliğinden ve dış kaynaklı yarıiletkenler arasındaki fark metallerin, yalıtkanların ve yarıiletkenlerin enerji diyagramlarını gösteren Şekil 1.1.'de gösterilmiştir. Bu şekil katıların kabul görmüş band yapılarının şeklidir.

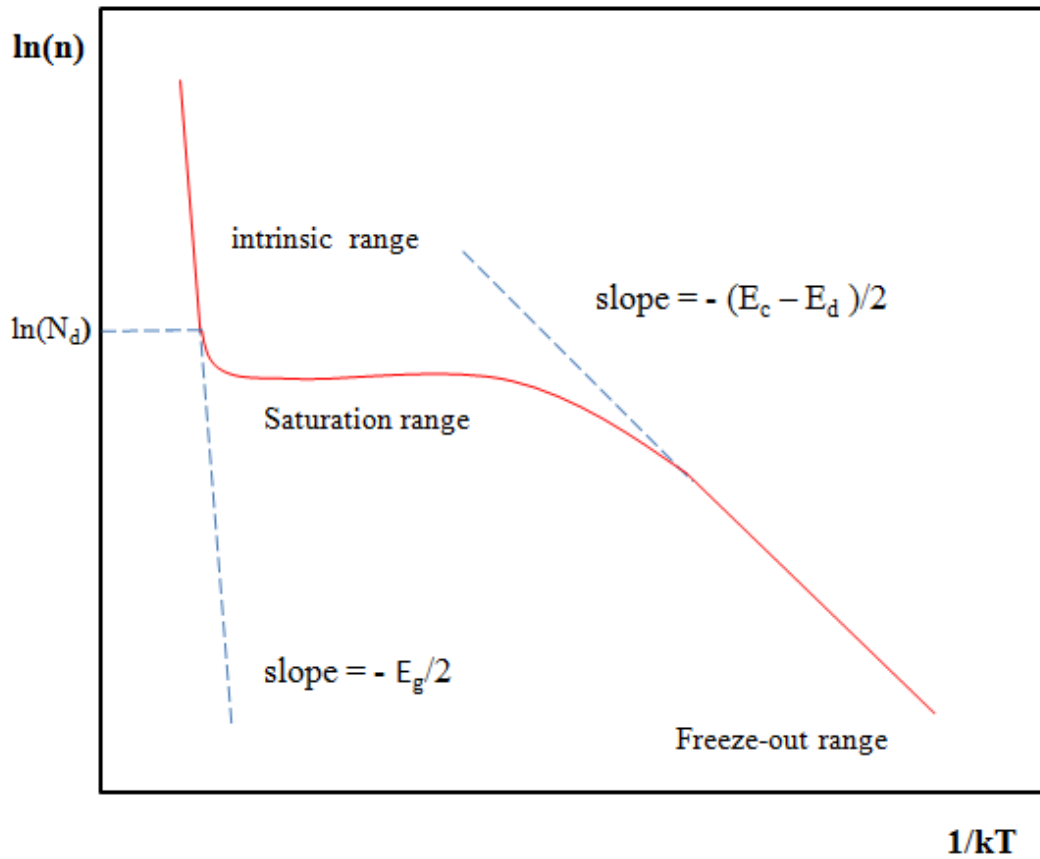


Şekil 1.1. Bir metalin, bir yalıtkanın ve bir katlılı yarıiletkenin enerji diyagramları [4]

Teori, iletkenlik bandı kısmen dolu olan metal ile valans bandı dolu, iletkenlik bandı tamamen boş olan yalıtkan arasındaki farkı açıklar. Bir yalıtkan ancak ve ancak $T=0$ °K'de tamamen yalıtıcıdır. Sıcaklık artar artmaz, elektronlar valans bandından iletkenlik bandına termal olarak uyarılırlar. Elektriksel iletkenliğin kısmen dolu bantlarda meydana gelmesinden dolayı her iki band da iletkenliğe katkıda bulunur. Termal enerjinin düşük olmasından dolayı (oda sıcaklığında $kT=25$ meV) termal olarak aktifleşmiş iletim sadece düşük band aralığına sahip yalıtkanlarda ve kendiliğinden yarıiletkenlerde görülür.

Bir yarıiletkeni katkılamak, o yarıiletkenin valans bandının (p-tip katkılama) veya iletkenlik bandının (n-tip katkılama) kenarlarına yakın yerel (lokalize) enerji seviyeleri oluşturmaktır. Böylece, bir elektronu (boşluğu) iletkenlik (valans) bandına indüklemek için gerekli enerji termal enerji ile kıyaslanabilir seviyeye düşürülür. Doplunmuş (dış kaynaklı) tipik bir yarıiletkenin iletkenliğinin sıcaklık bağımlılığı Şekil 1.2.'de gösterilmiştir. Eğri üç farklı bölgeyi içerir. Yüksek sıcaklıklarda kendiliğinden bölge termal aktifleşmiş davranış ile karakterize edilir. Ara bölgeye doyum (veya tükenme) bölgesi denir. Bu bölgede iletkenlik pratik olarak sıcaklıktan bağımsızdır. Son bölge düşük sıcaklıklarda yük-taşıyıcılarının hareketsiz olduğu bölgedir. Elektronik cihazlar için önemli olan bölge yük-taşıyıcı yoğunluğunun katkılamaya eşit olduğu bölge olan doyum bölgesidir.

Bu aşamada not edilmesi gereken ana unsur katkılamamanın yüksek saflıkta olması gerektiğidir. Aslında mikro-elektronikte kullanılan silikon ve diğer birkaç bileşik haricinde, birçok yarıiletken eşit miktarda n-tip ve p-tip katkı safsızlıkları içerir; kompanse malzeme olarak adlandırılan bu malzemeler kendiliğinden yarıiletken gibi davranırlar. Hemen hemen bütün organik yarıiletkenler bu kategoridedir. Özellikle, organik yarıiletkenlerdeki katkılama etkileri yüksek yoğunluklu katkılamada görülebilir (yüzde bir kaç). Bu seviyelerde katkılanmış organik yarıiletkenler yarıiletkenden çok iletkenlerdir ve elektronik cihaz yapmak için uygun değildirler.



Şekil 1.2. Katlılı bir yarıiletkenin iletkenliğinin sıcaklık bağımlılığının Arrhenius eğrisi [4]

Sonuç olarak, organik yarıiletkenler yarıiletkenlerden çok yalıtkanlara yakındır. Birçok iddiaya rağmen, organik yarıiletkenlere mikro-elektronik derecesinde katkılama yapılabilme imkânı henüz yoktur. Çünkü bu malzemelerin safsızlıkları hala çok düşüktür.

1.2.Organik Yarıiletkenler

20. yüzyılın ortalarında transistörün icadı ile birlikte Silisyum, Germanyum gibi anorganik yarıiletkenler elektronik teknolojisinde baskın şekilde kullanılmaya başlanmıştır. 20. yüzyılın sonlarında katıhal cihazlarının vakup-tüpü bazlı cihazların yerini alması ile mikro-elektronik teknolojisi bugünkü haline almıştır. 21. yüzyılın başında yeni bir elektronik devrim yapacak niteliğe sahip bir yarıiletken malzeme türü olan organik yarıiletken malzemeler keşfedilmiştir. Bu malzemelerden organik güneş hücreleri, düşük maliyetli entegre devreler, geniş alanlı ve esnek ışık kaynakları ve ekranlar, organik diyotlar ve transistörler gibi elektronik cihazların üretilebileceği düşüncesi bu alandaki çalışmaları kamçulamış, bu alanda muazzam gelişmeler olmasını sağlamıştır.

Organik yarıiletkenler bahsi tamamen yeni değildir. Antrasen kristalinin (bir organik yarıiletken prototipi, [5]) fotoiletkenliği üzerindeki çalışmalar 20. yüzyılın başlarına kadar uzanır [6,7]. Daha sonraları, 1960'larda, elektrolüminesansın keşfi ile moleküler kristaller bilim adamları tarafından daha derin şekilde araştırılmıştır. Bu araştırmalar yük taşıyıcı iletimi ve optiksel uyarımları içeren temel süreçleri kapsamaktadır [8,9].

1970'lerde, konjüğe polimerlerin başarılı sentezi ve kontrollü katkılanması ile ikinci önemli organik yarıiletken türü elde edilmiştir [10]. Bu alandaki çalışmalarından dolayı Alan J. Heeger, Alan G. MacDiarmid ve Hideki Shirakawa 2000 yılında Nobel Kimya Ödülü'ne layık görülmüşlerdir. Organik fotoiletkenler (doplanmış polimerler) ile birlikte bu iletken polimerler elektrofotolitografide fotoreseptör veya iletken kaplama olarak kullanılmaya başlanmıştır [11].

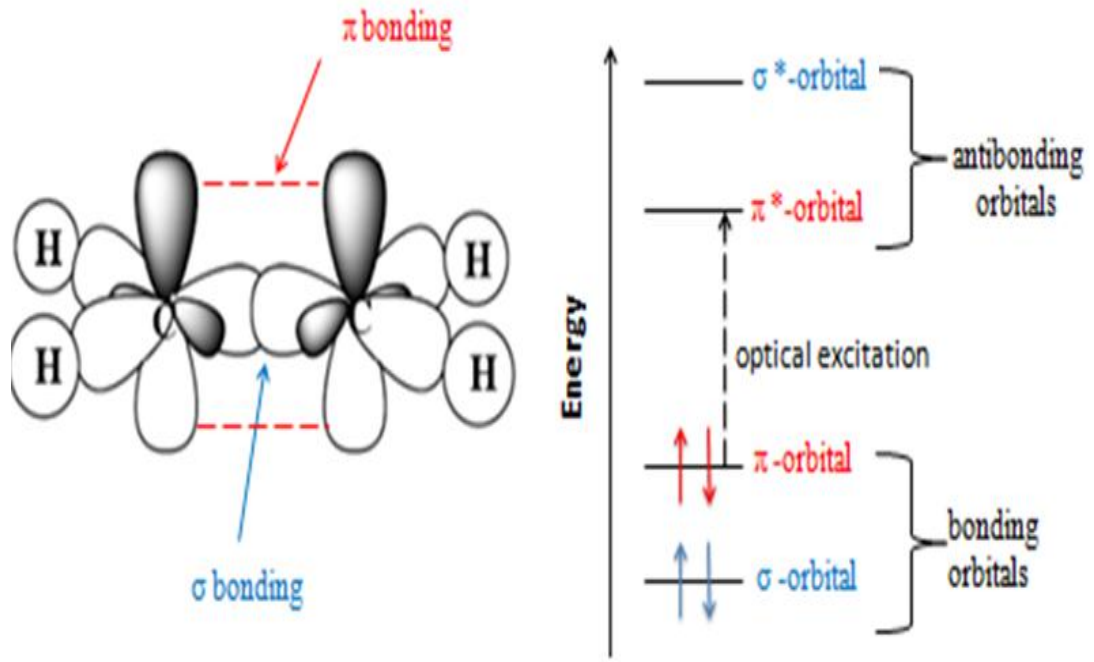
1980'lerde p-tip ve n-tipi organik yarıiletkenlerin birleştirilmesi ile oluşan hetero-eklem güneş pillerinin ve konjüğe polimerler ve oligomerlerden oluşan ince-film transistörlerin üretilmesi ile doplanmamış organik yarıiletkenlere ilgi tekrar canlanmıştır. Ancak asıl teşvik edici olay, vakum-buharlaştırma tekniği ile kaplanan moleküler-filmlerden ve konjüğe polimerlerden yüksek performanslı ışık veren diyotların üretilmesidir. Son 15 sene boyunca akademik ve endüstriyel araştırmaların neticesinde organik ışık veren diyotlar (OLED) üzerindeki çalışmalar hızlı bir şekilde ilerlemiş ve ilk ticari amaçlı OLED ekran üretilmiştir [12]. Organik yarıiletkenlerin

diğer uygulamaları organik alan-etkili transistörler (OFET) ve organik fotovoltaiik hücrelerdir (OPVC).

1.3.Organik Yarıiletken Malzemeler


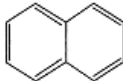
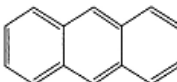
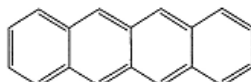
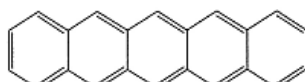
Yukarıda bahsedildiği gibi, organik yarıiletkenler iki ana sınıfta toplanırlar: Düşük molekül ağırlıklı malzemeler ve polimerler. Her iki sınıfın da molekül sistemlerindeki sp^2 hibritleşmesi yapmış Karbon atomlarının P_z orbitalleri tarafından oluşturulmuş konjüge π -elektron sistemleri vardır (Şekil 1.3.). Moleküllerin omurgalarındaki π -bağları σ -bağlarına göre daha zayıftır. Bundan dolayı, konjüge moleküllerin en düşük elektronik uyarımları görünür spektral bölgede ışık absorpsiyonu ve yayılımı yapmayı mümkün kılan bir enerji aralığına sahip (1,5-3 eV) π - π^* geçişleridir. Çizelge 1.1.'de görüldüğü gibi polyasen ailesinin enerji aralığı molekül içindeki konjügasyon derecesi ile kontrol edilebilir. Bundan dolayı kimya bilimi organik yarıiletken malzemelerin opto-elektronik özelliklerinin değiştirilebilmesi için geniş imkânlar sunar. Şekil 1.4.'de bazı prototip malzemeler gösterilmiştir.

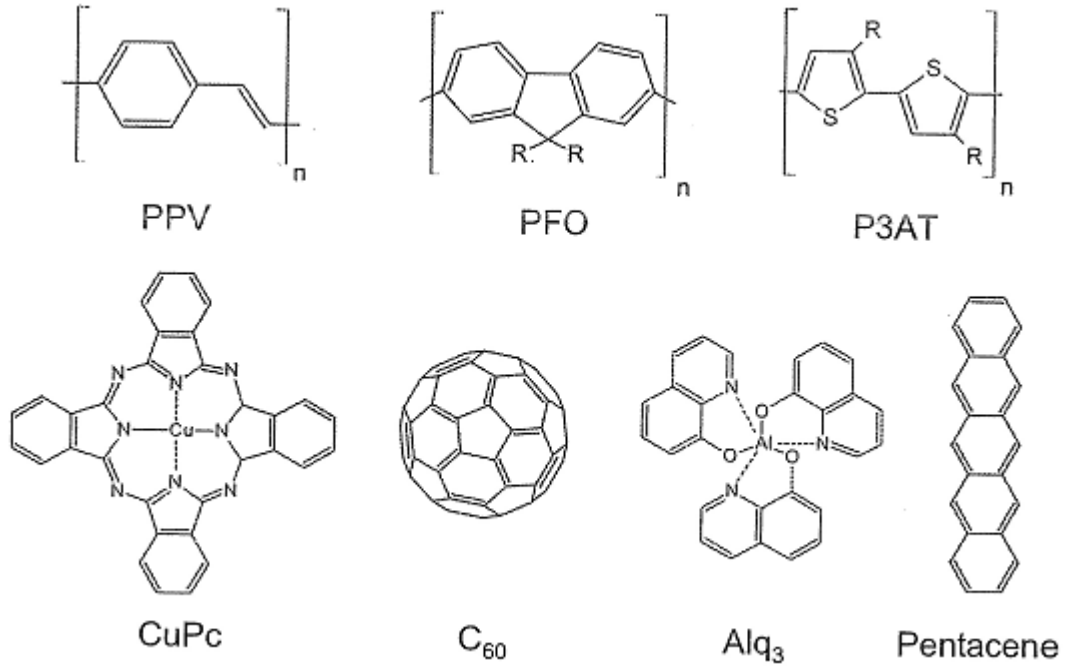
İki ayrı sınıfta topladığımız organik yarıiletkenlerin ince-film şekline dönüşüm işlemleri farklıdır. Küçük moleküller genellikle sublimasyon veya buharlaştırma tekniği ile kaplanırlar. Konjüge polimerler ise döndürerek kaplama (spin-coating) veya baskı (print) teknikleri gibi çözelti bazlı teknikler ile kaplanabilirler. Bu kontrollü büyütme teknikleri ile yüksek düzenli ince filmler üretebilme amacına yönelik akademik çalışmalar hala sürmektedir.



Şekil 1.3. En basit konjüge π -elektron sistemi olan eten molekülünün σ ve π bağları (sol) ve π -konjüge molekülün enerji seviyeleri (sağ) [4]

Çizelge 1.1. İlk beş polyasen'in ana absorpsiyon piklerinin dalga boyları ile birlikte molekül yapıları [9]

Molecule	Structure	Absorption Maximum
Benzene		255 nm
Naphthalene		315 nm
Anthracene		380 nm
Tetracene		480 nm
Pentacene		580nm



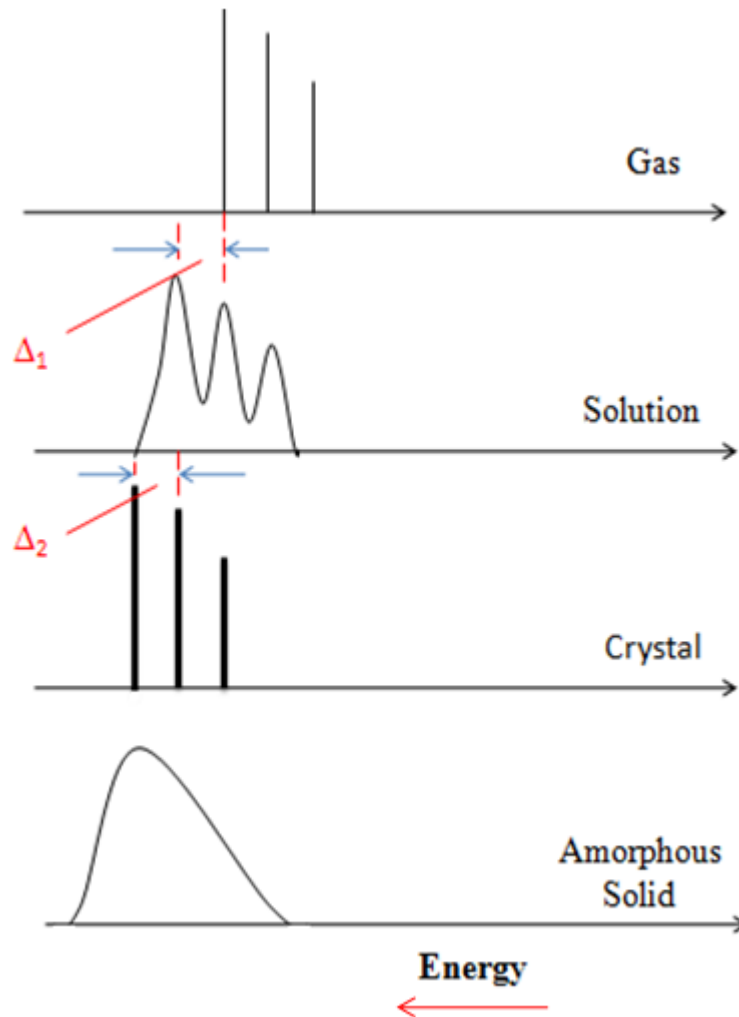
Şekil 1.4. Bazı prototip organik yarıiletkenlerin moleküler yapıları: PPV: poli(p-penilenvinilen), PFO: poly(3-alkiltiyofen), Alq₃: tris(8-hidrosikuinolin)alüminyum, fulleren C₆₀, CuPc: Bakır fitalosiyen, pentasen [13]

1.4. Organik Yarıiletkenlerin Temel Özellikleri

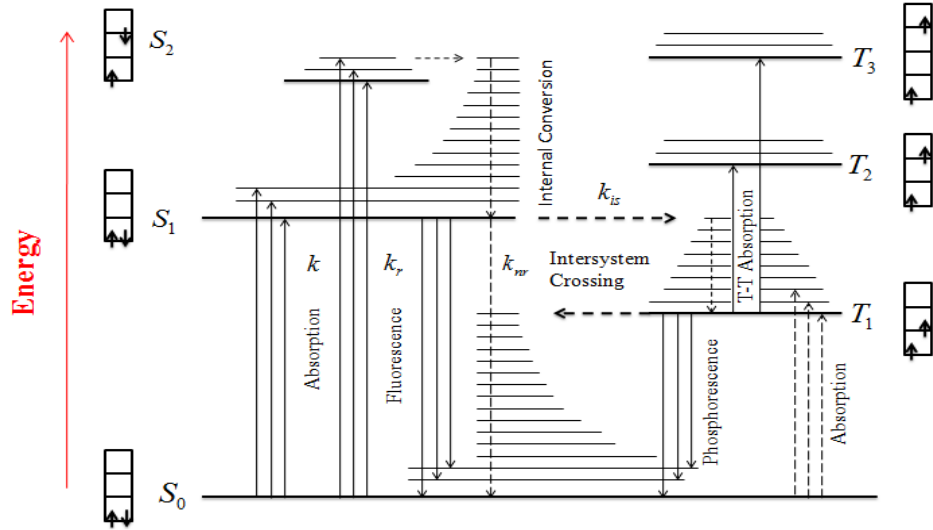
Organik yarıiletkenlerdeki bağlar anorganik yarıiletkenlerdeki bağlardan farklıdır. Organik moleküler kristaller van der Waals bağlı katılardır ve Si gibi kovalent bağlı yarıiletkenler ile kıyaslandığında moleküller arası bağlar daha zayıftır. Organik moleküler kristallerdeki bu van der Waals bağları malzemenin mekanik ve termodinamik özelliklerini belirler. Bu özellikler anorganik emsallerine göre daha düşük dayanıklılık, düşük erime noktası, en önemlisi de optik özellikler ve yük taşıyıcı iletimi ile direkt ilgili özellik olan komşu moleküller arasındaki elektronik dalga fonksiyonlarının düşük delokalizasyonudur. Polimerlerde bu durum biraz farklıdır, çünkü polimer zincirlerinin morfolojisi mekanik özellikleri değiştirebilir. Yine de, bu tür malzemelerde komşu zincirler arasındaki elektronik etkileşim düşüktür.

1.4.1. Optiksel Özellikler

Düşük elektronik delokalizasyondan dolayı birinci dereceli optik absorpsiyon ve organik moleküler katının lüminesans spektraları gaz fazın ve çözeltinin spektraları ile benzerdir (spektradaki önemsiz solvent kayması dışında). Özellikle, katıhal spektrasında moleküler titreşimler önemli rol oynarlar ve çoğu kez bu titreşim modları oda sıcaklığında bile gözlemlenebilir. Yine de katıhal spektrası seçim kuralları, salınım şiddeti, enerjik konum gibi detaylarına ayrılabilir; ayrıca, kristal yapısından veya polimer zincirinin diziliminden dolayı bir anizotropiden bahsedebiliriz. Bununla birlikte, düzensiz organik katılar genellikle kayda değer bir spektral genişleme sergilerler. Bu, şekil 1.5.'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Farklı fazlardaki organik moleküllerin optiksel spektralarının şematik görünümü. Δ_1 ve Δ_2 çözelti ve katıhaldeki solvent kaymalarını belirtir [14]



Şekil 1.6. Bir organik molekülün enerji seviyeleri şeması (sol: singlet manifold, sağ: triplet manifold) Düz çizgiler ışımali, kesik çizgiler ışımaz geçişleri gösterir [9].

Düşük elektronik delokalizasyonunun bir sonucu olarak organik yarıiletkenlerin iki önemli özelliği ortaya çıkar. Bunlardan ilki, foto-fiziksel özellikler bakımından önemli sonuçlar doğuran iyi tanımlanmış spin durumlarının (singlet ve triplet) olmasıdır (Şekil 1.6.). Bununla birlikte sistemler arası zayıf bir geçiş süreci vardır. Bu olay OLED'lerdeki elektrolüminesans kuantum verimliliğinin üst sınırını belirler. Diğer önemli özellik ise optiksel eksitonların (exciton) genellikle bir molekül çevresinde lokalize olmasıdır. Bu lokalizasyon sonucunda eksiton bağlanma enerjileri tipik olarak 0,5 ile 1 eV arasında olur. Bu nedenle, organik fotovoltaik hücrelerde birbirinden bağımsız pozitif ve negatif yük taşıyıcıları üretebilmek için bu bağlanma enerjilerini aşmak gerekir.

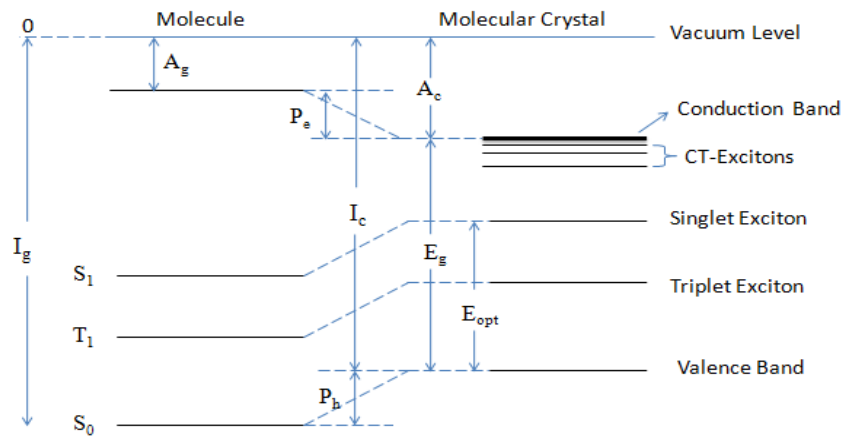
1.4.2. Yük Taşıyıcı İletimi

Organik moleküler katılarda elektron ve boşluk (hole) iletimi iyonik moleküler durumlar göz önüne alınarak incelenir. Örneğin, bir boşluk oluşturmak için nötral bir M molekülünden bir elektron alınır. Bu durumda bir radikal M⁺ kasyonu oluşur. Böylece, bu boşluk bir molekülden diğer moleküle hareket edebilir. Aynı şekilde, elektron iletimi negatif yüklenmiş radikal M⁻ anyonu oluşturmak ile mümkündür (nitelik olarak aynı argümanlar polimerler için de geçerlidir, polimerlerde yüklü durumlara pozitif veya negatif polaron denir). Gaz fazındaki izole moleküllerle kıyaslandığında, katıda iyonik durumlar stabilize edilir. Bunun nedeni Şekil 1.7.'deki

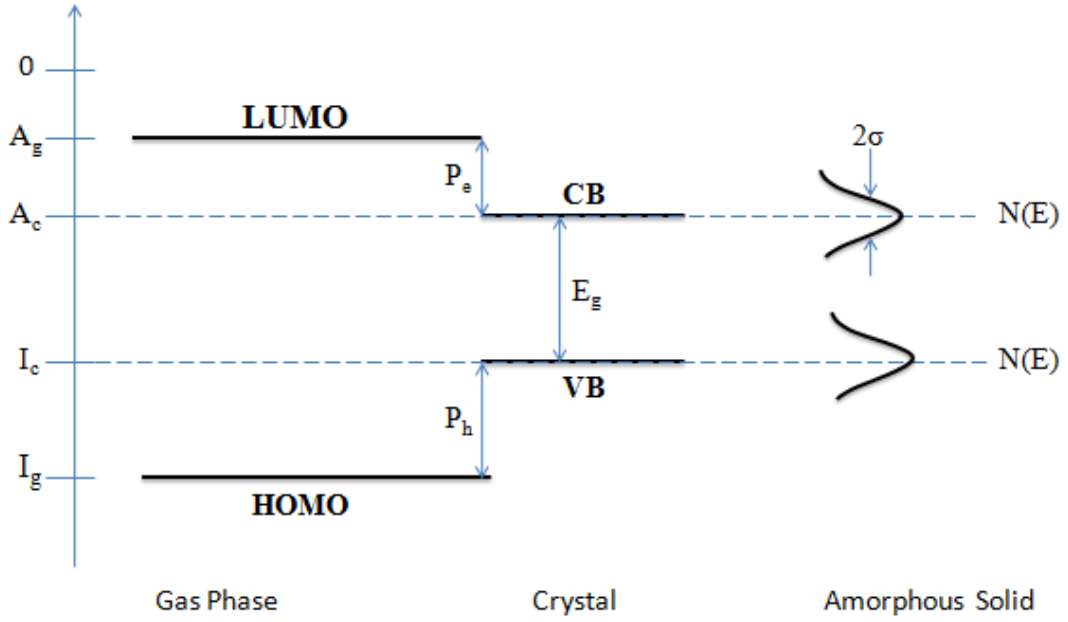
enerji diyagramlarında gösterilen kutuplanma (polarizasyon) enerjileridir. Bu resimden açıkça anlaşılır ki, eksiton bağlanma enerjisinden dolayı birinci uyarılmış tekli (singlet) durum ile taban durumu arasındaki optiksel band aralığı tek parçacığın bir kolerasyonsuz elektron-boşluk çifti yaratabilmesi için gerekli band aralığından kayda değer şekilde düşüktür. Moleküler kristallerden organik moleküler katılara geçerken bahsetmemiz gereken önemli bir olay vardır: Yerel olarak değişen kutuplanma enerjileri. Düzensiz katıda yerel olarak değişen kutuplanma enerjilerinden dolayı enerji seviyeleri genişlikleri Gaussian durum yoğunluğuna göre değişir (Şekil 1.8.).

Düzen derecesine bağlı olarak organik yarıiletkenlerdeki yük taşıyıcı iletimi mekanizması iki ana durumda incelenebilir: Band ve sıçrama iletimi. Band iletimi tipik olarak çok yüksek olmayan sıcaklıklarda, yüksek saflığa sahip moleküler kristallerde gözlenir. Ancak, elektronik delokalizasyonun düşük olmasından dolayı band genişliği anorganik yarıiletkenlere kıyasla küçüktür (oda sıcaklığında bir kaç kT). Bunun sonucunda oda sıcaklığında moleküler kristallerdeki yük taşıyıcı mobiliteleri yalnızca 1 ile $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ değerleri arasında olur [15]. Band iletiminin bir karakteristik özelliği olan sıcaklık bağımlılığı düşük sıcaklıklara inilirken bir kuvvet yasası ile karakterize edilir. Fakat tuzaklardan dolayı bu davranıştan belirli sapmalar gözlenmiştir [16].

$$\mu \propto T^{-n}; n=1,2,3 \quad (1.1)$$



Şekil 1.7. Bir izole molekül (sol) ve bir moleküler kristalin (sağ) enerji seviyeleri. I_g ve I_c izole molekül ve moleküler kristalin iyonlaşma potansiyelleri; A_g ve A_c elektron ilgileridir. P_e ve P_h elektron ve boşluk için kutuplanma enerjileridir[5]



Şekil 1.8. Bir izole molekülün (sol), bir moleküler kristalin (orta) ve bir amorf katının (sağ) enerji seviyeleri [17]

Diğer önemli durum ise amorf organik katılarda gözlenen, daha düşük mobiliteye (en iyi durumda yaklaşık $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$) sahip sıçrama (hopping) iletim sürecidir. Bu durumda mobilitenin sıcaklık bağımlılığı sadece kuvvet yasası ile tanımlanamaz. Dışarıdan uygulanan elektrik alanın etkisinin de tanımlamaya katılması gerekir:

$$\mu(ET) \propto \exp(-\Delta E/kT) \cdot \exp(\sqrt{E}/kT) \quad (1.2)$$

Makroskopik seviyede, malzeme boyunca akım yoğunluğu aşağıdaki ifade ile tanımlanır:

$$j = env = en\mu E \quad (1.3)$$

j akım yoğunluğu, v yük-taşıyıcıların sürüklenme hızları, n yük taşıyıcı yoğunluğu ve E elektrik alandır. Burada dikkate alınması gereken bir durum vardır; metallerin aksine j ile E arasındaki ilişki genellikle lineer değildir, çünkü yük taşıyıcı yoğunluğu ve mobilite uygulanan elektrik alanına ayrı ayrı bağlıdır. Bu eşitliğe göre, elektrik alan dışında kalan diğer iki parametre μ ve n akımın genliğini belirler.

Birinci parametre olan mobilite organik yarıiletkenlerde düzen derecesi ve saflığa güçlü bir şekilde bağlıdır ve bundan dolayı hazırlık aşamaları ve ince film büyütme şartlarına göre değişir. Mobilite değerleri moleküler kristallerde 1-10

cm^2/Vs değerleri arasında olurken, amorf organik katılarda $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ değerlerinde olabilir. Şu ana kadar elde edilebilen en büyük mobilite değerleri kristal Si yapısından daha düşük düzen derecesine sahip amorf Si'nin mobilite değerleri ile kıyaslanabilir büyüklüktedir [18-20].

İkinci parametre ise n yük taşıyıcı yoğunluğudur. Enerji aralığı E_g olan bir yarıiletkendeki kendiliğinden (intrinsic) yük taşıyıcı yoğunluğu aşağıdaki ifade ile tanımlanır:

$$n_i = N_o \cdot \exp(-E_g/2kT) \quad (1.4)$$

Burada, N_o etkin durum yoğunluğudur. Tipik bir organik yarıiletken için $E_g=2,5$ eV ve $N_o=10^{21} \text{ cm}^{-3}$ alındığında, oda sıcaklığında $n_i=1 \text{ cm}^{-3}$ teorik değeri elde edilir. Gerçek malzemelerde safsızlıklardan kaynaklanan yüksek yoğunluklardan dolayı bu değere ulaŐmak mümkün değildir. Yine de, Si için bu değer $n=10^{10} \text{ cm}^{-3}$ değerine ulaŐılır ($N_o=10^{19}$, $E_g=1,12$ eV). Buradan, yeteri kadar saf organik yarıiletkenlerde son derece düşük iletkenlik değerleri olacağı anlaşılır.

Organik yarıiletkenlerde kendiliğinden yük taşıyıcı yoğunluğunun düşük olmasından kaynaklanan sınırlamayı aşmak için birkaç yöntem uygulanır:

1. (Elektro-) Kimyasal doplama
2. Kontaklardan yük taşıyıcı enjeksiyonu
3. Yük taşıyıcıların foto-jenerasyonu
4. Alan-etkili katkılama.

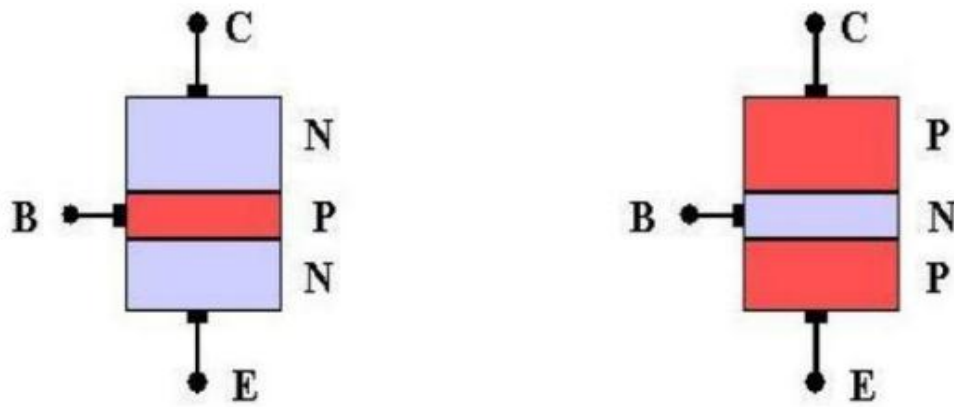
2.ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLER

2.1.Transistörler

Her ne kadar elektronik çağın Karl Braun'un katot ışın tübünü (1897) ve Ambrose Fleming'in vakum doğrultucusunu (1904) bulması ile başladığı düşünülse de, aslında Lee de Forest'in vakum-tüpünü (triot) icat etmesi (1906) ile başladığı bir gerçektir. Bu vakup-tüpü katot ile anot arasında bulunan bir ızgaradan ibarettir. Triot, doğrultucuyu bir yükselticiye dönüştürür, böylece radyo ve uzun mesafeler arası telefon iletişimini mümkün kılar. Vakum triotun bazı dezavantajları vardı. Bunlar kırılabilirlik, nispi yavaş çalışma, minyatürize edilememesi, yüksek güç tüketimi ve yüksek ısı yayma gibi sorunlardı. 1920'lilerin ortalarında triotun yerini katıhal cihazlarının alabileceği fikri ortaya çıktı. Ekim 1926'da, Julius Edgar Lilienfeld " İki terminali arasındaki elektrik akımının üçüncü-farklı bir terminalden uygulanan potansiyel ile değiştirilen cihaz " şeklinde bir patent aldı [21]. Ancak, Lilienfeld'in büyük ihtimalle çalışan bir cihazı olmadı. Aldığı patent ise geçerliliğini yitirdi. Sonraki otuz sene boyunca bu konsept başarılı bir şekilde açıklanamadı. Ne Bardeen ve Brattain'in yaptıkları nokta-kontaklı (point-contact) transistör, ne de Shockley'in çift kutuplu (bipolar) transistörü (1948) bu konsepttedir. Her iki transistör de farklı çalışma mekanizmalarına sahiptir. Sonraki 50 yıl boyunca malzeme teknolojileri üzerinde yapılan araştırmalar neticesinde metal oksit yarıiletken alan-etkili transistör (MOSFET) üretilmiştir [22]. Bugün, MOSFET'ler en çok kullanılan transistör çeşitlerindenidir; kişisel bilgisayarlarda kullanılan işlemcilerin içinde, cep telefonlarında ve birçok farklı elektronik cihazlarda kullanılırlar. Elektronik alanda en fazla kullanılan bütünleşmiş (entegre) devre elemanlarından biri olan transistörlerin en temel tipleri:

- Yüzey eklemli transistör
- Nokta temaslı transistör
- Tek eklemli transistör
- Alan etkili transistör (FET)
- Foto transistör
- Dört uçlu transistör olarak verilebilir.

Aynı zamanda transistör tiplerinden olan FET'leri polarlıkları ve çeşitliliklerine göre sınıflandırabiliriz. Polarlıklarına göre sınıflandırma, n tipi ve p tipi yarıiletken kullanılmasına göre iki şekildedir. Transistörler yarıiletkenlerin npn veya pnp şeklinde devreye işlenmesi ile oluşturulur (Şekil 2.1). n-tip yarıiletkenlerde yük taşıyıcıları elektronlar, p-tip yarıiletkenlerde yük taşıyıcıları boşluklardır. Silisyum ve Germanyum gibi yarıiletken malzemeler kullanılarak yapılan transistörlerde, elektrotlardan uygulanan voltajlara göre transistörlerde np ve pn eklemlerinde arınma bölgeleri meydana gelir. Bu arınma bölgelerinin davranışlarından dolayı transistörün karakteristikleri oluşturulur.



Şekil 2.1. npn ve pnp yapılarına sahip transistörler

Çeşitliliklerine göre sınıflandırma eklem alan etkili transistör (JFET), MOSFET ve organik alan etkili transistör (OFET) olarak yapılabilir. Bunların arasında OFET, kullanılan yarıiletkenin organik yarıiletken olması bakımından diğer ikisinden ayrılmaktadır.

Transistörler elektronik dünyanın en temel aygıtı sayılabilir. Genelde sinyal yükseltme ve değiştirme özelliklerinden dolayı birçok elektronik cihazın olmazsa olmazı transistörlerdir. Çift kutuplu eklem transistörlerin baz, kollektör ve emitör kontaklarına karşılık alan etkili transistörlerde kapı (gate), oluk (drain), kaynak (source) kontakları karşılık gelir. Hem tek olarak (discrete) hem de entegre devrelerde milyarlarca bir arada üretilebilmektedir. Transistörler çalışma temellerinde omik ve Schottky kontaklarla ilgili temel konular ile farklı besleme (biasing) yolları bulunmaktadır. Bipolar eklem transistörler (BJT) de yaygın

kullanılıyor olsa da alan etkili transistörler (FET) giriş empedansının yüksek olması gibi bazı nedenlerden dolayı çok daha yaygın kullanılmaktadır. FET'lerde BJT'lere göre sadece çoğunluk taşıyıcıları (unipolar) etkilidir ve uygulanan voltajın alan etkisi temeliyle çalışırlar. FET'in çalışma prensibi 1930'lara dayanır [23]. Temel olarak FET bir sığa gibi çalışır. Burada kaynak (source) ve oluk ya da savak (drain) adı verilen iki omik kontak arasında iletken kanal oluşturan bir plaka kapı (gate) vardır. Bu kontaklar arasındaki akım, kapı ile kontrol edilebilir.

Birçok teknolojik uygulamasının yanında, alan etkili transistörler katı malzemelerdeki yük-taşıyıcı iletimi üzerinde yapılan çalışmalar için de kullanılırlar; çünkü bu cihazlar yük-taşıyıcı mobilitesi hakkında direkt bilgi verir. Bunun en ünlü örneklerinden birisi hidrojen ile birleştirilmiş amorf silikondur (a-Si:H). Bu malzeme için farklı bir cihaz mimarisi kullanılmıştır: İnce-film transistör (TFT) [24]. TFT'lerde birikme (accumulation) rejimine indüklenmiş iletken kanal varken MOSFET'lerde inversiyon katmanı vardır. İlk üretilen a-Si:H TFT aslında bir malzemenin mobilitesini ölçmek için dizayn edilmiştir [25,26]. Bugün, a-Si:H TFT'ler aktif-matriks sıvı-kristal ekranlar (AM-LCD) için kritik öneme sahiptirler.

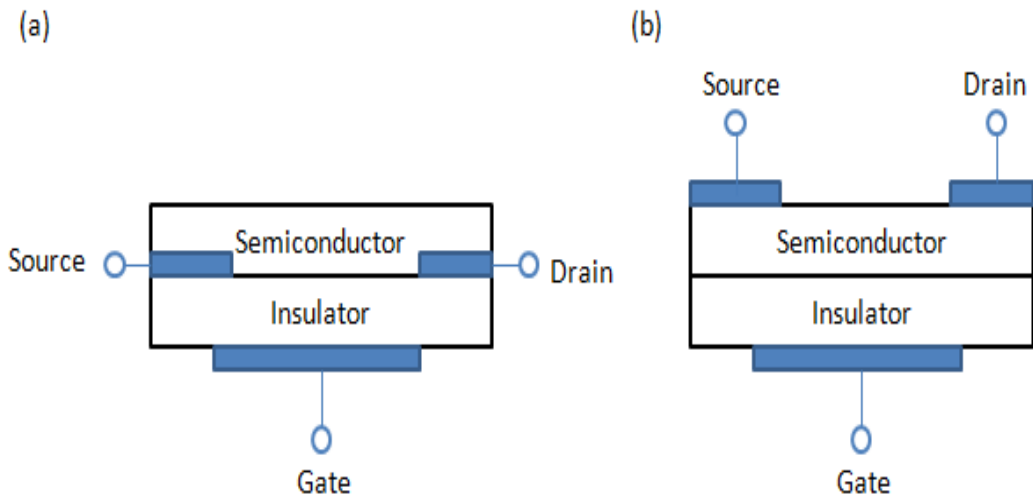
2.2.Organik Transistörler

Organik yarıiletkenler 1940'ların sonlarında tanımlanmıştır. Ancak, organik ince-film transistörler (OTFT) üzerindeki çalışmalar 1980'lerin sonlarında başlamıştır. Bu çalışmalar, polimerler ve küçük moleküller ile OTFT'lerin üretilmesi üzerinedir. İlk üretilen cihazların düşük performanslarından dolayı OTFT'lere olan ilgi, sonraki on yıl boyunca küçük akademik gruplar ile sınırlı kalmıştır. Bu periyot boyunca yapılan araştırmalar yük-taşıyıcı mobilitesini arttırmak üzerine olmuştur; bunun için daha iyi malzeme ve cihaz konfügrasyonları geliştirilmiştir. Organik yarıiletkenlerin mobilitesinin amorf silikonun mobilitesine yetiştiği dönemlerde endüstriyel gruplar OTFT'ler üzerine çalışmaya karar vermişlerdir.

Organik transistörlerin üretilmesi tamamen yeni cihaz yapıları, fabrikasyon süreçleri ve uygulamaların önünü açabilir; yüksek-hacim ve düşük üretim maliyeti sunabilen baskı teknikleri ile cihazlar üretilir. Ayrıca optik barkotların yerini alabilecek radyo-frekansı ile belirleme cihazları (RFID), tek kullanımlık elektronik cihazlar, düşük-maliyetli sensörler ve esnek ekranlar üretilir.

2.3.Organik İnce - Film Transistör Mimarisi

OFET'ler ile OTFT'ler aynı mimariye sahiptirler. OTFT'ler farklı geometrik yapılarda üretilebilirler. Kabaca, bir OTFT üç kısımdan oluşur: Bir yalıtkan, bir ince film katmanı ve üç elektrot. Elektrotlardan ikisi, kaynak (source) ve oluk (drain) yarıiletken katmanına direkt kontaklanır; üçüncü elektrot, kapı (gate), bir yalıtkan yardımı ile yarıiletkenden izole edilir. Ayrıca OTFT'ler, kapı elektrotunun kaplandığı yere göre alt-kapı ve üst-kapı; diğer elektrotların kaplandıkları yerlere göre ise üst-kontak ve alt-kontak olarak adlandırılmış geometrik yapılara sahiptirler. Bunların arasında, organik yarıiletkenlerin hassas yapılarından dolayı oluşabilecek sorunların minimum olmasının beklendiği yapı olan üst-kapı yapısı OTFT fabrikasyonlarında en çok kullanılan yapıdır. Şekil 2.2.'de alt-kontak ve üst-kontak yapılarının ayrı ayrı gösterildiği üst-kapı yapısına sahip OTFT'lerin şematik görünümü gösterilmiştir. Her iki yapının da avantajları ve dezavantajları vardır. Alt kontak yapısında kontaklar yalıtkanın üzerine kaplanmıştır; eğer bahsedilen silikon dioksit gibi bir anorganik yalıtkan ise kontaklar mikro-litografik teknikler ile kaplanabilir. Üst-kontak yapısı için bu durum söz konusu değildir; bu yapıdaki kontaklar nispi olarak düşük çözünürlük sunan gölge maskesi yardımı ile kaplanırlar. Diğer yandan, üst-kontak yapısının alt-kontak yapısına göre daha düşük kontak direnci olduğu rapor edilmiştir.

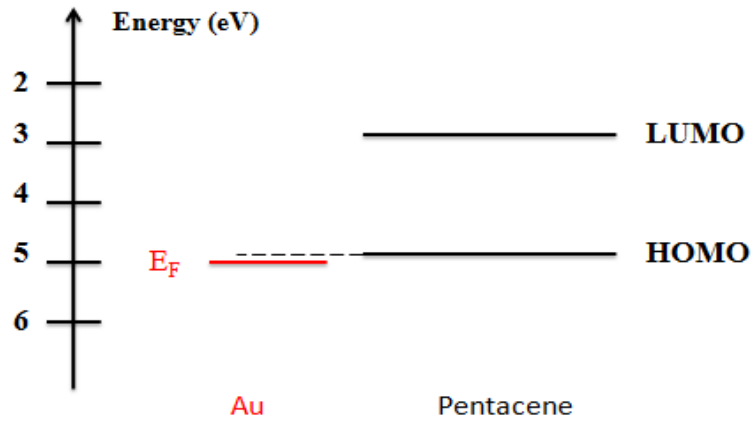


Şekil 2.2. OTFT yapısının şematik gösterimi. İki cihaz da üst-kapı yapısına sahiptir. (a): Alt-kontak; (b): Üst-kontak [4].

2.4. OFET'lerin Çalışma Prensibi ve Parametreleri

Şekil 2.3.'deki enerji şeması altının Fermi seviyesi ve pentasen'in sınır orbitallerini (en yüksek dolu moleküler orbital, HOMO ve en düşük boş moleküler orbital, LUMO) göstermektedir. Takip eden tartışmada kaynak elektrotunun bir referans (topraklanmış) elektrot olarak nasıl çalıştığından bahsedilmektedir.

Kapı elektrotuna pozitif voltaj uygulandığında kaynakta negatif yükler indüklenir. Şekil 2.3.'de görülebildiği gibi, pentasen'in LUMO seviyesi altının Fermi seviyesinden oldukça uzaktır. Bundan dolayı elektronlar için azımsanamayacak bir enerji bariyeri vardır ve elektron geçişi beklenilmez. Bu nedenle pentasen katmanından akım geçmez. Tam tersi durumda, kapı voltajı negatife çevrilirse holler kolayca geçerler, çünkü altının Fermi seviyesi HOMO seviyesine çok yakın, bariyer yüksekliği çok düşüktür. Kaynaktan oluk elektrotuna ikinci bir-bağımsız voltaj uygulandığında yalıtkan-yarıiletken arayüzünde bir iletken kanal oluşur ve yük-taşıyıcıları iletme geçer. Çünkü holler elektronlara göre daha kolay enjekte olurlar. Bundan dolayı pentasen'in p-tip bir organik yarıiletken olduğu söylenebilir. Simetrik olarak, LUMO seviyesi Fermi seviyesine yakın olan organik yarıiletkenin n-tip bir yarıiletken olduğu söylenebilir.

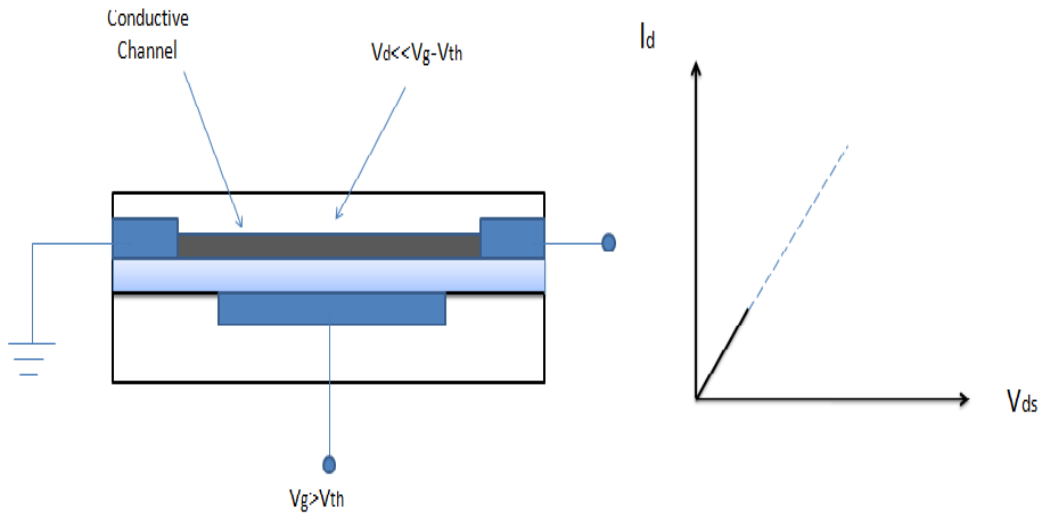


Şekil 2.3. Altın-pentasen arayüzünün enerji şeması [27]

Basit şekilde, bir ince-film transistör bir kapasitör gibi çalışır; kapıya bir voltaj uygulandığında yalıtkanın sınırlarıda eşit miktarda (ancak zıt işaretli) yükler indüklenir. Yük-taşıyıcıları yarıiletken malzemenin içine indüklenebiliyorsa yalıtkan-

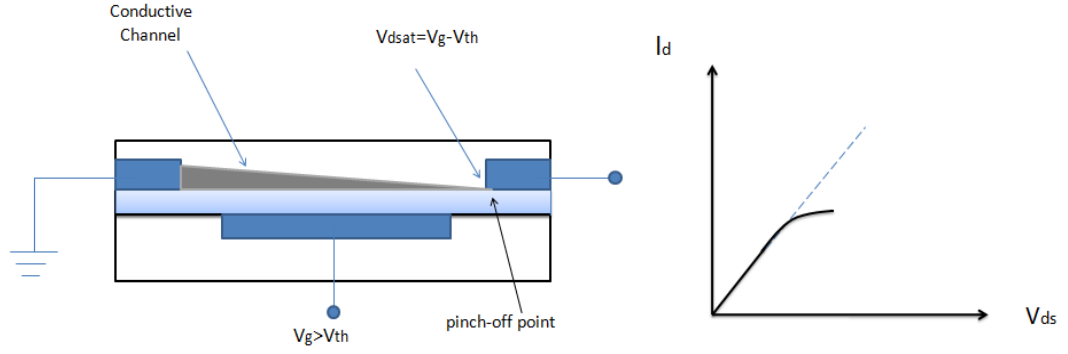
yarıiletken arayüzünde bir iletken kanal oluşur; çünkü kanalın iletkenliği yük ve uygulanan kapı voltajı ile doğru orantılıdır.

Transistörler iki ana durumda karakterize edilir. Bunlardan birincisi doğrusal rejimdir. Doğrusal rejim, oluk voltaj değerinin (V_{DS}), kapı voltajı ile eşik (threshold) voltajı arasındaki potansiyel farktan ($V_{GS}-V_T$) küçük olduğu durumda meydana gelir. Kanal yoğunluğu (channel density) düzenli (uniform) şeklindedir. Oluşturulan iletken kanal direnç özelliği gösterir. Bu durumda kanaldaki akım Ohm yasasına göre davranır. Şekil 2.4.'de alan etkili transistörün doğrusal (lineer) rejim bölgesi gösterilmiştir [28].



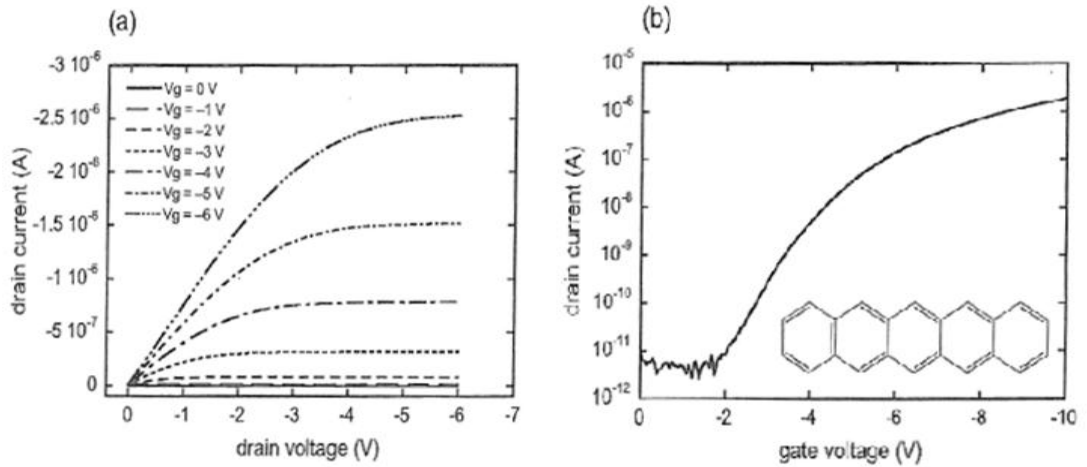
Şekil 2.4. Doğrusal rejimde kanal yapısı ve I_{DS} akımı [28]

İkinci ana durum ise doyum rejimidir. Doyum rejiminin başladığı nokta iletken kanaldaki oluk akımının $V_{GS}-V_T$ 'değerine eşit olduğu durumdur. Bu duruma kısıtılma (pinch-off) denir. Kısıtılma durumunda kapı ile oluk arasında hiçbir potansiyel farkı kalmaz ve kanal yoğunluğu düzenli olmayan bir yapıya dönüşür. Bu durum Şekil 2.5.'de gösterilmiştir. Bu bölgede artan kaynak-oluk voltajına rağmen akım artmamaktadır. Kaynak voltajı $V_{GS}-V_T$ değerinden büyük olduğu durumda ise doyum meydana gelmektedir.



Şekil 2.5. Kısırılma rejiminde kanal yapısı ve I_{DS} akımı [28]

OTFT'lerin çalışma prensibini açıklamak için Şekil 2.6.'da tipik akım-voltaj karakteristikleri gösterilmiştir. Bu eğriler pentasen ile yapılan bir cihazın ölçüm sonuçlarından elde edilmiştir. Cihaz yapımında kullanılan elektrotlar altındır. Datalar kaynak [27]'den alınmıştır. Şekil 2.6.(a)'da lineer bölgeden doyum bölgesine aşamalı geçiş açık şekilde gösterilmiştir. Şekil 2.6.(b)'deki eğri iletim karakteristiğidir; bu, elektronik devreler için son derece önemli parametreler olan eşik (threshold) voltajı ve açık-kapalı akım oranını belirlemek için kullanılır.



Şekil 2.6. OTFT'nin tipik çıktı (a) ve iletim (b) karakteristikleri [27]

Lineer ve doyum akımları Eşitlik (2.1) ve (2.2) kullanılarak tanımlanır. Bu eşitlikler iki varsayım yapılarak türetilmiştir:

1. Kanala paralel elektrik alan kanala dik olan elektrik alandan daha düşüktür. Bu, kaynak ve oluk arasındaki mesafenin yalıtkan tabakanın kalınlığından daha fazla

olduğu durumlarda oluşan, sözde aşamalı kanal yaklaşımı adı verilen durumda meydana gelir ve

2. mobilite, μ , sabittir.

$$I_{DS} = \frac{W}{L} \mu C_i (V_{GS} - V_T) V_{DS} \quad \text{Doğrusal bölgede} \quad (2.1)$$

$$I_{DS} = \frac{W}{2L} \mu C_i (V_{GS} - V_T)^2 \quad \text{Doyum bölgesinde} \quad (2.2)$$

W ve L kanal genişliği ve uzunluğu, C_i yalıtkanın birim alan başına kapasitansı, V_{GS} ve V_{DS} kapı ve oluk voltajları ve V_T eşik voltajıdır. OTFT'lerde önemli olan akım ve mobilite doyum bölgesindeki akım ve mobilitedir. Mobilite, Eşitlik (2.2) yeniden düzenlenerek aşağıdaki ifade ile tanımlanır:

$$\mu = I_{DS} \frac{2L}{W(V_{GS} - V_T)^2 C_i} \quad (2.3)$$

OTFT'ler belirli bir kapı voltajı değerinden sonra açık konuma gelirler; bu voltaj değerinden düşük kapı voltajlarında ise kapalı durumda olurlar. Bu voltaj değerine V_T eşik voltajı denir. V_T değeri I_{DS} 'nin karekökünü V_G ile değişimini gösteren iletim karakteristiğinden elde edilir; bu V_T değeri, I_{DS} akımının lineer olarak artmaya başladığı V_G değeridir.

OTFT'lerde önemli olan bir diğer parametre ise açık/kapalı akım oranıdır (I_{on}/I_{off}). Teoride, transistör kapalı durumdayken akım geçmez, ancak pratikte belirli bir akım vardır. Bu akım I_{off} değeridir. I_{on}/I_{off} parametresi cihazın sinyali ne boyutlarda yükselttiğini belirler ve bu değer ne kadar yüksekse cihaz performansı da o kadar iyidir. I_{on}/I_{off} değeri Şekil 2.4.(b)'de akım değerlerinin en yüksek ve en düşük değerleri oranlanarak elde edilir.

Diğer önemli bir parametre ise C_i kapasitans değeridir. C_i değeri aşağıdaki eşitlik ile verilir:

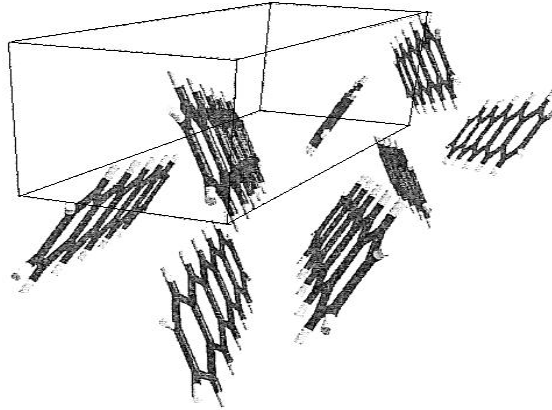
$$C_i = \epsilon_0 \cdot \epsilon_i \cdot A/d; \quad A = W \cdot L \quad (2.4)$$

Burada $\epsilon_0 = 8,8542 \times 10^{-12}$ F/m vakumun dielektrik sabiti, ϵ_i yalıtkanın dielektrik sabiti, W ve L kanal genişliği ve uzunluğu ve d yalıtkanın kalınlığıdır. OFET'lerde

kullanılan yalıtkanın kapasitesinin büyüklüğü cihazın performansı için çok önemlidir.

2.5. İletken Kanalın Kalınlığı

Konjügasyon, moleküler yapının omurgasındaki karbon atomlarının sıralı bir şekilde, birbirleri ile tek ve çift bağlar yapması anlamına gelir. Bu yapı sayesinde moleküller bu yapı boyunca esnekliklerini kaybederler ve esnemeyen rodlar olurlar. Katı fazda, bu rodlar birbirlerine paralel şekilde konumlanmaya eğilimlidirler. Bundan dolayı, oluşan bir tek-tabakanın kalınlığı kabaca bir molekülün büyüklüğüne eşittir denilebilir. Şekil 2.7.'de pentasen kristal yapısı görülmektedir [29]. Bu yapının tek-katmanının kalınlığı 1,5 ile 3 nm arasındadır.



Şekil 2.7. Pentasen'in kristal yapısı [29]

Herhangi bir tek-katmanda bulunan bir molekülün kendi katmanında bulunan moleküllere çok yakın, farklı bir tek-katmanda bulunan moleküllere uzak olmasından dolayı ince-film katmanlı bir yapıdan meydana gelir. Bu nedenle, katmana paralel yük iletiminin katmana dik yük iletimine göre çok daha etkili olması beklenir. Bu olay, segzitiyofen bazlı cihazların üzerinde yapılan x-ray kırınımı deneyleri ile doğrulanmıştır [30,31]. Aynı davranış pentasen için de gözlemlenmiştir [32,33].

İletken kanalın kalınlık konspeti o kadar da belirgin bir olgu değildir, çünkü yük-taşıyıcılarının dağılımı yalıtkan-yarıiletken arayüzünden yarıiletkenin hacimsel (bulk) yapısına doğru gidildikçe düşer. Öyleyse sadece etkin kalınlıktan bahsetmek daha mantıklıdır. Dağılım, Poisson denkleminin çözümünden elde edilir:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon_s} \quad (2.5)$$

V potansiyel, x kanala dik olan yön, ρ yük yoğunluğu ve ε_s yarıiletkenin elektriksel geçirgenliğidir. Metal-yalıtkan-yarıiletken yapısı için Poisson denkleminin analitik çözümü yoktur. Kaynak [34]'de bir sayısal çözüm örneği vardır. Akümülayon bölgesinde kabul edilebilir bir yaklaşık çözüm Eşitlik (2.6)'da verilmiştir:

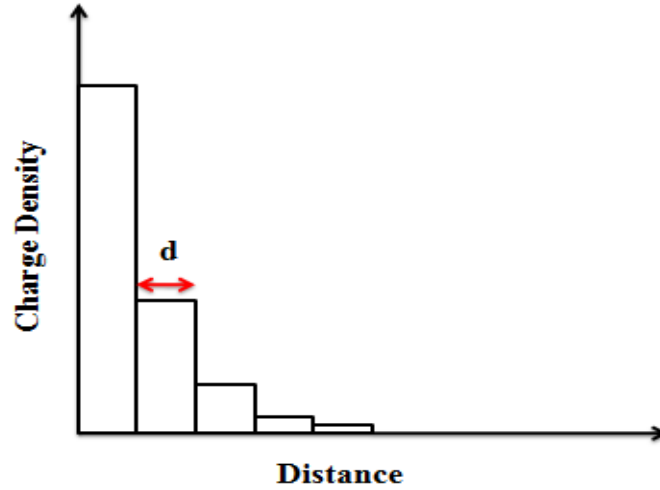
$$n(x) = \frac{\rho(x)}{q} = \frac{(C_i V_{GS})^2}{2kT\varepsilon_s} \left(1 + \frac{x}{L_D\sqrt{2}}\right)^{-2} \quad (2.6)$$

$n(x)$ yük-taşıyıcı yoğunluğu ve q taşıyıcıların yüküdür. Debye uzunluğu, L_D , şu ifade ile verilir:

$$L_D = \frac{kT\varepsilon_s\sqrt{2}}{qC_iV_G} \quad (2.7)$$

k Boltzman sabiti ve T sıcaklıktır. Yük dağılımını ilk olarak Mott ve Gurney tarafından türetilmiştir [35]. Debye uzunluğu kabaca kanalın kalınlığı hakkında bilgi verir. Bu etkin kalınlık 0,1 ile 1 nm arasındadır ve tek-tabakanın kalınlığından önemli derecede düşüktür. Bu nedenle, pratik olarak, bütün yük taşıyıcılarının yalıtkan-yarıiletken arayüzüne en yakın tek-tabakada konumlandığı düşünülebilir [36].

Bu basit tanımlamaya eklenmesi gereken en az iki önemli olgu vardır. Birincisi, Eşitlik (2.6)'da görülen yük-taşıyıcı yoğunluğunun uzunluğun karesi ile doğru orantılı olarak azalmasıdır; bu, yalıtkan-yarıiletken arayüzünden uzak mesafelerde de gözardı edilemeyecek sayıda yüklerin bulunduğu anlamına gelir. Eklenmesi gereken ikinci olgu ise yarıiletken filmin katmanlı tabakasının göz önüne alınması gerektiğidir. İletken kanalda, yüklenmiş her molekül sadece bir elemental yük taşır (elektron veya boşluk). Kuantum mekaniksel hesaplamalar kısa konjüge moleküllerin içindeki ilave yüklerin tüm malzeme içinde eşit şekilde dağıldığını göstermektedir [37]. Bunun bir sonucu olarak, filmdeki asıl yük-taşıyıcı dağılımı sürekli değildir. Şekil 2.8.'de bu dağılımın bir merdiven fonksiyonu biçiminde olduğu görülmektedir. Merdivenin her basamağının genişliği birbirlerine eşit olan tek-tabakaların kalınlığına eşittir.



Şekil 2.8. Bir OTFT'nin iletken kanalına dik yük dağılımı [37]

d ve n herhangi bir tek-katmanın kalınlığı ve katman sayısı olarak tanımlansın; katmanlar yalıtkan-yarıiletken arayüzünden başlanılarak numaralandırılısın. Katmanda birim alan başına düşen yük-taşıyıcı yoğunluğunu (n_i) tahmin edebilmek için i nci ve ona komşu katmanlar tarafından sınırlandırılmış silindirik birim kesit alana Gauss yasası uygulansın. Uzun kanala sahip bir cihaz için elektrik alan, E , filme dik olsun. Bu durumda aşağıdaki ifade elde edilir:

$$E_{i-1} - E_i = -\frac{qn_i}{\epsilon_s} \quad (2.8)$$

E_i , i ile $(i + 1)$ nci katman arasında bulunan sınırdaki elektrik alanın modülüdür. Katmanlara dik doğrultuda E ve V elektrik alan ve elektriksel potansiyelin değişimi Poisson denklemin tekrar yazılması ile elde edilir (Eşitlik 2.5).

$$\frac{dE}{dx} = \frac{qn(x)}{\epsilon_s} \quad (2.9)$$

$$E = -\frac{dV}{dx} \quad (2.10)$$

Her katmandaki yük dağılımının eşit olmasından dolayı elektrik alan, iki sınır arasındaki mesafede lineer olarak değişir. Potansiyel değişimleri aynı limitler için kuadrattır. Bu süreçler tanımlanırken bitişik katmanlar arasındaki yük iletiminin yeteri kadar etkili ve filmdeki yük-taşıyıcılarının dağılımının da termodinamik dengede olduğu varsayılmıştır. Yük yoğunluğunun molekül yoğunluğundan az olduğu varsayıp, Boltzman istatistiği kullanılırsa aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\frac{n_{i+1}}{n_i} = \exp \left[\frac{q}{kT} (V_i - V_{i+1}) \right] \quad (2.11)$$

Birkaç manipölasyondan sonra aşağıdaki denklem serisi elde edilir:

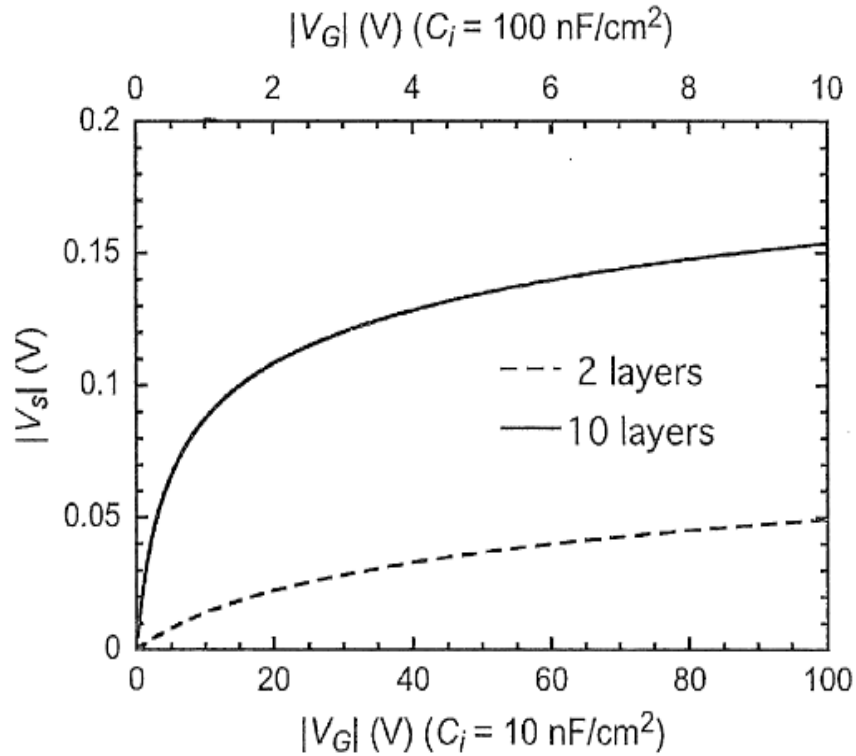
$$n_i = n_{i+1} \exp \left[\frac{dq^2}{kT\epsilon_s} \left(\frac{n_{i+1}}{2} + \sum_{j=i+2}^n n_j \right) \right] \quad (2.12)$$

Eşitlik (2.12)'in analitik çözümlü olmamasına rağmen, sayısal çözümlü, verilen n_{i+1} ve takip eden ilk katmanın yoğunluğundan yola çıkılarak elde edilebilir. n_i ile kapı voltajının bağlantısı aşağıdaki ifade ile verilmiştir:

$$C_i(V_G - V_S) = q \sum_1^n n_i \quad (2.13)$$

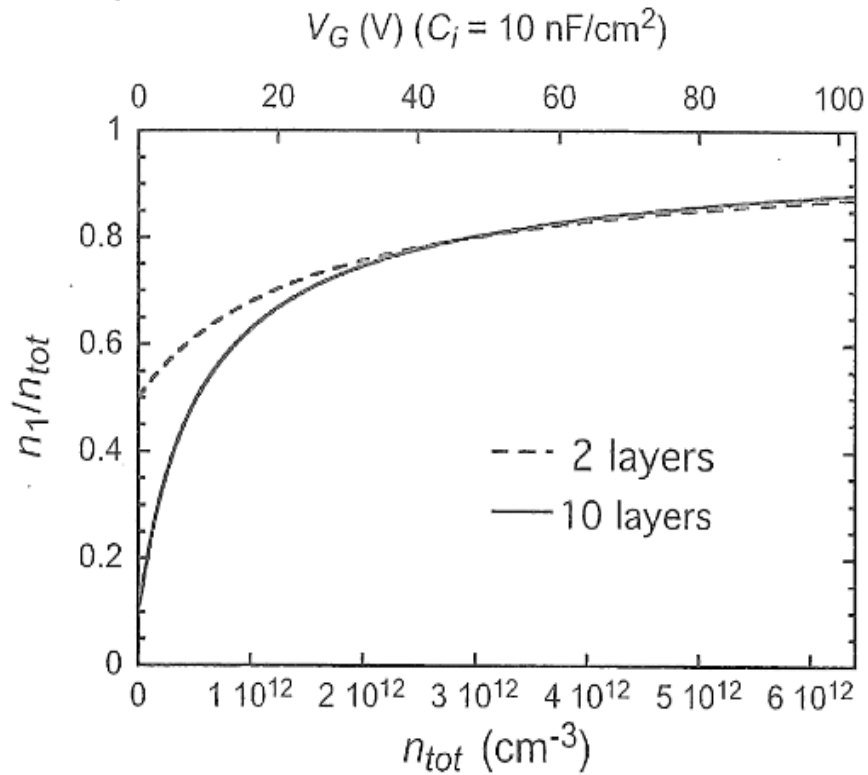
$V_S = V_1$ değeri yalıtkan-yarıiletken arayüzündeki potansiyeldir. Bu potansiyeli belirleyebilmek için $i = 1$ 'den $i = n$ 'e kadar alınarak Eşitlik (2.11) tekrar düzenlenir ($V_{n+1} = 0$ sınır şartı göz önüne alınarak). Bu durumda V_S aşağıdaki gibi olur:

$$V_S = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_1}{n_n} \quad (2.14)$$



Şekil 2.9. İki farklı kapasitans değeri için yalıtkan-yarıiletken arayüzüne düşen potansiyelin kapı voltajına göre değışimi [4]

Arayüz potansiyelinin kapı voltajının bir fonksiyonu olarak değişimi Şekil 2.9.'da gösterilmiştir. Kapı voltajının değeri iki farklı yalıtkan kapasitansı (10 ve 100 nFcm^{-2}) için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Şekil 2.10. birinci tabakanın yoğunluğunun toplam yoğunluğa ($n_{\text{top}} = \sum n_i$) oranının toplam yoğunluğun ve kapı voltajının fonksiyonu olarak değişimini göstermektedir. Buradan, yalnızca yüksek kapı voltajlarında indüklenmiş yüklerin hepsinin ilk katmanda yerleştiği kabul edilebilir. Düşük kapı voltajlarında yük-taşıyıcı yoğunluğu filmin kalınlığına (katman sayısına) güçlü şekilde bağlıdır. Bu olay bir matematiksel yaklaşım ile tanımlanabilir. Bu tanımlamaya göre $V_G \rightarrow 0$ alınırsa, basitçe bütün i değerleri için $n_i = n_{\text{top}}/n$ olur. Burada not edilmesi gereken bir durum daha vardır: Yüksek kapı voltajlarında dahi birinci katmanın dışında kalan katmanlarda ihmal edilemeyecek kadar indüklenmiş yük yerleşmektedir.



Şekil 2.10. Birinci tabakanın yoğunluğunun toplam yoğunluğa oranının toplam yoğunluğun ve kapı voltajının fonksiyonu olarak değişimi [4]

2.6. Fabrikasyon Teknikleri

Organik yarıiletkenler erime noktaları, çözünebilirlikleri ve mekanik özellikleri bakımından anorganik analoglarından çok farklıdırlar. Bu nedenle, konvansiyonel mikroelektronik fabrikasyon teknikleri organik yarıiletken cihazlar üretmek için çok da elverişli değildir. Yine de, termal oksidasyon ve fotolitografi gibi klasik mikroelektronikte kullanılan teknikler organik yarıiletken cihazlar üretmek için de kullanılmaktadır. Birçok OTFT standart silikon teknolojisinden faydalanılarak üretilmektedir. OTFT'lerde kapı görevi yapan yüksek derecede katkılanmış silikon alt-tabanların üzerinde termal oksitleme yöntemi ile yalıtan katman (SiO_2) büyütülme ve litografik teknikler ile kaynak ve oluk elektrotları kaplanmaktadır. Organik yarıiletken katman ise çözelti veya gaz fazda kaplama yöntemleri ile ince film şekline dönüştürülmektedir. Döndürerek kaplama (spin-coating) ve ıslak-baskı teknikleri çözelti fazda kaplama teknikleri arasında en çok kullanılanlarıdır. Gaz fazda kaplama tekniklerinden de en çok vakum-buharlaştırma tekniği kullanılır. Bu teknikler arasında çözelti bazlı kaplama teknikleri hem cihaz fabrikasyonlarının kolaylığı hem de kullanılan malzemelerden yüksek derecede verim sağlayabilme açısından en elverişli kaplama teknikleridir. Ancak, bu kaplama teknikleri ile kaplanan filmlerin nispi olarak düşük kaliteli olması ve bütün organik yarıiletkenlerin çözünebilme özelliğinin olmaması bu tekniklerin en büyük sorunlarındanıdır. Konjüge polimerlerin birçoğu çözünebilme özelliklerine sahipken, moleküler kristaller değildir. Gaz fazda kaplama tekniklerinin de avantajları ve dezavantajları vardır. Bu teknikler ile kaplanan filmler çözelti bazlı teknikler ile kaplanan filmlerden morfolojik olarak daha kaliteli olur. Fakat yine bütün organik yarıiletkenlerin gaz fazda kaplanamaması ve yüksek malzeme israfı gaz fazda kaplama tekniklerin önemli sorunlarındanıdır. Takip eden tartışmada OTFT fabrikasyonunda kullanılan değişik baskı teknikleri üzerine yoğunlaşılacaktır.

OTFT fabrikasyonunda ilk kullanılan teknik ekran-baskı (screen-printing) tekniğidir. Cihazın önemli elementleri bir paslanmaz-çelik maske yardımı ile çözelti fazında kaplanırdı [38,39]. Bu basit teknik ile kaplanan cihazların performansları konvansiyonel teknikler ile üretilen cihazların performansları ile kıyaslanabilir olmasına rağmen, çözünürlüğü 35-100 μm arasındaydı - realistik uygulamalar için gerekli kritik değerden yüksekti. Bu problemin üstesinden gelebilmek için Bell

laboratuvarlarındaki bir araştırma grubu çözünürlüğü 2µm boyutlarına indirebilen bir yüksek çözünürlüklü baskı tekniği geliştirmiştir [40]. Mikrokontakt baskı adı verilen bu teknikte bir önceki kaplanan malzemeyi korumak veya malzeme kaplamaya yardımcı olan başlatıcı görevini sağlamak amacı ile kullanılan kendiliğinden biraraya gelmiş tek-katmanları (SAM (self-assamble monolayer)) oluşturmak için elastomerik damgalar kullanılmıştır [41]. Uygun bir alt-katman üzerine altın tabakasının kaplanması ile üretilmeye başlanan transitör üst-kapı geometrisine sahiptir. Özel olarak dizayn edilmiş damga, altın tabakasının üzerinde SAM deseni elde etmek için kullanılmıştır. Sonra, kaynak ve oluk elektrotlarını elde etmek için SAM kaplanmamış kısımlar asit yardımıyla kaldırılmıştır. SAM daha sonra ısı, ultraviyole ışık veya oksijen plazması yardımı ile kaldırılmıştır. Sonuçta, alt-tabakanın üzerinde altın kaynak ve oluk elektrotları elde edilmiştir. Bell laboratuvarlarındaki çalışma grubunun ürettiği transistörde yarıiletken düzenli (regio-regular) poli(3-hegziltiyofen) (rr-P3HT), yalıtkan poli(metil metakrilat) (PMMA) ve kapı elektrotu (karbon mürekkebi) sırasıyla çözelti formunda kaplanmıştır.

İnkjet baskı tekniği OLED'ler ve tam-renkli ekranların fabrikasyonlarında yaygın olarak kullanılan alternatif bir baskı tekniğidir. Bu teknikte malzeme bir püskürtücü yardımı ile yüzeye kaplanır. Bu tekniğin ana problemi alt-taban üzerine püskürtülen damlacıkların saçılmasından kaynaklanan çözünürlük sorunudur (20-50 µm). Cambridge Üniversitesi'nde bir çalışma grubu bu sorunun üstesinden gelebilmek için damlacık saçılımlarını bir püskürtme deseni şeklinde, cihazın boyutlarını belirleyen hidrofobik bölgelere hapsetmiştir [42]. Desen, poliimid filmlerin oksijen plazma ve fotolitografi teknikleriyle kaldırılması sonucunda elde edilmiştir. Üretilen cihaz yine üst-kontakt konfügrasyonuna sahiptir.

Damgalama ve inkjet-baskı tekniklerinin ikisi de konjüge polimerler ve küçük moleküller ile çalışıldığında sorun çıkartabilecek sıvı mürekkebe ihtiyaç duyarlar. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için DuPont'ta termal görüntüleme bazlı bir kuru proses geliştirilmiştir. Bu teknik ile organik malzemelerin yüksek hızda ve mikron boyutlu çözünürlüklerde kaplayabildiği iddia edilmektedir [43]. Bu teknik esnek bir filmde ince bir katı tabakanın başka bir esnek filme transfer edilmesi prensibi ile çalışır. İki esnek film birlikte vakumda tutulur. Lazer ışını tarafında üretilen ısı, verici özelliği olan ince filme odaklanır. Işığın ısıya dönüşümünün sonucunda verici özellikli ince filmin en üst katmanı gaz fazına gönüşür ve alıcı özellikli diğer ince

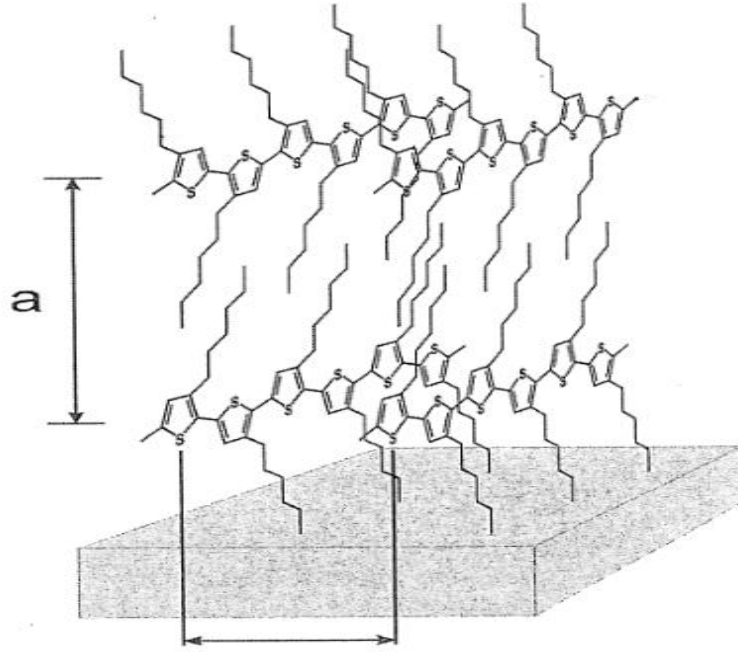
filme kaplanır. Ancak bütün iletken polimerler üretilen ısıya karşı böyle tepki göstermezler.

2.7. OFET Fabrikasyonlarında Kullanılan Malzemeler

Daha önce OTFT fabrikasyonlarında kullanılan iki ana malzeme türü olduğundan bahsedilmişti: Organik yarıiletkenler ve yalıtkanlar. Organik yarıiletkenler polimerler ve küçük moleküller olarak sınıflandırılırlar. Tek kristaller küçük moleküller grubu altında spesifik bir malzeme türüdür. Ayrıca organik yarıiletkenler p-tip ve n-tip olmak üzere yük-taşıyıcıları türlerine göre ayrılırlar. Yalıtkanlar ise organik, anorganik, SAM ve çok bileşenli yalıtkanlar olarak gruplandırılabilir.

2.7.1. Polimerler

Polimer bazlı OTFT fabrikasyonlarında çok kullanılan iki polimer vardır: PF (polifloren) ve P3AT (poli(3-alkiltiyofen)). Takip eden tartışmada daha yüksek mobilitelere sahip P3AT üzerine yoğunlaşılacaktır. Siringhaus ve arkadaşlarının, döndürerek kaplama yöntemi ile kaplanmış P3AT üzerinde yaptıkları çalışmaların öncülüğünde polimer OTFT'lerin performanslarının yalıtkan-polimer arayüzündeki zincirlerin kimyasal ve yapısal düzenlerine kritik şekilde bağlı olduğu gözlenmiştir [44]. Yüksek düzen en başta polimer zincirlerinin düzenliliğine (regio-regularity) bağlıdır; bu, alkil zincirlerinin tiyofen halkalarına bağlanmaları ile ilgili bir durumdur. Yinede, yüksek düzen için sadece bu bağlanma düzeni yeterli değildir. İki tip oriyantasyon gözlenmiştir; birincisi, tiyofen halkalarının yüzeye yayılmış olduğu durum ve ikincisi, "edge-on" durumu (Şekil 2.11.). Mobilitenin ikinci durumda daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. rr-P3HT için bu değer $0,1 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ seviyelerine ulaşmıştır [45]. Burada belirtilmesi gereken bir durum daha vardır: Polimer zincirlerinin alt-taban üzerindeki yönelimlerini etkileyen faktörler henüz tam olarak bilinmemektedir.



Şekil 2.11. "Edge-on" yönelimine sahip rr-P3HT molekülü [44]

2.7.2. Küçük Moleküller

Pentasen, küçük moleküller bazlı p-tip OTFT fabrikasyonlarında en çok kullanılan malzemedir. Pentasen için elde edilmiş en yüksek mobilite değerleri $6 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 'dir [46].

Pentasen ile üretilen birçok cihaz SiO_2 üzerinde buharlaştırma ile kaplama yöntemi ile üretilmektedir. Her iki malzemenin (yalıtkan ve yarıiletken) farklı fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı yüksek düzensizliğe sahip arayüzler oluşmakta, bundan dolayı, üretilen cihazlar düşük performanslı olmaktadır. Yalıtkan-yarıiletken arayüzünde yapılan modifikasyonlar sayesinde cihaz performanslarında büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Alt-tabanı ısıtmak ve düşük hızda kaplamak bu sorunu halletmek için alternatif çözümlerdir.

2.7.3. n-Tip Yarıiletkenler

Daha önceden de bahsedildiği gibi, organik yarıiletkenlerde n-tip ve p-tip notasyonlar anorganik yarıiletkenlerdeki anlamlarından farklıdır. Bir organik n-tip malzemede elektronlar hollerden daha kolay enjekte olurlar. Diğer bir deyişle, bir n-tip organik yarıiletkenin yüksek elektron ilgisi vardır.

En yüksek elektron mobilitelerine sahip bileşikler fulleren C60 ve türevleri [47] ve N,N4-dialkil-3,4,9,10-perilen tetrakarbokslik diimid türevleridir [48]; mobiliteleri $0,5 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ değerine ulaşır. Oksijen ve nem gibi çevresel faktörlere olan yüksek hassasiyetleri bu malzemelerin en büyük dezavantajlarıdır.

n-tip bileşikler ile p-tip organik yarıiletkenlerin elektronik devrelerde birlikte kullanılabilme imkanından dolayı kararlı n-tip yarıiletkenler üzerindeki çalışmalar önem kazanmaktadır. Bütünleyici metal-oksit yarıiletkenler (CMOS) bu anlamda mikroelektronikte çok önemlidir. n-kanal ve p-kanal transistörlerin birleştirilmesiyle yapılan devrelerin birçok avantajı vardır: Yüksek dayanıklılık, düşük güç tüketimi ve düşük gürültü. OTFT fabrikasyonları için yeni bir tür konsept geliştirilmiştir. Bu konseptte göre, ambipolar malzemeler kullanılarak üretilen transistör, kullanılan kantağa göre n-tip veya p-tip olabilmektedir. İdeal olarak, bir ambipolar yarıiletkenin düşük iyonizasyon potansiyeli ve yüksek elektron ilgisi vardır. Eindhoven'da bir araştırma gurubu bir ambipolar bileşik üretebilmek için zekice bir yol keşfetmiştir: n-tip ve p-tip bileşiklerden oluşan iç içe geçmiş ağ yapı [49]. Grubun kullandığı birinci bileşik C60'ın bir türevi olan 6,6-fenil C61-bütirik acit metil ester (PCBM), ikincisi ise rr-P3HT veya poli-p-penilenvinilen (PTV)'nin bir türevidir. Yukarıda bahsedilen bütünleyici devrenin çalışabilmesi için transistörlerden birinin açık, diğerinin kapalı konumda olması gerekmektedir. Buna göre, bir ambipolar transistör negatif kapı voltajında holleri, pozitif kapı voltajında ise elektronları iletmelidir. Kapı voltajının çok düşük olduğu veya sıfır olduğu durumda ise transistörlerin ikisinin birden kapalı olması gerekir. Bu, pratik devreler için zararlı bir olaydır. Saf n-tip ve p-tip bileşikleri birbirinden ayırmak daha akıllıca bir yaklaşımdır.

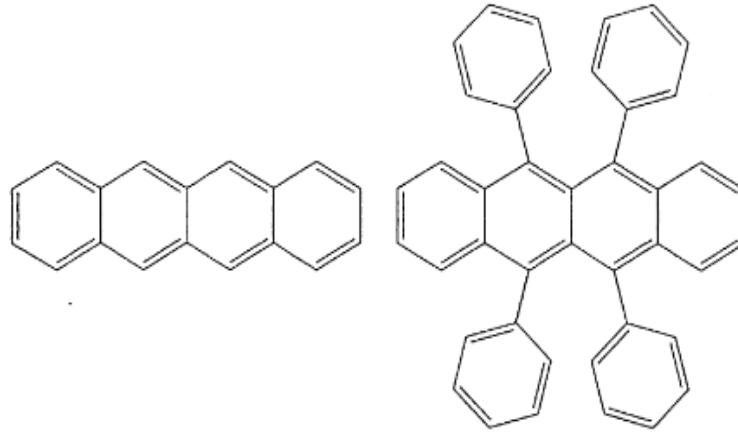
2.7.4. Tek Kristaller

Şimdiye kadar, tek-kristal OTFT 'ler üzerine yapılmış yayınların sayısı azdır. Tek kristal OTFT fabrikasyonlarında birçok zorluk meydana gelmektedir. Tek kristal organik malzemeler küçüktür, kırılmandır ve işlenmeleri zordur. Yarıiletken malzemenin yalıtkan malzemenin üstüne buharlaştırma veya çözelti yöntemleri ile kaplandığı standart OTFT üretim teknikleri tek kristaller için uygun teknikler değildir. Buna ek olarak, birçok konvansiyonel üretim süreci kristallerin yüzeylerine zarar verir. Bu nedenle, OTFTler daha önceden büyütülmüş kristaller kullanılarak üretilmelidir. Şimdiye kadar sadece iki teknik başarılı olmuştur.

1. Kristal, daha önceden hazırlanmış yalıtkan-kaynak-oluk yapısının üstüne elektrostatik olarak bağlanır [50].
2. Kontaklar ve kapı elektrotu kristal üzerine direkt kontaklanır [51].

Tek kristallerin kusur konsantrasyonları, buharlaştırma yöntemleri veya çözelti bazlı kaplama yöntemleri ile kaplanan filmlerden daha düşük olduğundan, tek-kristal OTFT fabrikasyonlarında cihaz performanslarını sınırlayan fiziksel etkenleri bu malzemelerin üstün özelliklerini kullanarak aşmak ana motivasyondur.

Organik transistörlerde çok kullanılan iki önemli tek kristal vardır: Tetrasen ve rubren (Şekil 2.12.)



Şekil 2.12. Tetrasen (sol) ve rubren (sağ) kristallerinin moleküler yapıları

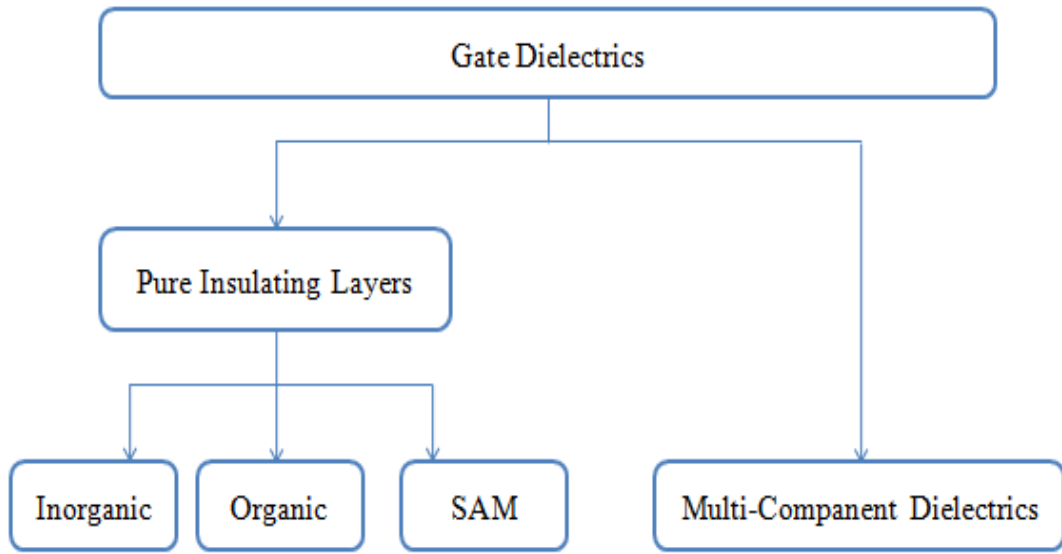
Tek kristaller ile üretilen cihazların öne çıkan özellikleri [52]: Beklenmeyecek kadar yüksek mobilite (rubren için, oda sıcaklığında $20 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$); mobilitenin sıcaklık bağımlılığı: Kritik bir sıcaklık değerinin üstünde iken sıcaklık azaltıldığında mobilite artmakta, bu kritik değer altına inildikten sonra sıcaklık azaltıldığında ise mobilite düşmektedir. Bu kritik değerler tetrasen için $280 \text{ }^\circ\text{K}$, rubren için $200 \text{ }^\circ\text{K}$ 'dir; ve kristal eksenine göre anizotropik mobilite.

2.7.5. Yalıtkanlar

Alan etkili transistörlerde kapı yalıtkanı en az yarıiletken kadar önemlidir. OTFT'lerin performansı yalıtkanın yüzeyinin fiziksel ve kimyasal özelliklerine

yüksek derecede bağımlıdır. Daha önce yalıtkan-yarıiletken arayüzünün kalitesinin öneminden bahsedilmişti (bkz. Bölüm 2.7.2.).

Geçen on beş yıl boyunca, birçok dielektrik (yalıtkan) malzeme OTFT'lerde kapı dielektriği olarak kullanılmıştır. Prensip, bu malzemeler Şekil 2.13.'deki gibi dört ana grupta toplanabilirler: Anorganik dielektrikler, organik dielektrikler, SAM ve çok-kompanentli dielektrikler [53]. Takip eden tartışmada anorganik ve organik dielektriklere yoğunlaşılacaktır.



Şekil 2.13. OTFT fabrikasyonlarında kullanılan kapı-dielektriklerinin sınıflandırılmış şekli ile şematik görünümü [53]

OTFT'lerde uzun süre, yüksek-katkılı silikon alt-tabanların üstünde büyütülen silikon oksitler en çok kullanılan kapı dielektrikleri olmuştur. Termal olarak oksitlenmiş silikon alt-tabanlar kullanarak üretilen cihazlar yeni organik yarıiletken malzemeleri test etmek için kullanılmıştır [54]. Ancak bu sistemde kullanılan dielektrik alt-tabanın özelliklerine bağlıdır. Alt-tabanlardan bağımsız dielektrikler üzerine yapılan araştırmaların neticesinde birçok anorganik dielektrik malzeme üretilmiştir (Çizelge 2.1.). Bu araştırmalar, anorganik oksitler [55] ve nitritler [56] ve onların büyütülme tekniklerini kapsamaktadır.

Çizelge 2.1. Bazı anorganik dielektrik malzemeler [53]

Material	Preperation Method	Deposition Temperature [°C]	Dielectric Constant
SiO ₂	Thermally Grown	>600	3.9
SiO ₂	Ion Beam Sputtered	80	3.9
Al ₂ O ₃	Sputtered	not given	~5.1
Al ₂ O ₃	Anodized	r.t.	~4.2
TiO ₂	Anodized	r.t.	21
SiN _x	CVD	250-350	6-7
BZT	rf Sputtered	r.t.	17.3
BST	rf Sputtered	r.t.	16
Ta ₂ O ₅	Sputtered	300	25

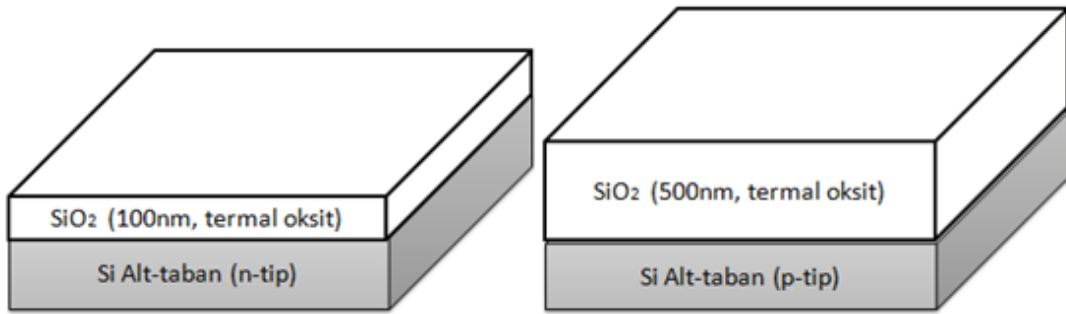
OTFT fabrikasyonlarında kullanılan diğer önemli bir dielektrik türü organik (polimer) dielektriklerdir. Polimer dielektrikler döndürerek kaplama, püskürterek kaplama ve baskı teknikleri gibi ucuz teknikler ile büyütülebilir. Polimer dielektrik filmler için birçok yaklaşım test edilmiştir. En yaygın method, uygun bir solvent içinde çözülmüş polimer çözeltisinin döndürerek kaplama, püskürterek kaplama veya baskı teknikleri ile kaplama yöntemleri ile filmi büyütme ve daha sonra solventin buharlaştırılması ile ince-filmin kurutulmasıdır. Ayrıca organik yalıtkan malzemeler esnek cihazlar üretmek için de uygundur. Ancak, ince-film mimarisi gereği, yalıtkan malzeme yarıiletkenin üzerine veya altına kaplanmalıdır. Bu durum fabrikasyon sürecinde bazı problemlere yol açabilmektedir. Eğer kullanılan organik yalıtkan ile organik yarıiletken benzer solventlerde çözünebiliyorsa, döndürerek kaplama veya baskı teknikleri gibi ıslak kaplama teknikleri uygulandığında, ikinci kaplama yapılırken kullanılan solvent ilk olarak kaplanan filmin yapısını bozabilmektedir. Ayrıca vakum-evaporasyon tekniği ile elektrotların kaplanması sırasında kullanılan metal elektrot organik yalıtkan malzemeye zarar verebilmektedir.

3. DENEYSEL YÖNTEM

3.1. Silikon Alt-Tabanın Temizlik Aşamaları

Bu çalışmada üzerine termal olarak SiO_2 (dielektrik katman) kaplanmış, yüksek katkılı (0,01 ohmcm), $\langle 100 \rangle$ yönelimine sahip, n-tip 100nm oksit tabakalı ve p-tip 500nm oksit tabakalı silikon alt-tabanlar kullanılmıştır (Şekil 3.1.). Kullanılan alt-tabanların tek tarafları cilalıdır. Bundan dolayı kapı kontağı alabilmek için SiO_2 katmanının bir kısmı asit yardımı ile kaldırılmalıdır. Geriye kalan kısımların temizliği ise cihaz performansı için kritik öneme sahiptir.

İlk önce Si alt-tabanlar belirli boyutlarda kesildi. Daha sonra kesilen alt-tabanın bir kısmı oje ile kaplandı (oje asitte çözünmez). Alt-taban %67,8'lik saflığa sahip HF asitine atılarak 2 dakika beklendi. Asitten çıkartılan numuneler ojeyi kaldırmak amacı ile aseton içerisinde, sonik titreştiricide 10 dakika boyunca titreştirildi. Takip eden aşamada numuneler argon gazı ile kurutuldu. Bu titreştirme ve kurutma işlemleri metanol, etanol ve saf su kullanılarak tekrarlandı. Böylece yüzeydeki kirlilikler mümkün olduğu kadar uzaklaştırıldı.



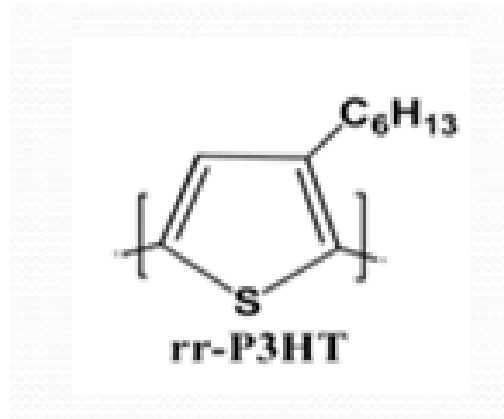
Şekil 3.1. Termal-oksitlenmiş, yüksek katkılı Si alt-tabanların profil görünümü

3.2. Döndürerek Kaplama Yöntemi ile rr-P3HT Filmi

Büyütme

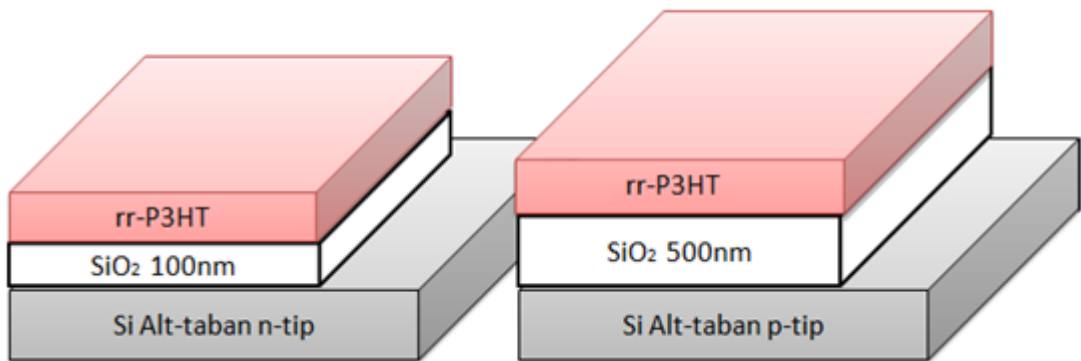
rr-P3HT (Şekil 3.2.) OTFT fabrikasyonlarında yaygın olarak kullanılan bir konjüge polimerdir. Kolay işlenebilirliği ve yüksek performansı nedeni ile tercih edilmektedir. rr-P3HT'nin belirli solventler içinde çözünebilme özelliğinden dolayı

ıslak kaplama tekniklerine uygundur. Ayrıca p-tip bir organik yarıiletken olmasından dolayı havada kararlılığı da yüksektir.



Şekil 3.2. rr-P3HT'nin molekül yapısı

rr-P3HT ince-film şu şekilde hazırlandı: 10 mg/ml oranında hazırlanan kloroform-P3HT karışımı 24 saat boyunca, 60 °C'de manyetik karıştırıcı ile karıştırıldı. Böylece çözünme işlemi tamamlandı. Yarıiletken film kaplanmadan önce Si alt-tabanların SiO₂ kaldırılan kısımları teflon bandı ile sarıldı. Bunu yapmaktaki amaç, yarıiletken polimerin sadece dielektrik katmanın üzerine kaplanmasıdır. Bu işlemlerden sonra, daha önceden hazırlanmış çözelti döndürerek kaplama yöntemi ile (2000 rpm, 30sn) SiO₂ katmanların üzerinde kaplandı. Kaplama işleminden sonra numuneler 150 °C'lik sıcaklıkta, oksijen ortamında 5 dakika boyunca tavlandı. Bu tavlamaadaki amaç filmde kalan solventin kurutulmasıdır. Bu aşamada cihazların profil görüntüsü Şekil 3.3.'te gösterilmiştir.



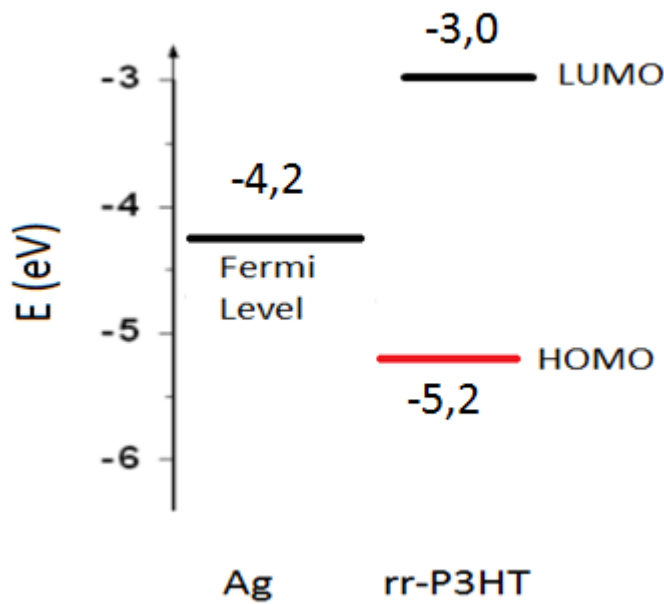
Şekil 3.3. Si /SiO₂/rr-P3HT yapısının profil görünümü

3.3. Elektrotların Kaplanma İşlemi

Son aşama ise kontakların kaplanma aşamasıdır. Saf gümüş (Ag) kapı, kaynak ve oluk elektrotları bir gölge maskesi kullanılarak, vakum buharlaştırma yöntemi ile 5×10^{-6} mb basınç altında kaplandı. Şekil 3.4'de vakum buharlaştırma sistemi ve kullanılan maske gösterilmiştir. Ag'nin Fermi seviyesi ile P3HT'nin HOMO ve LUMO seviyeleri Şekil 3.5.'te gösterilmiştir. Şekilden Ag'nin Fermi seviyesinin P3HT'nin HOMO seviyesine daha yakın olduğu gözlenmektedir. Buradan, üretilen cihazların p-kanal olarak çalışmaya müsait olduğu söylenebilir.

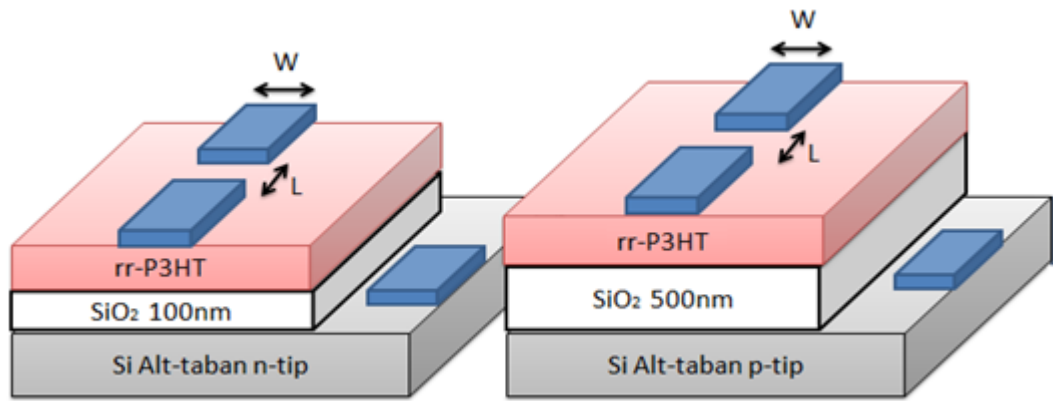


Şekil 3.4. Vakum buharlaştırma sistemi (sol) ve kullanılan maskenin görüntüleri (sağ)



Şekil 3.5. Ag ve rr-P3HT'nin enerji seviyeleri şeması [57]

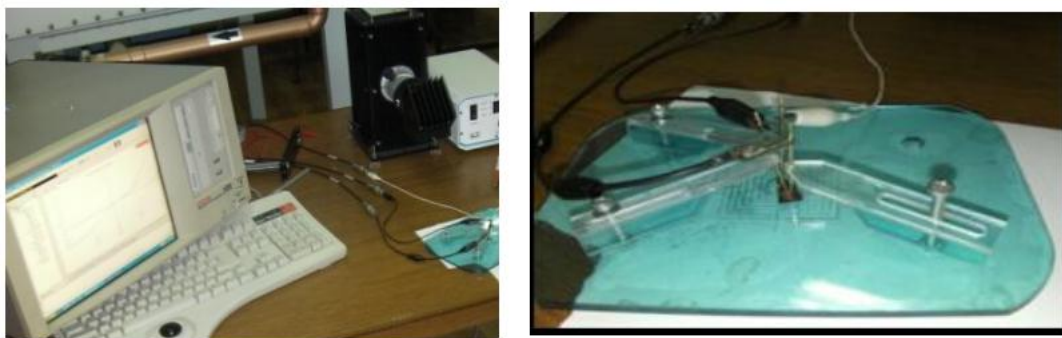
Kaynak ile oluk arası mesafe elektron mikroskobu ile belirlenmiştir. Bu mesafe OTFT'nin iletken kanalının uzunluğudur (L). Kullanılan maskenin boyutlarından dolayı iletken kanalın genişliği $W=0,4$ cm'dir. Bu iki parametre transistörün oluk-kaynak arasındaki akımı ve mobilitayı güçlü şekilde etkiler. Yine kullanılan maske sayesinde kaynak ve oluk elektrotları daha önceden büyütülmüş organik yarıiletkenin, kapı elektrotu ise Si yüzeyinin üzerine kaplanmış ve transistörler tamamlanmıştır. En son numuneler tekrar 150 °C'lik sıcaklıkla 5 dakika boyunca tavlanmıştır. Böylece kontaktların oturması ve kalan artık solventin de uzaklaştırılması sağlanmıştır. Üretilen transistörlerin profil görünümü Şekil 3.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. OTFT'nin son halinin profil görünümü OTFT'nin son halinin profil görünümü

3.4. Karakterizasyon

OTFT'nin çıktı ve iletim karakteristikleri 4200SCS Keithley cihazı kullanılarak alınmıştır. Karakterizasyon üç uçlu kontak mekanizması ile yapılmıştır. Şekil 3.7.'de elektriksel karakterizasyon sistemi gösterilmiştir.

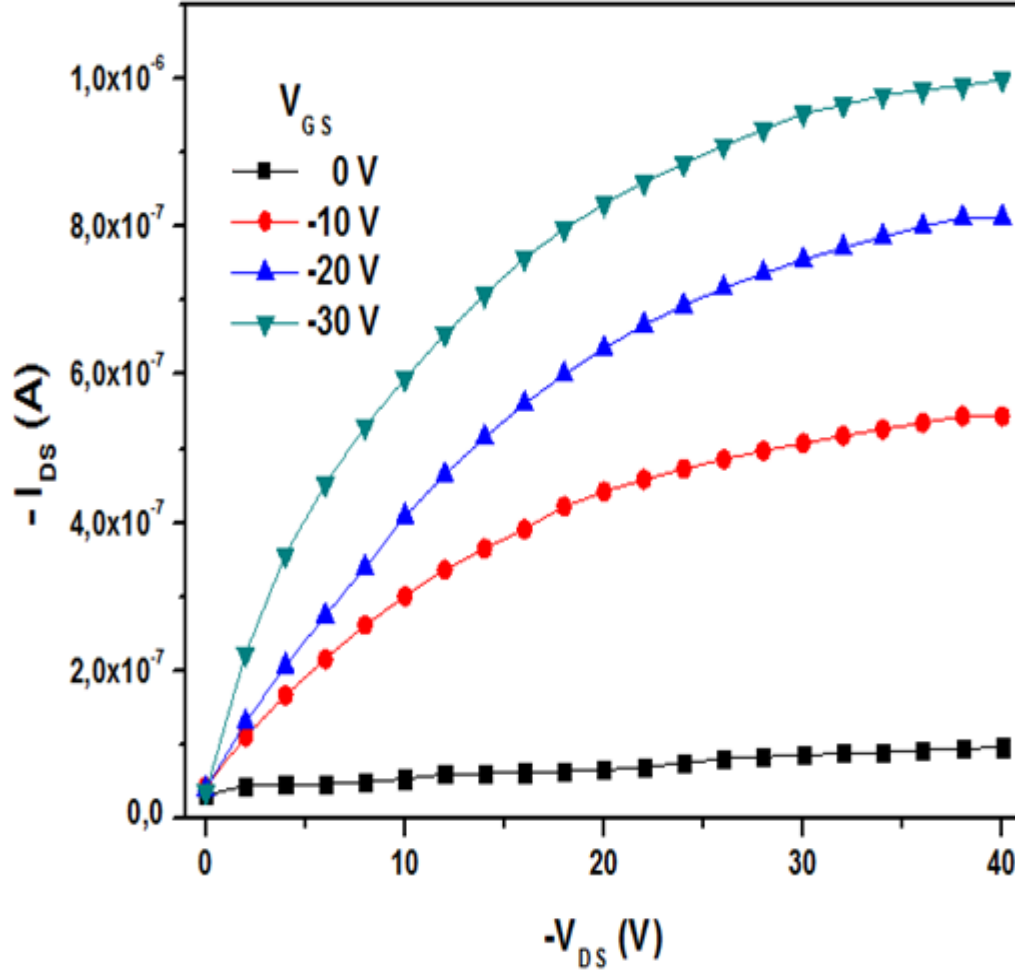


Şekil 3.7. Elektriksel karakterizasyon sistemi

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Si/100nm-SiO₂/rr-P3HT OTFT 'nin Çıktı (I-V)

Karakteristiği

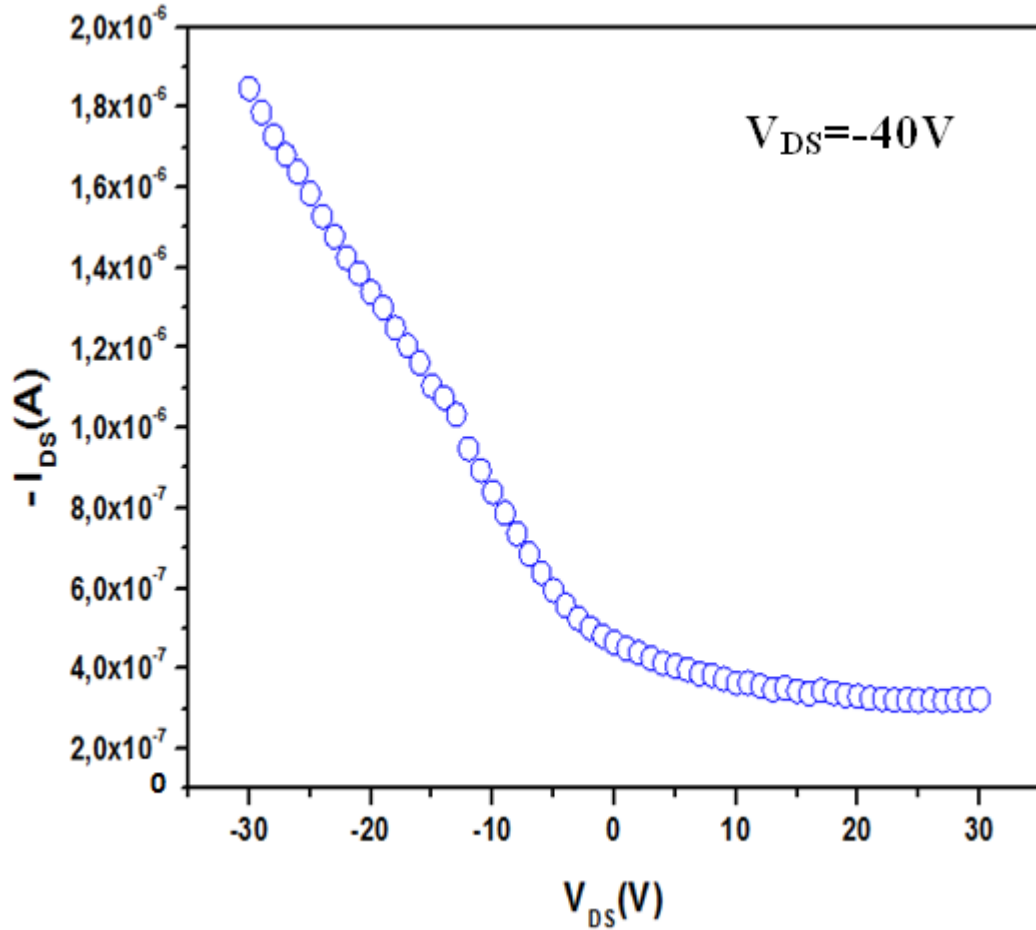


Şekil 4.1. Si/100nm-SiO₂/rr-P3hT OTFT 'nin Çıktı (I-V) Karakteristiği

Şekil 4.1.'de gösterilen karakteristik kaynak-oluk akımının (I_{DS}) kapı voltajına (V_{DS}) göre değişimini gösterir ve transistörün çıktı veya I-V karakteristiği olarak adlandırılır. $V_{DS}=0$ V'dan başlanarak, her adımda 2V arttırılarak $V_{DS}=-40$ V'a kadar kapı voltajı uygulanmış, $V_{GS}=0, -10, -20, -30$ V değerine karşılık $V_{DS}-I_{DS}$ eğrileri çizilmiştir. Karakteristik 4200SCS Keithley cihazı kullanılarak alınmıştır. Grafik çizimi Origin Pro 8 programı ile yapılmıştır.

4.2. Si/100nm-SiO₂/rr-P3HT OTFT'nin 1.İletim

Karakteristiği

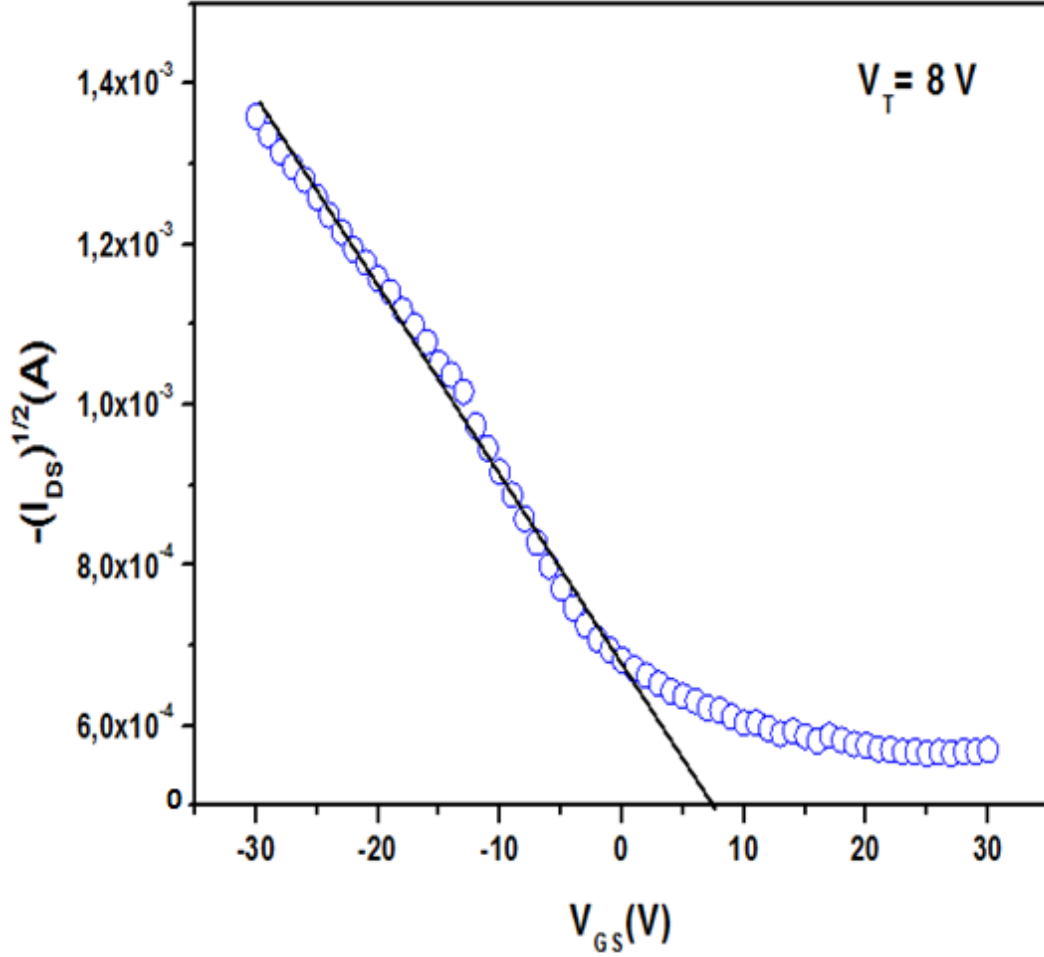


Şekil 4.2. Si/100nm-SiO₂/rr-P3hT OTFT'nin 1.İletim Karakteristiği

Şekil 4.2.'de gösterilen karakteristik sabit bir kaynak-oluk voltajında (V_{DS}), kaynak-oluk akımının (I_{DS}) kapı-kaynak voltajı (V_{GS}) ile değişimini göstermektedir. Karakteristik elde edilirken $V_{DS} = -40V$ değerine sabitlenmiş ($V_{DS} = -40V$ değeri transistörün doyum voltajı değeridir) ve V_{GS} kapı voltajı $-30V$ ile $30V$ arasında taranmıştır. Farklı V_{GS} değerlerine karşılık gelen I_{DS} değerleri bulunmuştur. Karakteristik 4200SCS Keithley cihazı kullanılarak alınmıştır. Grafik çizimi Origin Pro 8 programı ile yapılmıştır.

4.3. Si/100nm-SiO₂/rr-P3HT OTFT 'nin 2.İletim

Karakteristiği



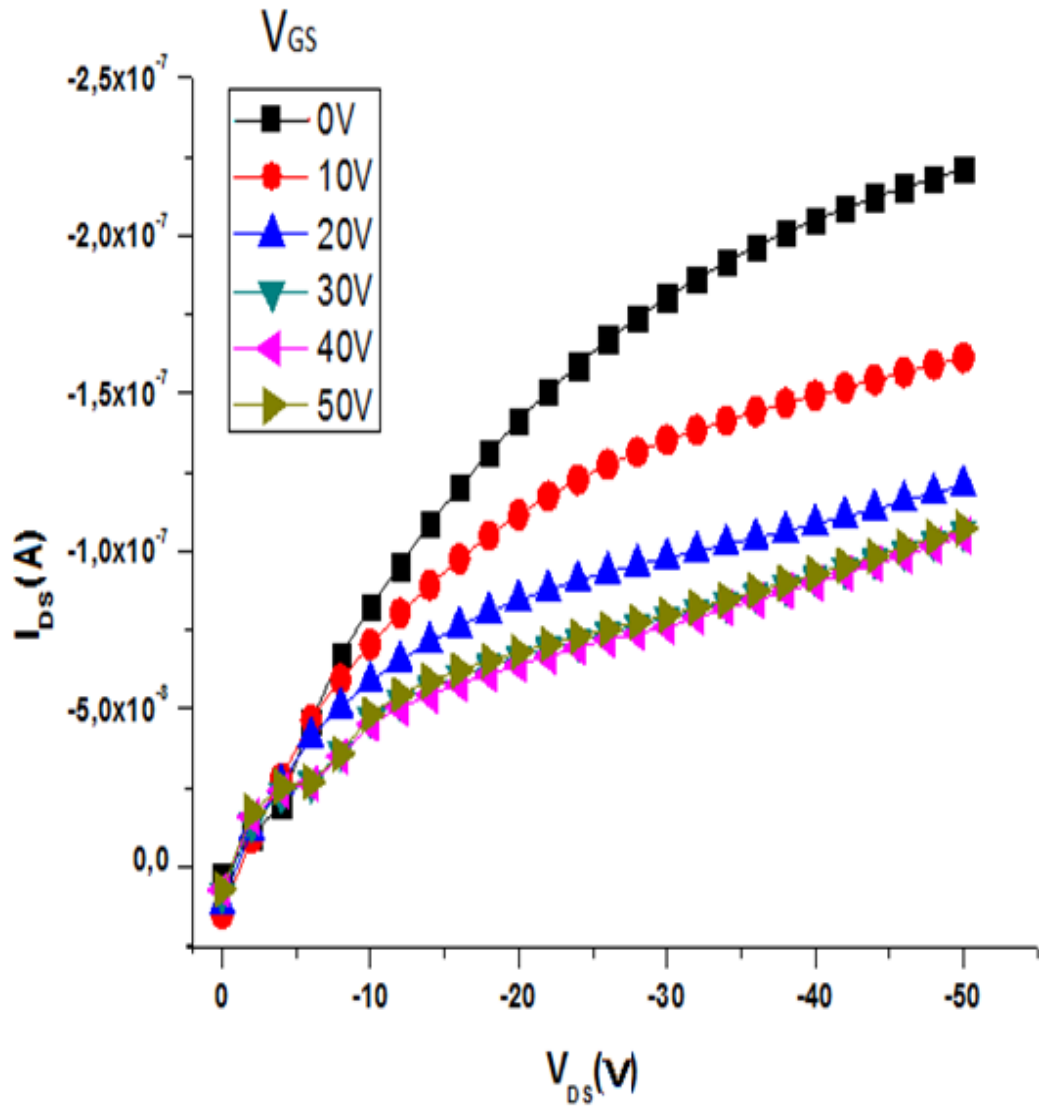
Şekil 4.3. Si/100nm-SiO₂/rr-P3HT OTFT'nin 2.İletim Karakteristiği

Şekil 4.3.'de gösterilen karakteristik kaynak-oluk arasındaki akımın kare kökünün kaynak-oluk arasındaki voltaj ile değişimini göstermektedir. Bu karakteristik Şekil 4.2.'de gösterilen karakteristiğin I_{DS} eksenin karekökü alınarak tekrar çizilmesi ile elde edilmiştir. Grafik çizimi Origin Pro 8 programı ile yapılmıştır.

4.4. Si/500nm-SiO₂/rr-P3HT OTFT 'nin Çıktı (I-V)

Karakteristiği

Şekil 4.4.'de gösterilen karakteristik kaynak-oluk akımının (I_{DS}) kapı voltajına (V_{DS}) göre değişimini gösterir ve transistörün çıktı veya I-V karakteristiği olarak adlandırılır. $V_{DS}=0V$ 'dan başlanarak, her adımda 2V arttırılarak $V_{DS}=-50V$ 'a kadar kaynak voltajları uygulanmış; $V_{GS}=0, 10, 20, 30, 40, 50 V$ değerine karşılık $V_{DS}-I_{DS}$ eğrileri çizilmiştir. Karakteristik 4200SCS Keithley cihazı kullanılarak alınmıştır. Grafik çizimi Origin Pro 8 programı ile yapılmıştır.

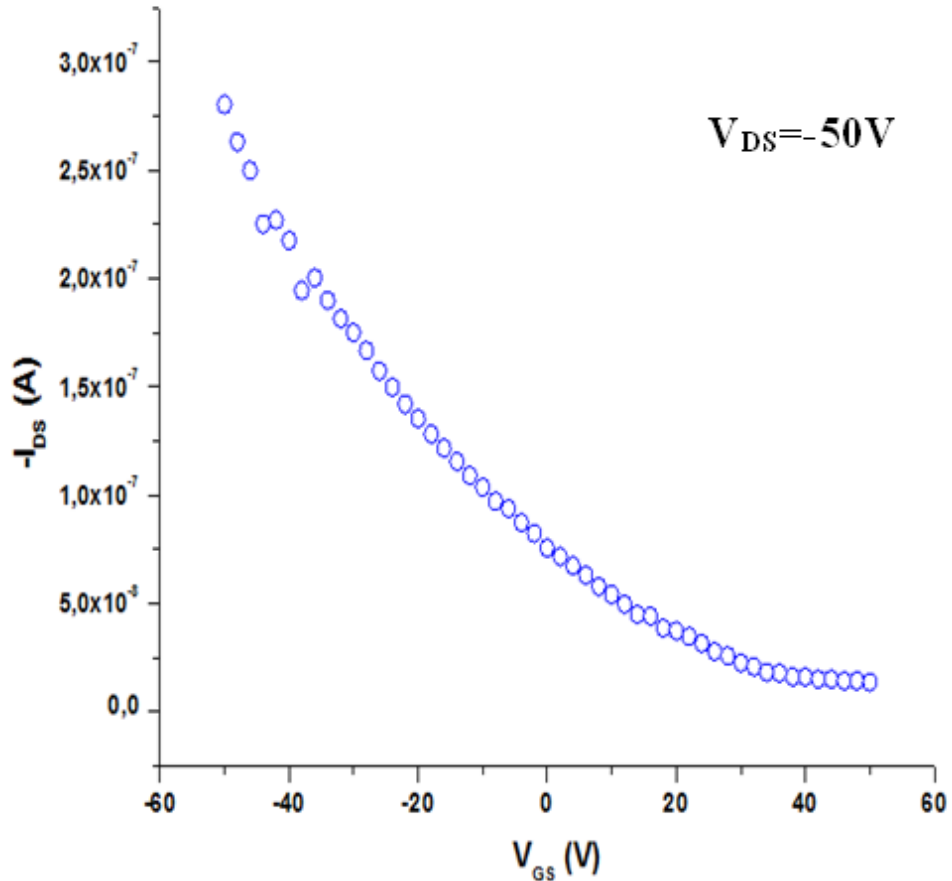


Şekil 4.4. Si/500nm-SiO₂/rr-P3HT OTFT'nin Çıktı (IV Karakteristiği)

4.5. Si/500nm-SiO₂/rr-P3HT OTFT'nin 1.İletim

Karakteristiği

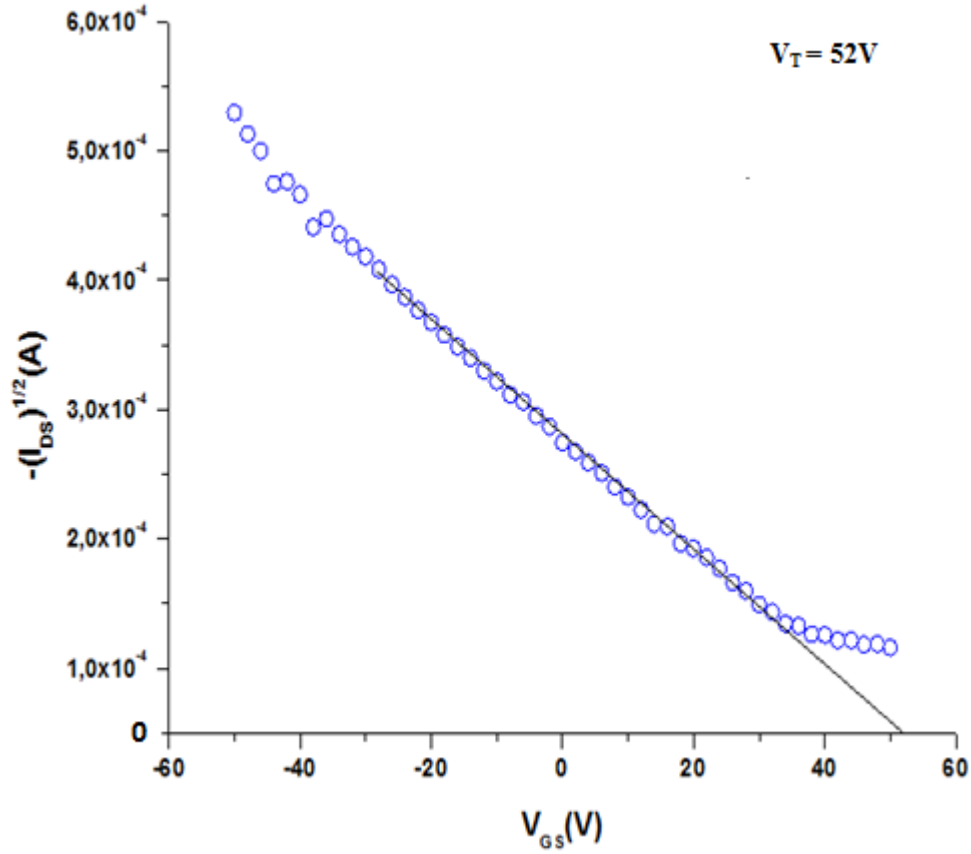
Şekil 4.5.'de gösterilen karakteristik sabit bir kaynak-oluk voltajında (V_{DS}), kaynak-oluk akımının (I_{DS}) kapı-kaynak voltajı (V_{GS}) ile değişimini göstermektedir. Karakteristik elde edilirken $V_{DS}=-50V$ değeri sabitlenmiş ve V_{GS} kapı voltajı -60V ile 60V arasında taranmıştır. Farklı V_{GS} değerlerine karşılık gelen I_{DS} değerleri bulunmuştur. Karakteristik 4200SCS Keithley cihazı kullanılarak alınmıştır. Grafik çizimi Origin Pro 8 programı ile yapılmıştır.



Şekil 4.5. Si/500nm-SiO₂/rr-P3HT OTFT'nin 1.İletim Karakteristiği

4.6. Si/500nm-SiO₂/rr-P3HT OTFT'nin 2.İletim

Karakteristiği



Şekil 4.6. Si/500nm-SiO₂/rr-P3HT OTFT'nin 2.İletim Karakteristiği

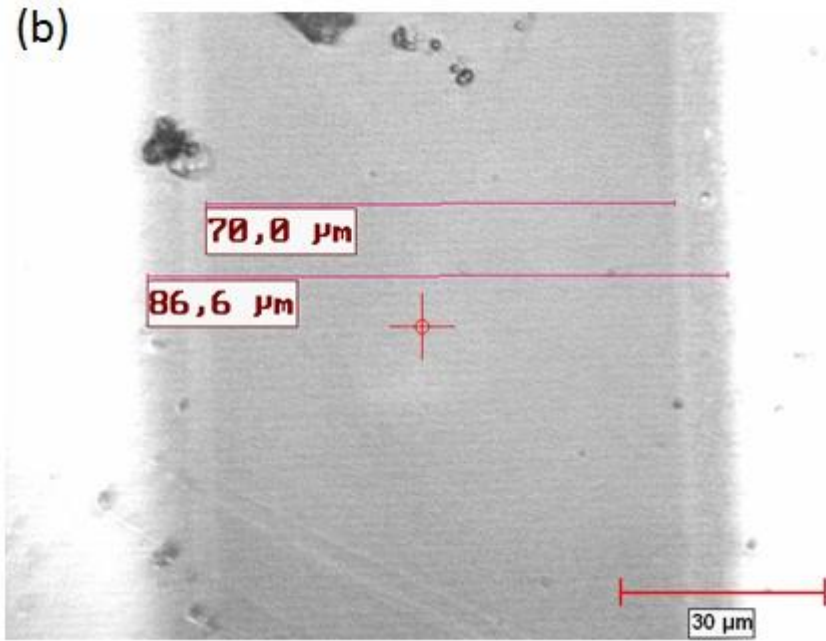
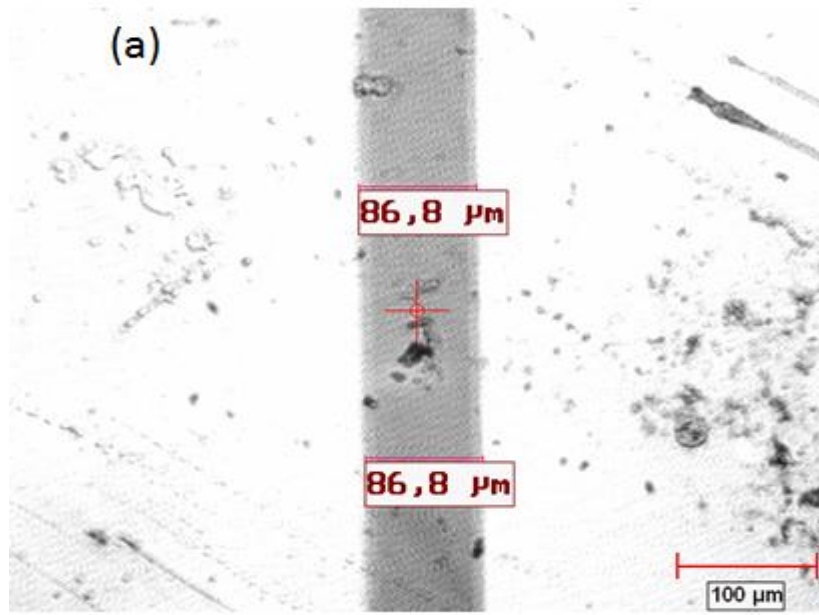
Şekil 4.6.'de gösterilen karakteristik kaynak-oluk arasındaki akımın kare kökünün kaynak-oluk arasındaki voltaj ile değişimini göstermektedir. Bu karakteristik Şekil 4.5.'de gösterilen karakteristiğin I_{DS} eksenin karekökü alınarak tekrar çizilmesi ile elde edilmiştir. Grafik çizimi Origin Pro 8 programı ile yapılmıştır.

4.7. Kaynak-Oluk Arasının (İtken Kanal) Elektron

Mikroskopi Görüntüleri

Şekil 4.7.'de kaynak-oluk arasının yani OTFT'nin iletken kanalının elektron mikroskopi görüntüleri gösterilmiştir. 100 μ m skalalı görüntüde (Şekil 4.7.(a)) kanal

uzunluğunun $86,8\mu\text{m}$ olduğu görülmektedir. Ancak $30\mu\text{m}$ skalalı görüntüde (Şekil 4.7.(b)) $16,8\mu\text{m}$ lik bir gölgenin meydana geldiği görülmektedir. Yani elektrotların kaplanması esnasında gümüşün gölge yaptığı ve iletken kanalın $70\mu\text{m}$ boyutuna düştüğü görülmektedir; kanal uzunluğu (L) $70\mu\text{m}$ alınmış ve hesaplamalar bu şekilde yapılmıştır (her iki transistör için).



Şekil 4.7. Kaynak-oluk arasının (iletken kanal) elektron mikroskopi görüntüleri. (a): $100\mu\text{m}$ skalada. (b): $30\mu\text{m}$ skalada.

5. SONUÇ VE YORUM

5.1.Si/100nm-SiO₂/rr-P3HT Çıktı (I-V) Karakteristiği

Şekil 4.1.'de görüldüğü gibi $V_{GS} = 0V$ değerinde I_{DS} değeri sıfıra çok yakındır. Yine de düşük bir akım gözlenmektedir. Yani, $V_{GS}=0V$ 'da dahi kanaldan akım geçmektedir. Artan V_{GS} değerlerinde, akımın düşük V_{DS} değerlerinde doğrusal olarak arttığı, yüksek V_{DS} değerlerinde ise bu doğrusal artışın bozulduğu ve akımın doyuma gittiği açık şekilde gözlenmektedir. I_{DS} akımının yaklaşık $V_{GS}=-40V$ değerinde doyuma gittiği söylenebilir; yani üretilen cihazın çalışma voltajı $-40V$ 'dur.

5.2. Si/500nm-SiO₂/rr-P3HT Çıktı (I-V) Karakteristiği

Şekil 4.4.'de $V_{GS}=0, 10, 20, 30, 40, 50 V$ pozitif kapı voltajlarına karşılık gelen V_{GS} - I_{DS} eğriler gözükmemektedir. Kapı voltajının pozitif alınmasının nedeni pozitif bölgedeki davranışın gözlemlenmesidir. Şekilden anlaşılacağı gibi $V_{GS}=0V$ değerinde akım en yüksek değerdedir. Pozitif olarak artan kapı voltajı değerlerinde kaynak-oluk akımı azalmaktadır. Bunun nedeni kullanılan yarıiletken polimerin p-tip bir yarıiletken polimer olmasıdır. Pozitif kapı voltajı uygulandığında iletken kanal-yalıtkan arayüzünde elektronlar birikmektedir; p-kanal olarak çalışan transistörün akım değerleri düşmektedir. Ancak, $-50 V$ kapı voltajı değerine geldikten sonra akım daha fazla düşmemektedir. Bu seviyede görülen akım iletken kanaldan sızan sızıntı akımıdır. Transistörün yaklaşık $V_{DS}=-50 V$ değerinde doyuma gittiği söylenebilir.

5.3. Si/100nm-SiO₂/rr-P3 İletim Karakteristikleri

Şekil 4.2.'deki 1. iletim karakteristiğinden, akımın pozitif-yüksek V_{GS} değerlerinde sabit olduğu, yaklaşık $10V$ değerinden sonra lineer olarak artmaya başladığı gözlenmektedir. Bu, transistörün belirli bir V_{GS} değerinden sonra çalışmaya başladığı anlamına gelmektedir. Ayrıca $V_G=0V$ değerinde de yaklaşık $I_{DS}=1 \times 10^{-7} A$ kadar bir akım vardır. Çıktı karakteristiğinden de bu akım gözlemlenebilir. Ek olarak, karakteristikten akımın en düşük ve en yüksek olduğu değerler oranlanarak akım açık/kapalı oranı (I_{on}/I_{off}) bulunur.

Şekil 4.3.'deki 2. iletim karakteristiğinden akımın $V_{GS} = 8V$ değerinden sonra artmaya başladığı açık şekilde gözlenmektedir. Bu değer transistörün eşik voltajı değeridir.

5.4. Si/500nm-SiO₂/rr-P3HT İletim Karakteristikleri

Şekil 4.5.'deki 1. iletim karakteristiğinden, akımın pozitif-yüksek V_{GS} değerlerinde sabitlendiği, yaklaşık 45V değerinden sonra lineer olarak artmaya başladığı gözlenmektedir. $V_{GS}=0V$ değerinde $I_{DS}=1 \times 10^{-8}$ A kadar bir akım gözlenmektedir. Çıktı karakteristiğinden de bu akım gözlemenebilir.

Şekil 4.6.'daki 2. iletim karakteristiğinden akımın yaklaşık $V_{GS} = 50V$ değerinden düşük değerlerde artmaya başladığı açık şekilde gözlenmektedir. Bu değer transistörün eşik voltajı değeridir.

5.5. I_{on}/I_{off} Değerleri

Transistörler için bir diğer önemli parametre ise açık/kapalı akım oranıdır (I_{on}/I_{off}). Bu oran transistörün kaynak voltajı uygulandığı ve uygulanmadığı durumlarda kanaldan geçen akımların oranını gösterir. Doğal olarak bu oranın büyüklüğü gerçek uygulamalar için önemlidir.

I_{on}/I_{off} değerleri Şekil 4.3. ve Şekil 4.4'de akım değerlerinin logaritmaları alınarak akım en yüksek ve en düşük olduğu durumlar birbirinden çıkartılmış ve böylece akım açık/kapalı oranları bulunmuştur. Bulunan değerler her iki transistör için yaklaşık $I_{on}/I_{off}=10^1$ 'dir. Bu değer henüz gerçek uygulamalar için yeterli değildir. Bu oran birçok parametreye bağlıdır. İnce-filmin kalitesi, kontakların kalitesi ve yalıtkanın kalitesi bu parametrelerin en önemlileridir.

5.6. Eşik Voltajları (V_T)

Eşik voltajı da OTFT'ler için önemli bir parametredir; hangi kapı voltajı değerinden sonra kanaldan akım akmaya başladığını gösterir. Bu parametrenin düşük olması gerçek uygulamalar için gereklidir.

V_T değerleri Şekil 4.3. ve Şekil 4.6.'da görülen doğruların eksenleri kestikleri noktalara karşılık gelen voltaj değerleridir. Karakteristiklerden, Si/100nm-SiO₂/rr-P3HT için $V_T=8V$, Si/500nm-SiO₂/rr-P3HT için $V_T=52V$ değerleri elde edilmiştir. V_T değerinin pozitif olması, kapı voltajı 0V olsa dahi belirli bir I_{DS} akımın geçtiği anlamına gelmektedir. Si/100nm-SiO₂/rr-P3HT yapısında olan OTFT 8V pozitif kapı voltajında kapalı duruma gelirken Si/500nm-SiO₂/rr-P3HT 52V pozitif kapı voltajında kapalı duruma gelmektedir. Silikon alt-taban kullanılarak üretilen cihazlarda bu karakteristik gözlenmektedir [58,59]. Buradan, kullanılan kapı dielektriğinin eşik voltajların üzerindeki etkisi gözlenmektedir.

5.7. Mobiliteler

Mobilite klasik elektronik cihazlarda olduğu gibi organik elektronik cihazlar için de çok önemli bir parametredir.

Üretilen cihazların kapı kapasitansları, $\epsilon_i=3,9$, $\epsilon_0=8,8542 \times 10^{-12}$ F/m, Şekil 4.4'deki elektron mikroskopu görüntülerinden $L=70\mu m$ ve kullanılan maskenin $W=4000\mu m$ değerleri Eşitlik (2.4)'de yerlerine yazılarak bulunmuştur. Bulunan değerler: Si/100nm-SiO₂/rr-P3HT için $C_i=96,68$ nF cm⁻¹ ve Si/500nm-SiO₂/rr-P3HT için $C_i=19,33$ nF cm⁻¹. Bulunan C_i değerleri, Şekil 4.3. ve Şekil 4.6.'daki eğrilerin eğimleri ve $L=70 \mu m$ ve $W=4000\mu m$ değerleri alınarak bütün bu veriler Eşitlik (2.3)'te yerine yazılarak mobiliteler: Si/100nm-SiO₂/rr-P3HT için $\mu=35 \times 10^{-3}$ cm² V⁻¹ s⁻¹, Si/500nm-SiO₂/rr-P3HT için $\mu=1 \times 10^{-3}$ cm² V⁻¹ s⁻¹ bulunmuştur. Bu değerler rr-P3HT'nin bu cihazlar için ölçülen mobilite değerleridir. Daha önceden rr-P3HT'nin mobilite değerinden bahsedilmişti (bkz. Bölüm 2.3.1.). Buradan, üretilen cihazların mobiliteleri tatmin edici derecede yüksektir. 100nm kalınlıkta dielektrik tabakaya sahip Si/100nm-SiO₂/rr-P3HT OTFT'nin mobilite değerinin yüksek çıkması şaşırtıcı değildir. Çünkü mobilite dielektrik katmanın kapasitansına lineer olarak bağlıdır; kapasitans da kalınlık ile ters orantılıdır.

OTFT'lerde kullanılan yarıiletkenlerin mobiliteleri cihaz fabrikasyon şartlarına ve cihaz geometrilerine kuvvetli şekilde bağlı olduğundan daha iyi mobilite değerleri elde edebilmek için çalışmalar devam etmektedir. Bunu elde edebilmek için kanal boyutlarını değiştirmek ve kullanılan dielektrik malzemenin kalitesini arttırmak veya daha yüksek dielektrik sabiti olan malzemeler kullanmak, P3HT'nin HOMO

seviyesine daha yakın Fermi seviyesi olan kontaklar kullanmak ve yarıiletken-yalıtkan arayüzünde iyileştirmeler yapmak en uygun yöntemlerdir. Son olarak, elde edilen değerler Çizelge 5.1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Sonuçlar çizelgesi

Tip	nSi, <100>, Yüksek Katlı	pSi, <100>, Yüksek Katlı
Oksit Kalınlığı	100nm	500nm
Kapasitans (Ci)	96.68 nF cm ⁻¹	19,33 nF cm ⁻¹
Çözelti	10mg/ml rr-P3HT/Kloform	10mg/ml rr-P3HT/Kloform
Kaplama Hızı/Süre	2000rpm/30s	2000rpm/30s
Tavlama Sıcaklığı/Süre	150 C/5+5 dk	150 C/5+5dk
W/L Oranı	4000/70	4000/70
V _T	8V	52V
I _{on} /I _{off}	10	10
μ	35x10 ⁻³ cm ² V ⁻¹ s ⁻¹	1x10 ⁻³ cm ² V ⁻¹ s ⁻¹

KAYNAKLAR

- [1] J. Koenigsberger, J. Weiss, Ann. Phys. 1911, 35, 1-46
- [2] An enlightening history of the emergence of semiconductors can be found in: F.A Stahl, Am. J Phys. 2003, 71, 1170-1173
- [3] <http://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor>
- [4] Organic Electronics, Materials, Manufacturing Applications. Edited by Hagen Klauk copyright © 2006 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim ISBN: 3-527-31264-1, Chap. I
- [5] N. Karl, Organic semiconductors, in O. Madelung, M. Schulz, and H. Weiss (Eds.), Landolt-Boernstein (New Series), Group III, Vol. 17 Semiconductors, Sub-volume 17i, Page 106. Springer, Berlin, 1985, Chap. I
- [6] J. Koenigsberger, K. Schiling, Ann. Physik 32, 179 (1910)
- [7] M. Volmer, Ann. Physik 40, 775 (1913)
- [8] E. A. Silinsh. Organic Molecular Crystals. Springer, Berlin 1980
- [9] M. Pope and C. E. Swenberg. Electronic Processes in Organic Crystals. Clarendon Press, Oxford 1982
- [10] C. K. Chiang, C. R. Fincher, Jr., Y. W. Park, A. J. Heeger, H. Shirakawa, E. J. Louis, S. C. Gau, and Alan G. MacDiarmid, Phys. Rev. Lett. 39, 1098 (1977)
- [11] T. A. Skotheim (Ed.). Handbook of Conducting Polymers. M. Dekker, New York 1986
- [12] Pioneer Co. (Japan). In November 1997 Pioneer Co. in Japan commercialized a monochrome 256x64 dot matrix OLED display for automotive applications
- [13] Physics of Organic Semiconductors. Edited by W. Brütting Copyright © 2005 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim ISBN 3-527-40550-X
- [14] K. P. C. Vollhardt, Organische Chemie, VHC-Verlag, Weinheim 1990
- [15] N. Karl, J. Marktanner, Mol. Cryst. Liq. Cryst. 355, 149 (2001)

- [16] N. Karl: Charge Carrier Mobility in Organic Crystals, in R. Farchioni, G. Grosso (Eds) Organic Electronic Materials, Springer 2001
- [17] H. Bassler, *phys. stat. sol. (b)* 107, 9 (1981)
- [18] C. D. Dimitrakopoulos, P.R.L. Malenfant. *Adv. Mater.* 14, 99 (2002)
- [19] H. Klauk, M. Halik, U. Zschieschang, G. Schmid, C. Dehm, *Appl. Phys. Lett.* 84, 2673 (2004)
- [20] T. W. Kelley, D. V. Muiers, P. F. Baude, T. P. Smith T. D. Jones, *Mat. Res. Soc. Symp. proc.* 771, 169 (2003)
- [21] J. E. Lilienfeld, US Patent 1, 745, 175, 1930
- [22] D. Kahng, M. M. Atalla, in IRE Solid-State Devices Research Conference, Pittsburg, PA, 1960; D.Kahng, US Patent 3, 102, 230, 1963
- [23] F. Ebisawa, T. Kurokawa and S. Nara, *Journal of Applied Physics*, 54, 3255, 1983
- [24] P. K Weimer, *Proc. IRE* 1962, 50, 1462-1469
- [25] W. E. Spear, P. G. Le Comber, *J. Non-Cryst. Solids* 1972, 8-10, 727-738
- [26] G. W. Neudeck, A. K. Malhotra, *Solid State Electron.* 1976, 19, 721-729
- [27] A. Kahn, N. Koch, W. Gao, *J. Polym. Sci. B, Polym. Phys.* 2003, 41, 2529-2548
- [28] Stadler P., 2006, Hysteresis in Bio-Organic Field-Effect Transistors,
Diploma Thesis at Linz Institute of Organic Solar Cells
- [29] D. Holmes, S. Kumaraswamy, A. J. Matzger, K. P. C Vollhardt, *Chem. Eur. J.* 1999, 5, 3399-3412
- [30] B. Servet, G. Horowitz, S. Ries, O. Lagorse, P. Alnot, A. Yassar, F. Deloffre, P. Srivastava, R. Hajlaoui, P. Lang, F. Garnier, *Chem. Mater.* 1994, 6 1809-1815
- [31] F. Garnier, A. Yassar, R. Hajlaoui, G. Horowitz, F. Deloffre, B. Servet, S. Ries, P. Alnot, *J. Am. Chem. Soc.* 1993, 115, 8716-8721

- [32] T. Minakata, I. Nagoya, M. Ozaki, *J. Appl. Phys.* 1991, 69, 7354-7356
- [33] C. D. Dimitrakopoulos, A. R. Brown, A. Pomp, *J. Appl. Phys.* 1996, 80, 2501-2508
- [34] C. Tanase, E. J. Meijer, P. W. M. Blom, D. M. de Leeuw, *Org. Electron.* 2003, 4, 33-37
- [35] N. F. Mott, R. W. Gurney, *Elektronic Processes in Ionic Crystals*, Clarendon Press, Oxford, 1940
- [36] A. Dodabalapur, L. Torsi, H. E. Katz, *Science* 1995, 268, 270-271
- [37] J.C. Sancho-Garcia, G.Horowitz, J.L. Bredas, J. Cornil, *J. Chem. Phys.* 2003, 119, 12563-12568
- [38] F. Garnier, R. Hajlaoui, A. Yassar, P. Srivastava, *Science* 1994, 265, 1684-1686
- [39] Z. N. Bao, Y. Feng, A. Dodabalapur, V. R. Raju, A. J. Lovinger, *Chem. Mater.* 1997, 9, 1299
- [40] J. A. Rogers, Z.N.Bao, A. Makhija, P. Braun, *Adv. Mater.* 1999, 11, 741-745
- [41] Y. Xia, G. M. Whitesides, *Angrew. Chem. Int. Ed.* 1998, 37, 550-575
- [42] H. Sirringhaus, T. Kawase, R. H. Friend, T. Shimoda, M. Inbasekaran, W. Wu, E. P. Woo, *Science* 2000, 290, 2123-2126
- [43] G. B. Blanchet, Y. L. Loo, J. A. Rogers, F. Gao, C. R. Fincher, *Appl. Phys. Lett.* 2003, 82, 463-465
- [44] H. Sirringhaus, P. J. Brown, R. H. Friend, M. M. Nielsen, K. Bechgaard, B. M. W. Langeveldvoss, A. J. H. Spiering, R. A. J. Jasssen, E. W. Meijer, P. Herwig, D. M. de Leeuw, *Nature* 1999, 401, 685-688
- [45] H. Yang, T.J. Shin, L. Yang, C.Y. Ryu, Z. Bao, *Adv. Funct. Mater.* 2005, 15, No.4, April
- [46] T. W. Kelley, D. V. Muyres, P. F. Baude, T. P. Smith, T. D. Jones, *MRS Symp. Proc.* 2003, 777, 169-179

- [47] C. P. Jarret, K. Pincler, R. Newbould, R. H. Friend, *Synth. Metal.* 1996, 77, 35-38
- [48] H. E. Katz, A. J. Lovinger, J. Johnson, C. Kloc, T. Siegrist, W. Li, Y. Y. Lin, A. Dodabalapur, *Nature* 2000, 404, 478-481
- [49] E. J. Meijer, D. M. De leeuw, S. Setayesh, E. van Veenendaal, B. H. Huisman, P. W. M. Blom, J. C. Hummelen, U. Scherf, T. M. Klapwijk, *Nature Mater.* 2003, 2, 678-682
- [50] R. W. I. de Boer, T. M. Klapwijk, A. F. Morpurgo, *Appl. Phys. Lett.* 2003, 83, 4345-4347
- [51] V. Podzorov, V. M. Pudalov, M. E. Gershenson, *Appl. Phys. Lett.* 2003, 82, 1739-1741
- [52] V. Podzorov, E. Menard, A. Borissov, V. Kiryukhin, J. A. Rojers, M. E. Gershenson, *Phys. Rev. Lett.* 2004, 93, 086602
- [53] H. Yang, T.J. Shin, L. Yang, C.Y. Ryu, Z. Bao, *Adv. Funct. Mater.* 2005, 15, No.4, April
- [54] A. Tsumaru et al. *Appl. Phys. Lett.* 1986, 49, 1210
- [55] C. D. Sheraw et al. *Appl. Phys. Lett.* 2002, 80, 1088-1090
- [56] B. K. Crone et al. *J. Appl. Phys.* 2001, 89, 5125
- [57] Beek, W. J. E., Wienk, M. M., and Janssen, R. J. A., Efficient hybrid solar cells from zinc oxide nanoparticles and a conjugated polymer. *Advanced Materials*, 2004. 16(12): p. 1009-1013
- [58] S. M. Goetz et al. *Organic Electronics* 10, 2009, 573-580
- [59] Hoichang Yang et al. *Adv. Funct. Mater.* 2005, 15, No.4, April

ÖZGEÇMİŞ

Fatih Önal 08.12.1985 yılında Kayseri ilinin Pınarbaşı ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğretimini Kocaeli'nde tamamladı. Bir sene İngilizce hazırlık sınıfından sonra, 2005 yılında girdiği Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsünü Fizik Bölümü'nü 2009 yılında lisans derecesi ile bitirdi. 2009-2010 Eğitim-Öğretim yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fizik Bölümü'nde yüksek lisans programına başladı.