

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ESNEK ALTTABAN ÜZERİNDE BÜYÜTÜLEN ORGANİK
ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLER ve ELEKTRİKSEL
KARAKTERİZASYONLARI

HASAN TÜRKAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE
2014

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ESNEK ALTTABAN ÜZERİNDE
BÜYÜTÜLEN ORGANİK ALAN ETKİLİ
TRANSİSTÖRLER ve ELEKTRİKSEL
KARAKTERİZASYONLARI

HASAN TÜRKAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. SAİT EREN SAN
II. DANIŞMANI
DOÇ. DR. MUSTAFA OKUTAN

GEBZE

2014



**GEBZE YÜKSEK
TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
.....30.12.2017..... tarih ve 2017.../...6.8..... sayılı kararıyla oluşturulan
jüri tarafından 02/01/2014.... tarihinde tez savunma sınavı yapılan Hasan TÜRKAN
'ın tez çalışması Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul
edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

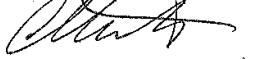
(TEZ DANIŞMANI)

: Prof. Dr. Sait Eren SAN


ÜYE

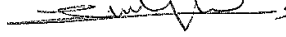
(EŞ DANIŞMAN)

: Doç. Dr. Mustafa OKUTAN



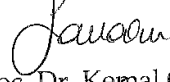
ÜYE

: Doç. Dr. Yusuf YERLİ



ÜYE

: Doç. Dr. Savaş BERBER



ÜYE

: Doç. Dr. Kemal ÖZDOĞAN



ONAY

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Yeni nesil esnek organik elektronik teknolojilerinin öncüsü, organik alan etkili transistörler (OFET) dir. Günümüzde kullanım alanları da gittikçe artmaktadır. Mesela; akıllı pikseller, radyo frekansı ile tanımlama etiketleri, elektronik kartlar için sürücüler ve düz panel ekranların sürücü devreleri gibi ucuz maliyetli elektronik uygulamaları için büyük potansiyele sahiptirler. Klasik alan etkili transistörlerde aktif katman olarak silisyum ve germanyum gibi inorganik yarıiletken malzemeler kullanılırken, OFET'lerde organik yarıiletken malzemeler kullanılır. rr-P3HT polimeri, çözelti bazlı kaplanabilmesi ve düşük maliyetli olmasından dolayı çok kullanılan bir organik yarıiletkenidir.

Yaptığımız bu tez çalışmasında, ITO kaplı pet alt taban üzerinde esnek organik alan etkili transistörler başarıyla üretilmiş ve I-V karakterizasyon eğrileri elde edilmiştir. Bu eğriler değerlendirilerek üretilen esnek OFET'i karakterize eden eşik voltajı, akım açık/kapalı oranı ve yük-taşıyıcı mobilitesi gibi parametreler hesaplanmıştır. Bu karakterizasyon işlemlerinin tümü Keithley 4200SCS cihazı ile yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: OFET, Organik malzemeler, rr-P3HT.

SUMMARY

The pioneer of new generation flexible, organic electronic devices are organic field-effect transistors (OFETs). At the present time, their area of usage are increasing. For example, they have a great potential for smart pixels, radio frequency identification tags, drivers for electronic papers, and driving circuits for flat-panel displays. While semiconductors like Si, Ge are used for active layer in conventional field-effect transistor, organic semiconductors are being used in OFETs. rr-P3HT (regio-regular poly(3-hexylthiophene)) is a commonly used organic semiconductor because of its low cost and possibility of solution based coating. Furthermore, organic materials allows us to make flexible electronic devices.

In this thesis, organic field-effect transistors were grown on flexible substrate (plastic). The substrate was coated by indium tin oxide (ITO). We have used rr-P3HT as organic semiconductor and poly methyl metacrylate (PMMA) as gate dielectric. 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.

Keywords: OFET, Organic materials, rr-P3HT.

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 Doç. Dr. Mustafa OKUTAN'a teőekkürü bir borç bilirim.

alıőmalar sırasında desteğini ve yardımını esirgemeyen değerli arkadaşlarım Fatih ÖNAL, Arif KÖSEMEN ve Zühal ALPARSLAN KÖSEMEN'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Yarıiletken ve Özellikleri	1
1.2. Yarıiletken İnce Filmler	5
2.ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLER	7
2.1. Organik Yarıiletkenler	7
2.2. Organik Yarıiletken Malzemeler	8
2.3. Organik Yarıiletkenlerin Temel Özellikleri	10
2.4. Yük Taşıyıcı İletimi	11
2.5. Transistörler	14
2.6. OFET	16
2.7. Organik İnce-Film Transistör Yapısı	17
2.8. OFET'lerin Çalışma Prensibi ve Parametreleri	19
2.9. İnce Filmin Kalınlığının Etkisi	22
2.10. Üretim Teknikleri	27
2.11. OFET Fabrikasyonlarında Kullanılan Malzemeler	29
2.11.1. Polimerler	30
2.11.2. Küçük Moleküller	31
2.11.3. n-Tipi Yarıiletkenler	31
2.11.4. Tek Kristaller	32
2.11.5. Yalıtkanlar	33
2.12. Neden Esnek Cihazlar?	36
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	37

3.1. Esnek Alt-Tabanın Temizlik Aşamaları	37
3.2. Döndürerek Kaplama İle rr-P3HT Filmi Büyütme	37
3.3. Elektrotların Kaplanma İşlemi	40
3.4. Karakterizasyon	43
4.BULGULAR VE TARTIŞMA	44
4.1.Esnek ITO/rr-P3HT OTFT'nin Çıktı (I-V) Karakteristiği	44
4.2.ITO/rr-P3HT OTFT'nin1.İletim Karakteristiği	45
4.3.Esnek ITO/rr-P3HT OTFT 'nin 2.İletim Karakteristiği	46
4.4. OFET Kanal Genişliği	47
5. SONUÇ ve YORUM	53
5.1. Esnek ITO/rr-P3HT Çıktı (I-V) Karakteristiği	53
5.2. Esnek ITO/rr-P3HT Çıktı (I-V) Karakteristiği	53
5.3. I_{on}/I_{off} Değeri	53
5.4. Eşik Voltajları (V_T)	54
5.5. Mobilite	54
6. ÖNERİLER	55
KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	60

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar

Kısaltmalar

ϵ_s	: Elektriksel Geçirgenlik
μ	: Yük-Taşıyıcı Mobilitesi
ρ	: Yük dağılımı
A	: Amper
AM-LCD	: Aktif-Matriks Sıvı-Kristal Ekran (Active-Matrix Liquid-Crystal Display)
C_i	: Birim Alan Başına Kapasitans
CMOS	: Bütünleyici metal-oksit yarıiletkenler (CMOS)
D	: Katman Kalınlığı
E	: Elektrik Alan
E_g	: Yarıiletken Band Aralığı
I_{DS}	: Kaynak-Oluk Akımı
J	: Akım Yoğunluğu
K	: Boltzman Sabiti
MOSFET	:Metal Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör (Metal Oxide SemiconductorField Effect Transistor)
N_0	:Etkin Durum Yoğunluğu
N	: Toplam Yük Taşıyıcı Yoğunluğu
n_i	: Kendiliğinden Yük Taşıyıcı Yoğunluğu
OLED	: Organik Işık Yayan Diyot (Organic Light Emitted Diode)
OPVC	: Organik Fotovoltaik Hücre (Organic Photovoltaic Cell)
OTFT	: Organik İnce-Film Transistör (Organic Thin-Film Transistor)
P3AT	: poly(3-alkiltiophene)

PCBM	: 6,6-phenly C61-butyrlic acid mently ester
PMMA	: poly (methly methacrylate)
PVT	: poly-p-phenlenevinylene
PF	: polyfluorene
Q	: Elektronun Yüku
rr-P3HT	: regio-regular poly (3-hexylythiophene)
SAM	: Kendiliğinden Oluşan Tek Katman (Self-Esemble Monolayer)
Si	: Silikon
SiO ₂	: Silikon Dioksit
T	: Sıcaklık
TFT	: İnce-Film Transistör (Thin-Film Transistor)
V	: Uygulanan Voltaj
V _{DS}	: Oluk-Kaynak (Drain-Source) Voltajı
V _{GS}	: Kapı-Kaynak (Gate-Source) Voltajı
V _T	: Eşik (Thershold) Voltajı

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: Bir metalin, bir yalıtkanın ve bir katkılı yarıiletkenin enerji diyagramları	3
1.2: Katkılı bir yarıiletkenin iletkenliğinin sıcaklık bağımlılığının Arrhenius eğrisi	4
2.1: En basit konjüge π elektron sistemi olan ethene molekülünün σ ve π bağları ve π -konjüge molekülün enerji seviyeleri	8
2.2: Bazı prototip organik yarıiletkenlerin moleküler yapıları	9
2.3: Bir izole molekül ve bir moleküler kristalin enerji seviyeleri	11
2.4: Bir izole molekülün, bir moleküler kristalin ve bir amorf katının enerji seviyeleri	11
2.5: npn ve pnp yapılarına sahip transistörler	15
2.6: OTFT yapısının şematik gösterimi	17
2.7: OTFT'nin tipik çıktı ve iletim karakteristikleri	18
2.8: Altın-p3ht ara yüzünün enerji şeması	19
2.9: Doğrusal bölgede kanal yapısı ve I_{ds} akımı	20
2.10: Doyum bölgesinde kanal yapısı ve I_{ds} akım	20
2.11: Pentacene'nin kristal yapısı	22
2.12: Bir OTFT'nin iletken kanalına dik yük dağılımı	24
2.13: İki farklı kapasitans değeri için yalıtkan-yarıiletken ara yüzüne düşen potansiyelin kapı voltajına göre değişimi	26
2.14: Birinci tabakanın yoğunluğunun toplam yoğunluğa oranının, toplam yoğunluğu ve kapı voltajının fonksiyonu olarak değişimi	27
2.15: "Edge-on" yönelimine sahip rr-P3HT molekülü	30
2.16: Tetracene (sol) ve rubrene (sağ) kristallerinin moleküler yapıları	30
2.17: OTFT fabrikasyonlarında kullanılan kapı dielektriklerinin sınıflandırılmış şekli ile şematik görünümü	33
2.18: Bazı esnek prototip ve öngörülen cihazlar	36
3.1: rr-P3HT'nin molekül yapısı	37
3.2: PMMA kaplandıktan sonraki OFET'in profil görünümü	38

3.3:	Spin-kaplama sistemi	38
3.4:	“Glove-box” sistemi	39
3.5:	Esnek ITO/rr-P3HT’nin molekül yapısı	39
3.6:	OFET’in son halinin profil görünümü	40
3.7:	Kaplamanın yapıldığı vakum buharlaştırma cihazı	41
3.8:	Üretilen esnek OFET cihaz fotoğrafları	42
4.1:	Esnek ITO/rr-P3HT’nin çıktı (I-V) karakteristiği	44
4.2:	Esnek ITO/rr-P3HT’nin OTFT’nin 1. iletim karakteristiği	45
4.3:	Esnek ITO/rr-P3HT’nin OTFT’nin 2. iletim karakteristiği	46
4.4:	Kaynak-oluk arasının (iletken kanal) elektron mikroskobu görüntüsü	47
4.5:	Yüzey-iletken kanal arası görüntüsü	48
4.6:	OFET drain yüzey görüntüsü	49
4.7:	OFET’in drain yüzeyinin ü boyutlu görüntüsü	50
4.8:	OFET iletken kanal yüzey görüntüsü	50
4.9:	OFET iletken kanal yüzey pürüz analizi	51
4.10:	OFET iletken kanalın 3 boyutlu yüzey görüntüsü	52

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: İlk beş polyacene'nin ana absorpsiyon piklerinin dalga boyları ile birlikte moleköl yapıları	9
2.2: Bazı anorganik dielektrik malzemeler	34

1. GİRİŞ

1.1. Yarıiletken ve Özellikleri

Yarıiletkenler; elektriksel iletkenliği, yalıtkan ile iletkenin elektriksel iletkenlikleri arasında olan ve metal olmayan malzemeler şeklinde tanımlanabilir. Yarıiletkenlik ifadesi ilk olarak 1911 tarihinde ortaya çıkmıştır [1]. Bu tarihte katıların elektriksel iletkenliğinin varlığı iyi bilinmiyordu. O dönemde klasik fizik metallerin iletkenliklerini açıklayabiliyordu, fakat bu açıklamalar metal olmayan katı malzemelerin (germanyum, silisyum ve benzerleri,) farklı şekillerdeki davranışlarını açıklayamıyordu. İletkenliğin sıcaklık ile doğru orantılı olması, fotovoltaiik ve fotoiletkenlik gibi farklı davranış gösteren malzemeler için "yarıiletkenler" tabiri kullanılmaya başlandı. Farklı davranışlar sergileyen bu malzemeler ancak kuantum mekaniğinin ilerlemesi ve katıların band teorisinin geliştirilmesi ile açıklanabilmiştir [2].

Günümüz teknolojisinde elektronik elemanlarda en çok kullanılan yarı iletkenler germanyum ve silisyum elementleridir. Yarı iletken malzemeler; iletkenlerden 10^{-10} defa az iletken, yalıtkanlara göre 10^{14} defa daha fazla iletkenlerdir.

Yarıiletkenler çok düşük sıcaklıklarda bir yalıtkan gibi davranır [3]. Saf durumda yalıtkan malzemelerin özelliğini sergileyen bu maddeler ısı, ışık ve manyetik alan gibi dış etkiler uygulandığında değerlik elektronlarının bir kısmı iletkenlik bandına geçerek serbest elektron olurlar ve iletkenliği artırırlar. Bu dış etki veya etkiler ortadan kaldırıldığında ise yalıtkan duruma geri dönerler. Bu özelliklerinden dolayı elektronik alanında çok yoğun olarak kullanılmaktadır.

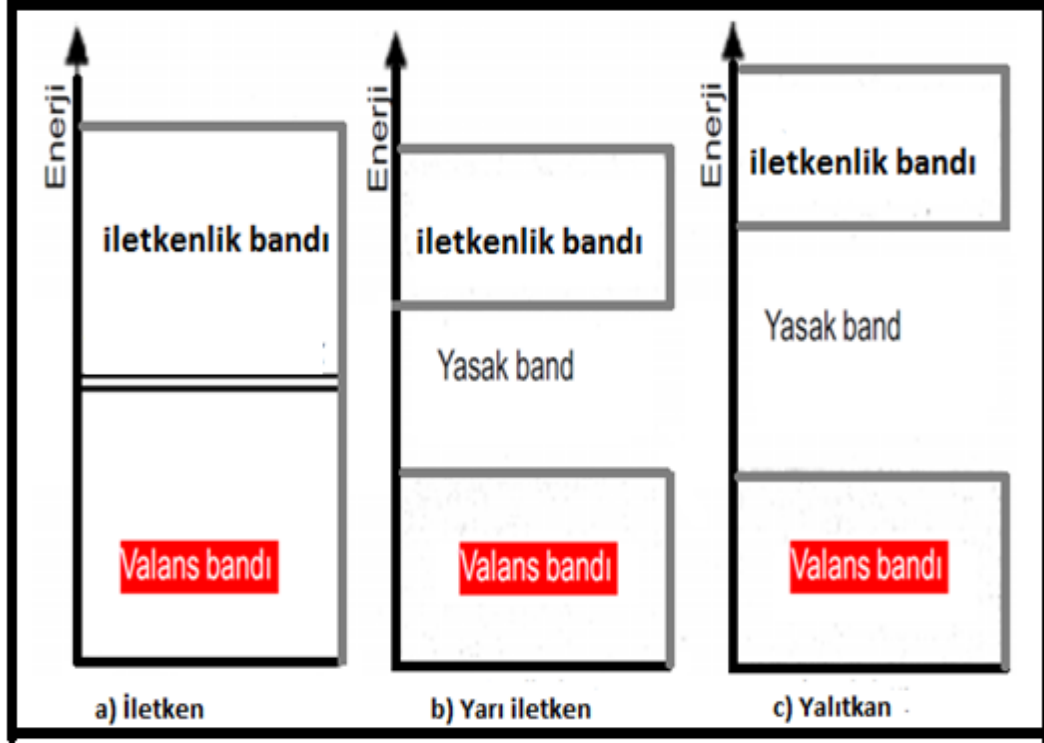
Saf silisyum ve germanyum yarıiletken elementlerinin valans bandında dört tane elektron bulunur. Bütün elementlerde olduğu gibi yarıiletkenler de son yörüngedeki elektron sayısını sekize çıkarma eğilimindedirler. Bundan dolayı saf bir silisyum veya germanyum elementi komşu atomların son yörüngelerinde bulunan elektronları ortaklaşa kullanarak kovalent bağ yaparlar. Atomlar arasındaki bu kovalent bağ silisyum ve germanyum elementlerine kristal özelliğini kazandırır. Elektronik devre elemanlarında daha çok silisyum kullanılır. Silisyum ve germanyum devre elemanı üretiminde saf halde kullanılmazlar. Bu maddeler katkılanarak değerlik bandı enerji seviyesi yükseltilir veya iletkenlik bandı enerji

seviyesi alçaltılır. Değerlik bandının yükseltildiği yarı iletkenlere P tipi yarı iletken, iletkenlik bandının alçaltıldığı yarı iletkenlere ise N tipi yarı iletken denir. P tipi yarı iletkende boşluk konsantrasyonu, N tipi yarı iletkende ise elektron konsantrasyonu daha fazladır.

Günümüz teknolojisinde güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirmede yarı iletkenlerden çok fazla faydalanılmaktadır. Çünkü güneşten gelen fotonlar (yukarıda da bahsettiğimiz gibi ısı ve ışık gibi bir dış etken), yarı iletken malzemelerin atomik yapısında bulunan zayıf moleküler bağları kırarak elektronların serbest kalmalarını sağlarlar ve böylece bu serbest elektronlar yarı iletken malzemede elektron akışını sağlamış olurlar. Günümüzde kullanılan bazı saatler ve hesap makineleri, bu yapı ile çalışmaktadır.

Yarı iletkenler germanyum (Ge), silisyum (Si), selenyum (Se) gibi elementler olabildiği gibi; bakır oksit (CuO), galyum arsenid (GaAs), indiyum fosfür (InP), kurşun sülfür (PbS) gibi bileşikler de olabilir. Bu yarı iletkenler saf veya kendine özgü (intrinsic) yarıiletkenlerdir. Bu malzemeler diyot, transistör gibi elektronik cihazlarda kullanılması için iletkenliklerinin kontrollü bir şekilde artırılması gerekir. Bunun için dışarıdan antimon (Sb), arsenik (As) gibi beş valans elektronlu safsızlık atomlarıyla (n-tipi) veya bor (B), indiyum (In) gibi üç valans elektronlu safsızlık atomlarıyla (p-tipi) katkılanır. Bunlara da ekstrinsik yarıiletken malzemeler denir.

Yarıiletken, metal ve yalıtkanların enerji diyagramları Şekil1.1.'de gösterilmiştir.



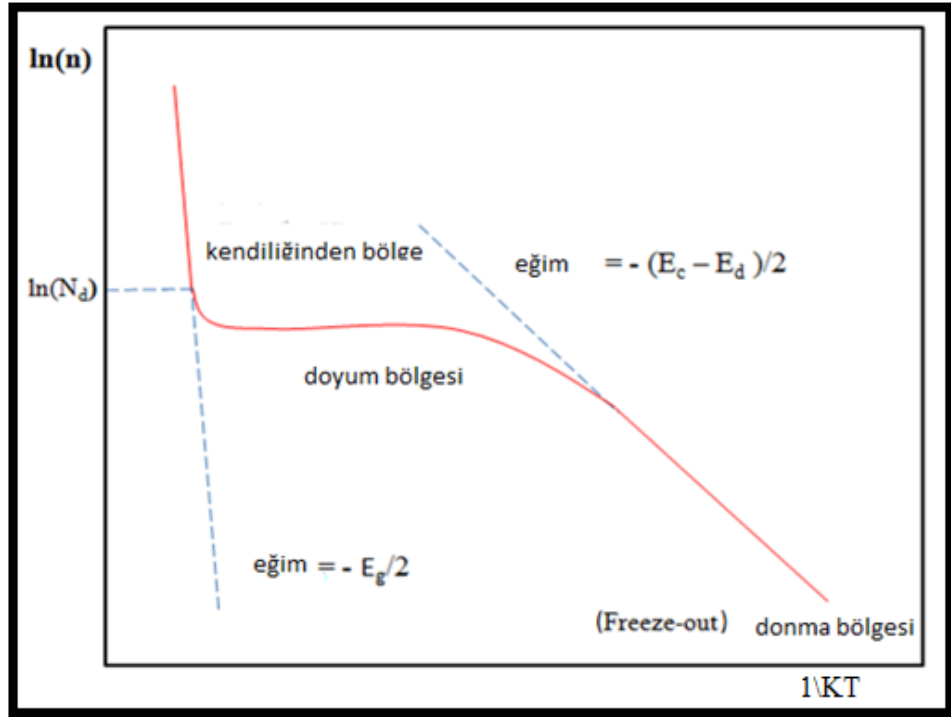
Şekil 1.1: Bir metalin, bir yalıtkanın ve bir yarıiletkenin enerji diyagramları.

Yarı iletkenlerdeki bu teori, iletkenlik bandı kısmen dolu olan metal ile valans bandı dolu, iletkenlik bandı tamamen boş olan yalıtkan arasındaki farkı gayet iyi açıklar. Bir yalıtkan sadece $T=0$ °K'de tamamen yalıtkandır. Sıcaklık artırılmaya başlandığında, elektronlar valans bandından iletkenlik bandına doğru uyarılırlar. Elektriksel iletkenliğin, kısmen dolu bandlarda 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, diğer yarı iletkenler katkılanırsa, bunlarda da aynı etkinin görülmesi mümkündür.

Yarı iletkenler iki şekilde katkılanabilirler; birincisi, yarıiletkenin valans bandının (p-tip katkılama), ikincisi iletkenlik bandının (n-tip katkılama) kenarlarına yakın enerji seviyeleri oluşturmaktır. Böylece, bir elektronu (boşluğu) iletkenlik (valans) bandına indüklemek için gerekli enerji termal enerji ile kıyaslanabilir seviyeye düşürülür. Katkılanmış (dış kaynaklı) bir yarıiletkenin iletkenliğinin sıcaklığa bağlılığı Şekil 1.2.'de gösterilmiştir. Bu 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

sıcaklıktan bağımsızdır. Üçüncü bölge ise, düşük sıcaklıklarda yük-taşıyıcılarının hareket etmediği bölgedir. Elektronik cihazlar için önemli olan bölge yük-taşıyıcı yoğunluğunun katkılamaya eşit olduğu ara bölge olan doyum bölgesidir.

Yarıiletken malzemeler için en önemli özellik katkılamanın yüksek saflıkta olması gerektiğidir. Mikro-elektronikte kullanılan silikon ve diğer birkaç bileşik haricinde, birçok yarıiletken eşit miktarda n- ve p- tip katkı safsızlıkları içerir; bu özellikteki yarı iletkenler kendiliğinden yarıiletken gibi davranırlar. Yaklaşık olarak bütün organik yarıiletkenler bu kategoridedir. Hususen, organik yarıiletkenlerdeki katkılama etkileri, nadirde olsa yüksek yoğunluklu katkılama görülebilir. Bu seviyelerde katkılanmış organik yarıiletkenler iletkenlik bakımından iletkenlere çok yakındır ve bu özelliklerinden dolayı elektronik cihaz yapımı için pek uygun değildir.



Şekil 1.2: Katkılı bir yarıiletkenin iletkenliğinin sıcaklık bağımlılığının Arrhenius eğrisi.

Netice olarak, organik yarıiletkenler iletkenlik bakımından yalıtkanlara çok yakındırlar. Organik yarıiletkenlere, mikro-elektronik derecesinde katkılama yapılabilme imkânı, safsızlıkları çok düşük olduğundan dolayı henüz yoktur.

1.2. Yarıiletken İnce Filmler

Yarıiletken ince film bilimi son yıllarda, bilimsel çalışmalarda çok önemli yer edinmiştir. İnce filmler, farklı üretim teknikleri kullanılarak kaplanacak malzemenin atomlarının ya da moleküllerinin, bir taban üzerine ince bir tabaka halinde oluşturulan ve kalınlıkları tipik olarak 1 µm civarında olan yarıiletken malzemelerdir [6].

Endüstri için yeni malzemelerin sentezine ihtiyaç duyulmasından dolayı, son zamanlarda ince film teknolojisi büyük ve önemli bir ölçüde artış göstermiştir. Günümüzde nano teknolojinin, optiğin ve mikro elektroniğin çok gelişmesiyle birlikte ince film teknolojisi de çok artış göstermiştir. Film kalınlığı 1 ile 10 µm arasında bulunan filmler için yapı ve işlem teknolojisi birçok sayıdaki üretim alanı için önemli bir unsur teşkil etmektedir. Bu üretim alanları, güneş pilleri, optik elektronik devreler, bilgisayarda hafıza bölümleri, ısıya dayanıklı malzeme kaplama işlemleri ve korumalı giysiler, malzemelerin ömür süresinin artırılması, atmosfer basıncına ve ısıya karşı malzemelerin korunması gibi alanlardır [7].

İnce film malzemelerin son yıllarda hızlı değişim göstermesinden dolayı; yeni işlemlerin, malzemelerin ve teknolojilerin gelişimi için yeni fırsatlar doğmaktadır. Bundan dolayı, çeşitli uygulamalardaki ince filmlerin performansı ve mikro yapısı ile ilgili temel fiziksel ve kimyasal özelliklerini ve önceden bilinen özelliklerini geliştirmek ve bu alanda gelişme elde etmek için birçok çalışma yapılmış ve yeni model sistemleri geliştirilmiştir. Bu yeni model sistemler, çekirdeklenme ve gelişim işlemleri, katı hal reaksiyonları, ince film sistemleri ve faz sınırlarının ısısal ve mekanik durağanlıkları gibi alanların araştırılmasını kapsar. Bu deneysel çalışmalardan ve teorik hesaplamaların sonucunda, yeni ince film sistemlerinin geliştirilmesi, mikro yapı ve performanslarının şekillendirilmesinde önemli bir husustur [8].

Gelişen ve değişen teknolojiyle nano teknolojinin de gelişmesiyle birlikte nanometre boyutlarında ince film şeklinde yarıiletken yapıda malzeme üretimi yapılmasıyla ince film teknolojisinde çok büyük gelişmeler kaydedildi. Süper kapasitörler, güneş pilleri, fotovoltaiik araçlar ve elektro kromik pencerelerde kullanılan materyalin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin kontrolünün sağlanabilirliği, gibi çalışma alanları yarıiletken ince film ve nano teknolojisine olan ilgiyi son

zamanlarda artırdı. İnce film formatındaki nano kristal yarıiletken malzemeler, bu malzemelerle yapılan araçların karakteristik özelliklerinin artırılmasında kolaylık sağlamış oluyor. Bu tür malzemelerde, malzemeyi oluşturan parçacık sayısının artmasından dolayı katı yapıdan moleküler yapıya doğru aşamalı bir geçişin olduğu görülür. Bir yarıiletkenin nano kristal büyüklüğü, yarıiletkenin bant yapısını etkilediği için, yarıiletkeni oluşturan parçacıkların yeterince küçük olması yük taşıyıcılarının bant yapılarının kesikli enerji seviyelerine ayrışmasına sebep olur [9].

Yarıiletken malzemelerin nano boyutlarda olmasının önemli bir özelliği, yarıiletkenin sahip olduğu değerlik bandının (Eg) değerinde artış gözlemlenirken, yarıiletkenin nano kristal yapısının çapında azalma gözlemlenir[10].

Yarıiletken ince filmler üç ana gruba ayrılırlar. Bunlar; Tek katlı (homoepitaksiyel) olarak adlandırılan aynı materyalin tek kristal tabanı üzerine çöktürülen tek kristal filmler, Çok katlı(heteroepitaksiyel) olarak adlandırılan farklı materyalin tek kristali üzerine büyütülen tek kristal filmler, Cam, kuartz gibi amorf tabanların üzerine çöktürülen polikristal filmlerdir. Polikristal filmler büyük yüzeyli metal, cam, seramik, grafit gibi tabanlar üzerinde büyütülebilen, elektrik ve optik özelliklerinden dolayı güneş pili, yarıiletken foto detektörler, diyotlar gibi birçok uygulama alanı olan, basit ve değişik yöntemlerle elde edilebilen yarıiletken malzemelerdir [11].

2.ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLER

2.1. Organik Yarıiletkenler

20. yüzyılın ortalarında transistörün icadıyla birlikte Silisyum, Germanyum gibi inorganik yarıiletkenler elektronik teknolojisinde çok yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. 20. yüzyılın sonlarında ise bu yeni teknolojinin kullanılmasıyla önemli ölçüde ilerleme kaydederek mikro-elektronik teknolojisi bugün ki haline almıştır. 21. yüzyılın başlarında ise elektronik teknolojisinde çok büyük değişiklik yapabilecek özelliğe sahip olan organik yarıiletken malzemeler keşfedilmiştir. Bu malzemelerden organik güneş hücreleri, organik ışık yayan diyotlar (OLED) düşük maliyetli entegre devreler, geniş alanlı ve esnek ışık kaynakları ve esnek ekranlar, organik diyotlar ve organik alan etkili transistörler (OFET) gibi elektronik cihazların üretilebileceği düşüncesi bu alandaki çalışmaların başlamasını ve bu alanda çok büyük gelişmeler olmasını sağlamıştır.

Organik yarıiletkenler bahsi tamamen yeni değildir. Anthracene kristalinin (bir organik yarıiletken prototipi, fotoiletkenliği üzerindeki çalışmalar) 20. yüzyılın başlarına kadar uzanır. Daha sonraları,1960'larda, elektro lüminesansın keşfi ile moleküler kristaller bilim adamları tarafından daha derin şekilde araştırılmıştır. Bu araştırmalar yük taşıyıcı iletimi ve optiksel uyarımlar içeren temel süreçleri kapsamaktadır.

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

1980'lerde p- ve n-tipi organik yarıiletkenlerin birleştirilmesi ile oluşan hetero-eklem güneş pillerinin ve konjuge polimerler ve oligomerlerden oluşan ince-film transistörlerin üretilmesi ile katkılanmamış organik yarıiletkenlere ilgi tekrar canlanmıştır. Ancak asıl teşvik edici olay, vakum-evoparasyon tekniği ile kaplanan moleküler-filmlerden ve konjuge polimerlerden yüksek performanslı ışık veren diyotların üretilmesidir. Son 15 sene boyunca akademik ve endüstriyel araştırmaların

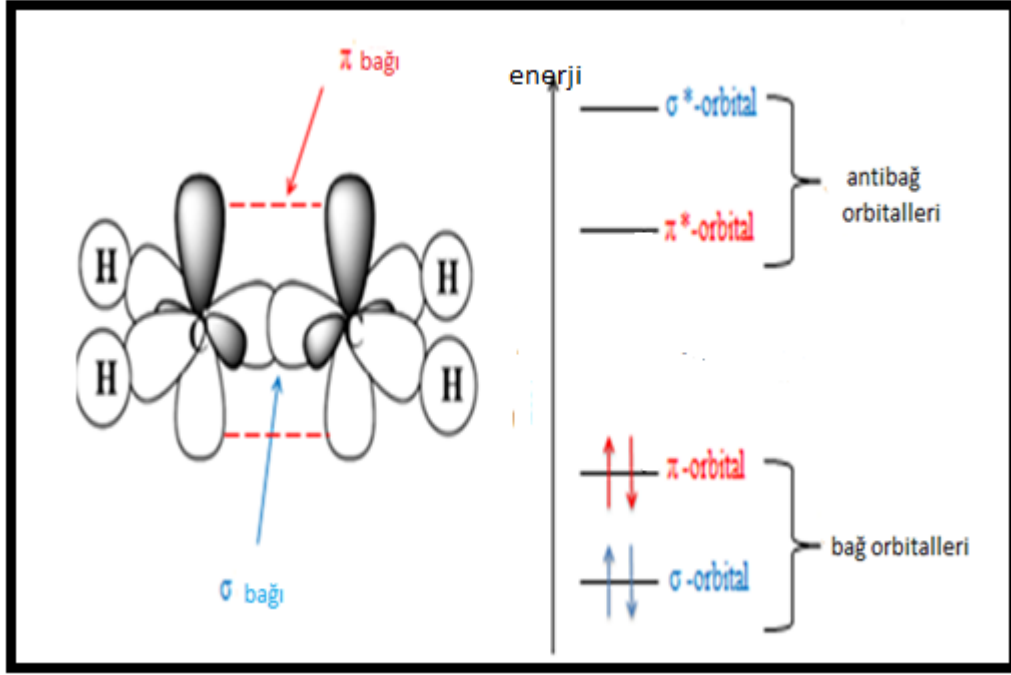
neticesinde organik ışık veren diyotlar(OLED) üzerindeki çalışmalar hızlı bir şekilde ilerlemiş ve ilk ticari amaçlı OLED ekran üretilmiştir [12]. Organik yarıiletkenlerin diğer uygulamaları organik alan-etkili transistörler (OFET) ve organik fotovoltaiik hücrelerdir (OPVC).

2.2. Organik Yarıiletken Malzemeler

Organik yarı iletkenlerin tarihçesinde de denildiği gibi; organik yarıiletkenler iki ana sınıfa ayrılırlar: Polimerler ve molekül ağırlığı küçük olan malzemeler. Her ikisinde de molekül sistemlerindeki sp^2 hibritleşmesi yapmış Karbon atomlarının P_z orbitalleri tarafından oluşturulmuş konjüge π -elektron sistemleri vardır (Şekil1.3.).


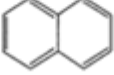
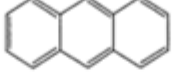


Moleküllerin yapısında bulunan π -bağları σ -bağlarına göre daha zayıftır ve bu yüzden, konjüge moleküllerin en düşük elektronik uyarımları görünür ve spektral bölgede ışık absorpsiyonu ve yayılımı yapmayı mümkün kılan bir enerji aralığına sahip (1.5 - 3 eV) π - π^* geçişleridir. Tablo 1.'de görüldüğü gibi polyacene grubunun enerji aralığı molekül içindeki konjügasyon derecesiyle kontrolü sağlanabilir. Böylece organik yarıiletken malzemelerin opto elektronik özelliklerinin değiştirilebilmesi için geniş imkânlar elde edilmiş olur. Aşağıda şekil 1.4.'de bazı prototip malzemeler gösterilmiştir.

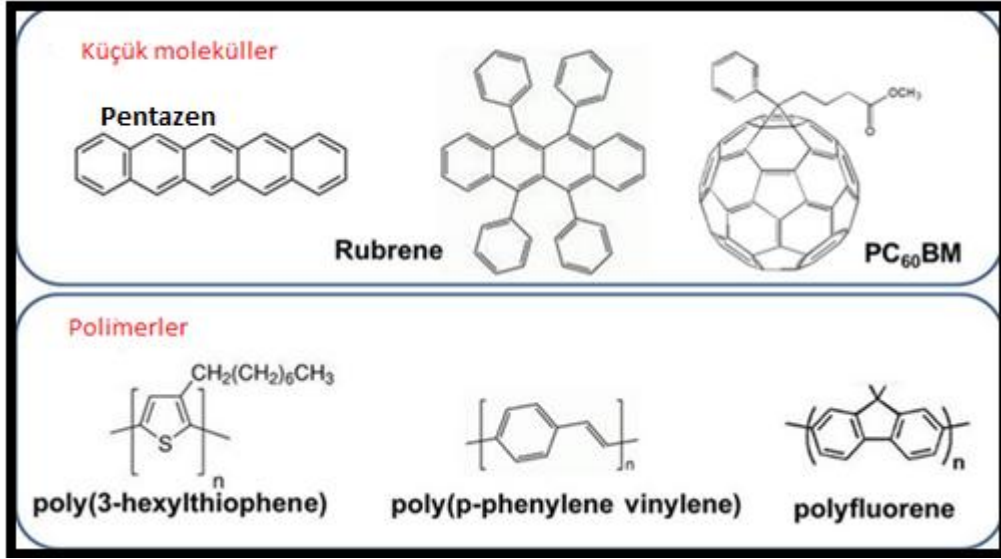
Organik yarıiletkenleri ince film şeklinde kullanabilmek için iki ayrı sınıfa ayırdığımız konjüge polimerler ve küçük ağırlıklı moleküllere uygulanacak yöntemler farklıdır. Konjüge polimerler spin-coating(döndürerek kaplama) veya print (baskı) teknikleri gibi teknikler ile kaplanabilirler. Küçük moleküller ise buharlaştırma veya sublimasyon tekniği ile kaplanır. Çok hassasiyetle yapılan bu büyütme teknikleri ile çok düzenli ince filmler üretebilme adına birçok araştırma halen devam etmektedir.



Şekil 2.1: En basit konjüge π -elektron sistemi olan ethene molekülünün σ ve π bağları (sol) ve π -konjüge molekülün enerji seviyeleri (sağ).

Tablo 2.1: İlk beş polyacene'nin ana absorpsiyon piklerinin dalga boyları ile birlikte molekül yapıları.

Molekül	Yapı	Max.emme
Benzene		255 nm
Naphthalene		315 nm
Anthracene		380 nm
Tetracene		480 nm
Pentacene		580nm



Şekil 2.2: Bazı prototip organik yarıiletkenlerin moleküler yapıları.

2.3. Organik Yarıiletkenlerin Temel Özellikleri

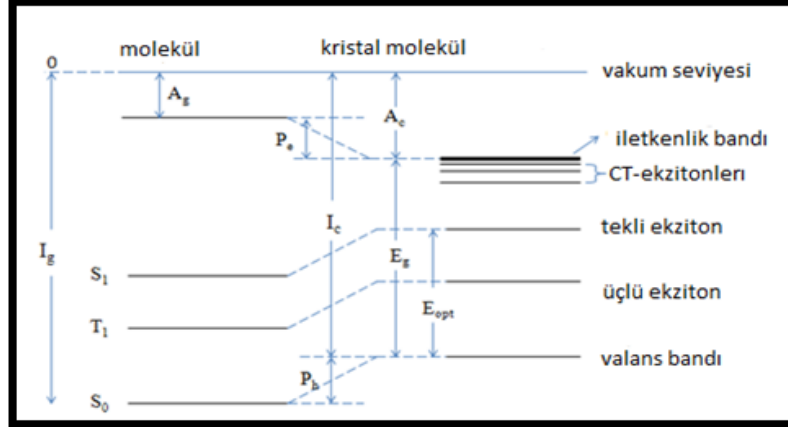
İnorganik yarıiletkenlerin bağ yapısı ile organik yarıiletkenlerdeki bağlar arasında büyük farklar vardır. Organik moleküler kristaller wan der Walls bağları ile bağlanmış olan katılar olarak adlandırılmaktadır ve silisyum, germanyum gibi kovalent bağlı yarıiletkenler ile kıyaslandığında moleküller arası bağlar daha zayıftır. Wan der Walls bağları organik moleküler kristallerde, malzemenin mekanik ve termodinamik özelliklerini belirler. Bu gibi özelliklerinden dolayı inorganik yarıiletkenlere göre düşük erime noktası, düşük dayanıklılık, en önemlisi de optik özellikler ve yük taşıyıcı iletimi ile doğrudan alakalı bir özellik olan komşu moleküller arasındaki elektronik dalga fonksiyonlarının düşük etkileşimleridir. Polimerlerde bu durum biraz farklıdır, çünkü polimer zincirlerinin morfolojisi mekanik özellikleri arttırabilir. Buna rağmen, bu tür malzemelerde komşu zincirler arasındaki elektronik etkileşim zayıftır.

2.4. Yük Taşıyıcı İletimi

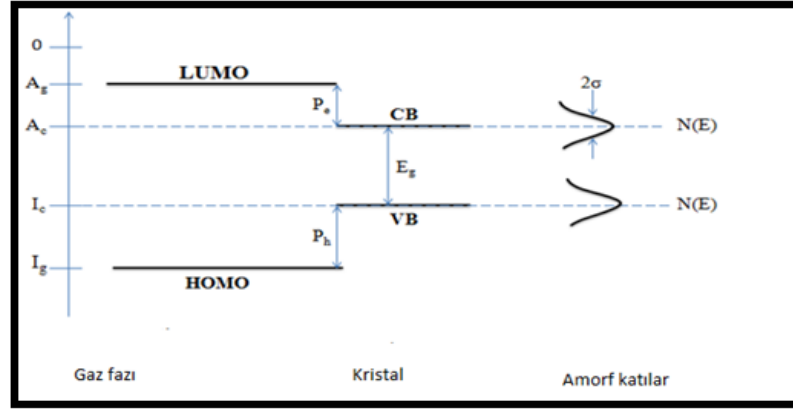
Organik moleküler katılarda elektron ve boşluk (hole) iletimi iyonik moleküler durumlar göz önüne alınarak incelenir. Mesela, bir boşluk oluşturmak için nötral bir A molekülünden bir elektron alınır. Bu durumda bir radikal A^+ katyonu oluşur. Böylece, oluşan bu boşluk (hole) bir molekülden diğer moleküle hareket edebilir. Aynı şekilde, elektron iletimi negatif yüklenmiş radikal A^- oluşturmak ile mümkündür (özellik olarak durumlar polimerler için de geçerlidir, polimerlerde yüklü durumlara pozitif veya negatif polaron denir). Gaz fazındaki izole moleküllerle kıyaslandığında, katıda iyonik durumlar karardır. Bu durumun sebebi Şekil 1.5.'deki enerji diyagramlarında gösterilen polarizasyon enerjileridir. Şekilden kolayca anlaşılacağı gibi, eksiton bağlanma enerjisinden dolayı birinci uyarılmış tekil durum ile taban durumu arasındaki optiksel band aralığı tek parçacığın bir korelasyonsuz elektron-hol çifti oluşturması için gerekli band aralığından önemsenecek derecede düşüktür. Burada önemli bir unsur ise moleküler kristallerden organik moleküler katılara geçerken lokal olarak oluşan değişen polarizasyon enerjileridir.

Organik yarıiletkenlerin düzgünlük durumuna bakarak organik yarıiletkenlerdeki yük taşıyıcı iletimi mekanizmasına iki şekilde bakılabilir: Band iletimi ve sıçrama iletimi. Band iletimi genel olarak çok yüksek olmayan sıcaklıklarda, yüksek saflığa sahip moleküler kristallerde görülür. Fakat elektronik etkileşiminin düşük olmasından dolayı band genişliği inorganik yarıiletkenlere göre daha küçüktür. Bundan dolayı oda sıcaklığında moleküler kristallerdeki yük taşıyıcı mobiliteleri yalnızca 1 ile 10 cm^2/Vs değerleri arasındadır [15]. Band iletiminin bir karakteristik özelliği olan sıcaklık bağımlılığı düşük sıcaklıklara düşerken bir kuvvet yasası ile ölçülür. Ama bazı pürüzlerin yol açtığı hasardan dolayı bazı sapmalar tespit edilmiştir [16].

$$\mu \propto T^{-n}; n=1,2,3 \quad (2.1)$$



Şekil 2.3: Bir izole molekül (sol) ve bir moleküler kristalin (sağ) enerji seviyeleri.



Şekil 2.4: Bir izole molekülün (sol), bir moleküler kristalin (orta) ve bir amorf katının (sağ) enerji seviyeleri.

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

$$\mu(ET) \propto \exp(-\Delta E/kT) \cdot \exp\sqrt{E}/kT \quad (2.2)$$

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

$$j = env = en\mu E \quad (2.3)$$

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

Burada en önemli parametre olan mobilite, organik yarıiletkenlerde düzen derecesine ve saflığa doğrudan bağlıdır ve bundan dolayı hazırlık aşamaları ve ince film büyütme şartlarına göre değişir. Mobilite değerleri moleküler kristallerde $1-10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 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].

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

$$n_i = N_o \cdot \exp(-E_g/2kT) \quad (2.4)$$

Bu denklemde, N_o etkin durum yoğunluğudur. Tipik bir organik yarıiletken için $E_g=2,5 \text{ eV}$ ve $N_o=10^{21} \text{ cm}^{-3}$ alındığında, oda sıcaklığında $n_i=1 \text{ cm}^{-3}$ teorik değerini elde edilir. Gerçek malzemelerde safsızlıklardan kaynaklanan yüksek yoğunluklardan dolayı bu değere ulaşmak mümkün değildir. Yine de, Si için bu değer $n=10^{10} \text{ cm}^{-3}$ değerine ulaşılır ($N_o=10^{19}$, $E_g=1,12 \text{ eV}$).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, kimyasal katkılama, alan etkili katkılama, yük taşıyıcıların foto jenerasyonu, kontaklardan yük taşıyıcı enjeksiyonu.

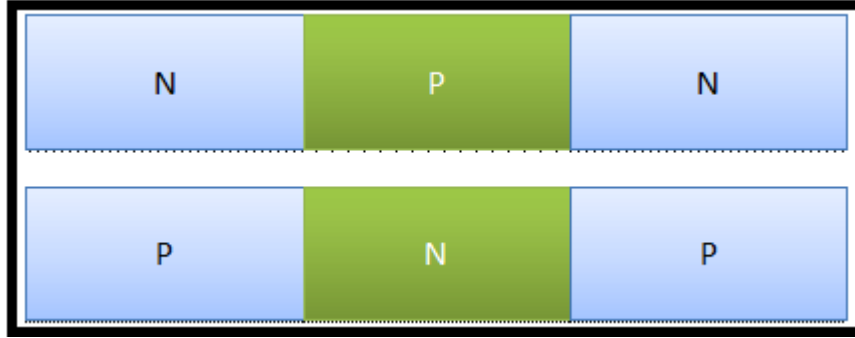
2.5. Transistörler

Elektronik tarihi, Karl Braun'un katot ışın tüpünü (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 vakum-tüpü katot ile anot arasında bulunan bir süzgeçten, ızgaradan ibarettir. Triot, doğrultucuyu bir yükselticiye dönüştürür, böylece radyo ve uzun mesafeler arası telefon iletişimini mümkün kılar. Vakum triotun bazı dezavantajları vardı. Bunlar kırılma, bazen yavaş çalışma, minyatürize edilememesi, yüksek güç tüketimi ve yüksek ısı yayma gibi sorunlardı. 1920'lilerin ortalarında, triotun yerini katı hal 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].

Fakat Lilienfeld'in bu şekilde çalışan bir cihazı üretmediği ortaya çıktı. 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 silikon-silikon dioksit, metal-metal, oksit-yarıiletken alan-etkili transistör (MOSFET) üretilmiştir [22]. Bugün, MOSFET'ler en çok kullanılan transistör çeşitleridir; kişisel bilgisayarlarda kullanılan işlemcilerin içinde, cep telefonlarında ve birçok farklı elektronik cihazlarda kullanılırlar. Elektronik alanda en fazla kullanılan entegre devre elemanlarından biri olan transistörlerin en temel tipleri: Alan etkili transistör (FET), nokta temaslı transistör, tek eklemli transistör, yüzey eklemli transistör, foto transistör, dört uçlu transistör adı verilir.

Bununla beraber transistör tiplerinden olan FET'leri polarlıkları ve çeşitliliklerine göre sınıflandırabiliriz. Polarlıklarına göre sınıflandırma, n tipi ve p tipi yarıiletken kullanılımasına göre iki şekildedir. Transistörler yarıiletkenlerin npn veya pnp şeklinde devreye işlenmesi ile oluşturulur (Şekil 2.1). n tip yarıiletkenlerde baskın yük taşıyıcıları elektronlar, p-tip yarıiletkenlerde ise baskın 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 bölgelerin davranışlarından dolayı transistörün karakteristikleri oluşturulur.



Şekil 2.5: npn ve pnp yapılarına sahip transistörler.

Transistörleri sınıflandırdığımızda, organik alan etkili transistör (OFET), eklem alan etkili transistör (JFET) ve MOSFET olarak gruplandırılabilirler. OFET’lerde kullanılan yarıiletkenin organik yarıiletken olması bakımından diğer ikisinden ayrılmaktadır. Günümüzde elektronik dünyasının en temel aygıtı transistörlerdir. Çoğunlukla sinyal yükseltme ve değiştirme özelliklerinden dolayı birçok elektronik cihazın vazgeçilmezi 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 hem de entegre devrelerde milyarlarca transistör 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 nedenlerle 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 akümülyasyon 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.

2.6. OFET

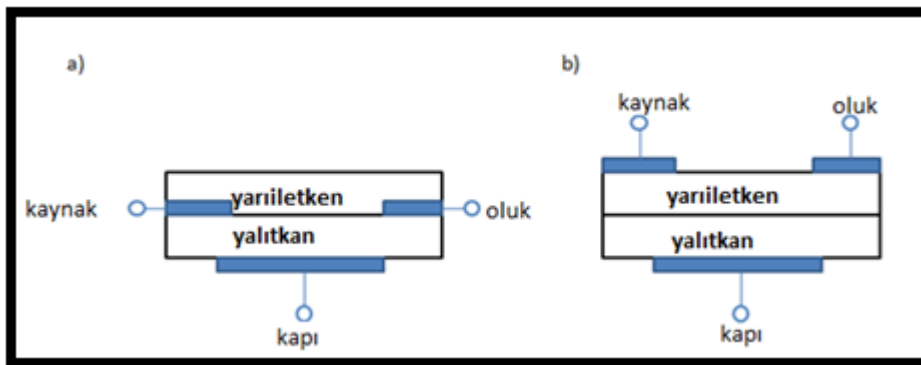
Organik yarıiletkenler üzerinde çalışmalar 1940'ların sonlarında başlamıştır. Ancak, organik ince-film transistörler (OTFT) üzerindeki çalışmalar 1980'lerin sonlarında başlamıştır. Bu çalışmalar, polimerler ve küçük moleküller ile OTFT'lerin üretilmesi üzerinedir. İlk üretilen cihazların düşük performanslarından 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 mobilitelerinin amorf silikonun mobilitesine yetiştiği dönemlerde endüstriyel gruplar OTFT'ler üzerine çalışmaya karar vermişlerdir.

Organik yarıiletken transistörlerin üretilmesi, 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.

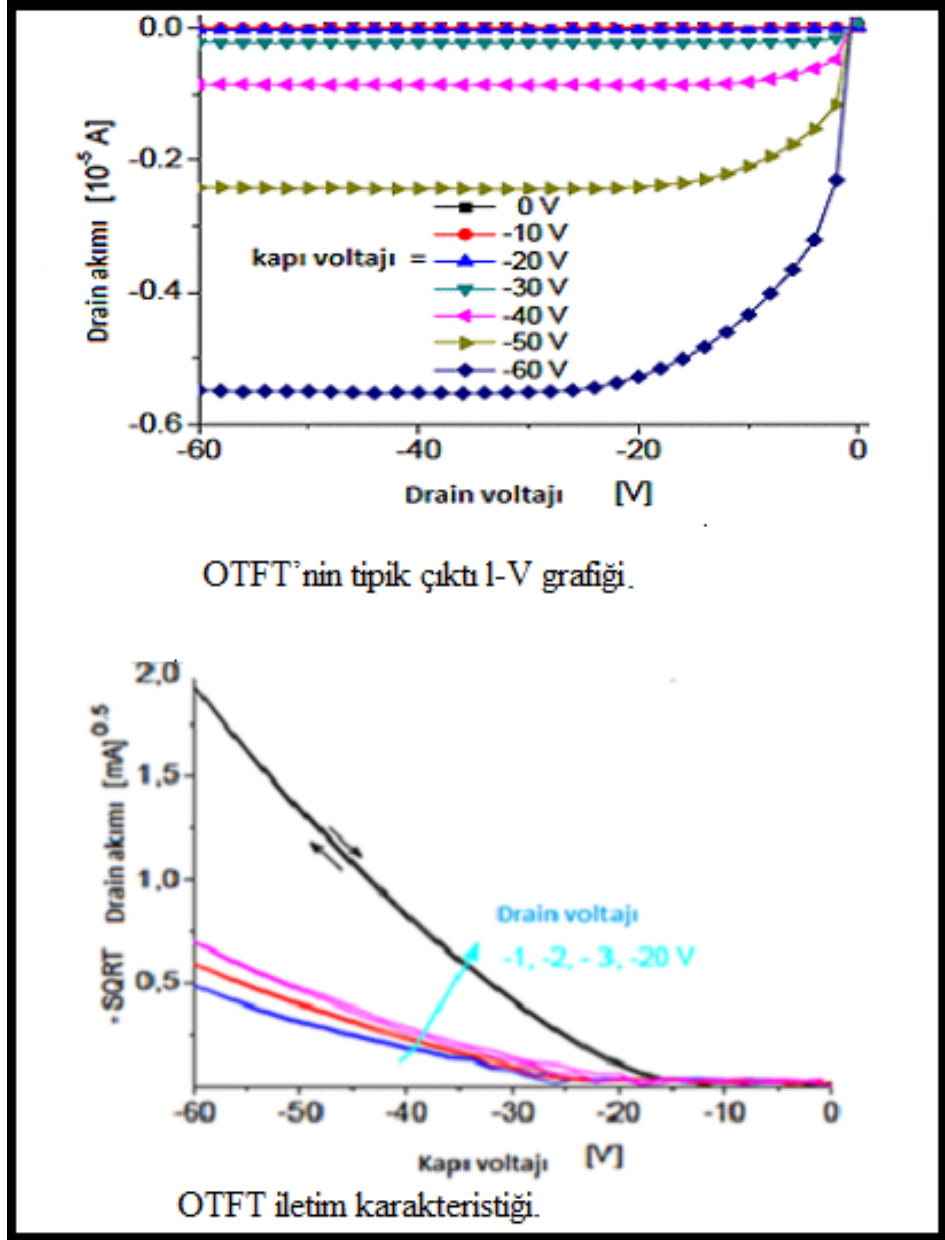
2.7. Organik İnce-Film Transistör Yapısı

OFET'ler ince-film yapısına 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 alt-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-IITO grafik 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 2.6: OTFT yapısının şematik gösterimi. İki cihaz da üst-kapı yapısına sahiptir. a) Alt-kontak; b) Üst-kontak.

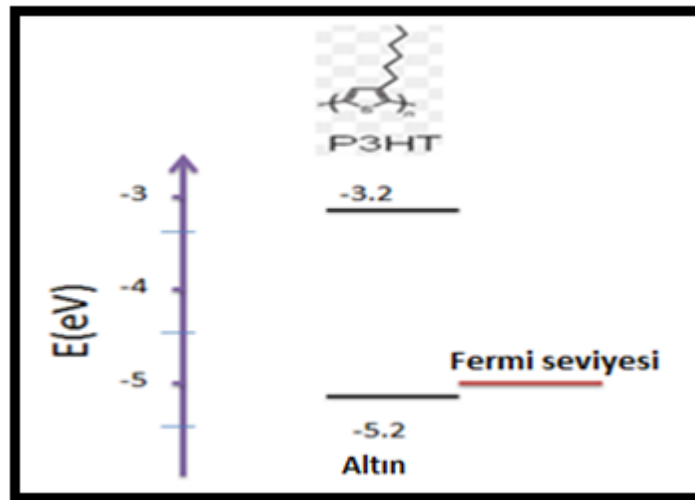


Şekil 2.7: OTFT'nin tipik çıktı (üst) ve iletim (alt) karakteristikleri.

2.8. OFET'lerin Çalışma Prensibi ve Parametreleri

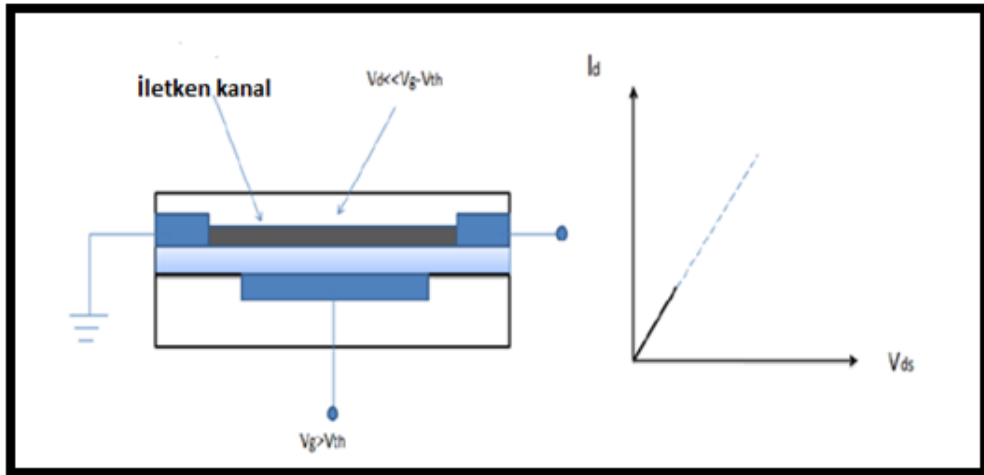
OTFT'lerin çalışma prensibini açıklamak için Şekil2.3.'de tipik akım-voltaj karakteristikleri gösterilmiştir. Bu eğriler pentacene ile yapılan bir cihazın ölçüm sonuçlarından elde edilmiştir. Cihaz yapımında kullanılan elektrotlar altındır. Şekil2.4.'deki enerji şeması altının Fermi seviyesi ve p3ht'nin sınır orbitallerini (en yüksek dolu moleküler orbital, HOMO ve en düşük boş moleküler orbital, LUMO)göstermektedir. Datalar kaynak [27]'den alınmıştır. Kaynak elektrotunun bir referans (topraklanmış) elektrot olarak nasıl çalıştığından bahsedilmektedir.

Kapı elektrotuna pozitif voltaj uygulandığında kaynakta negatif yükler indüklenir. Şekil 2.4.'de görülebildiği gibi, pentacene'nin LUMO seviyesi altının Fermi seviyesinden oldukça uzaktır. Bundan dolayı elektronlar için azımsanamayacak bir enerji bariyeri vardır ve elektron geçişi beklenilmez. Bu nedenle p3ht 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 ara yüzünde bir iletken kanal oluşur ve yük-taşıyıcıları iletme geçer. Çünkü holler elektronlara göre daha kolay enjekte olurlar. Bundan dolayı pentacene'nin p-tip bir organik yarıiletken olduğu söylenebilir. Simetrik olarak, LUMO seviyesi Fermi seviyesine yakın olan organik yarıiletkenin n-tip bir yarıiletken olduğu söylenebilir.

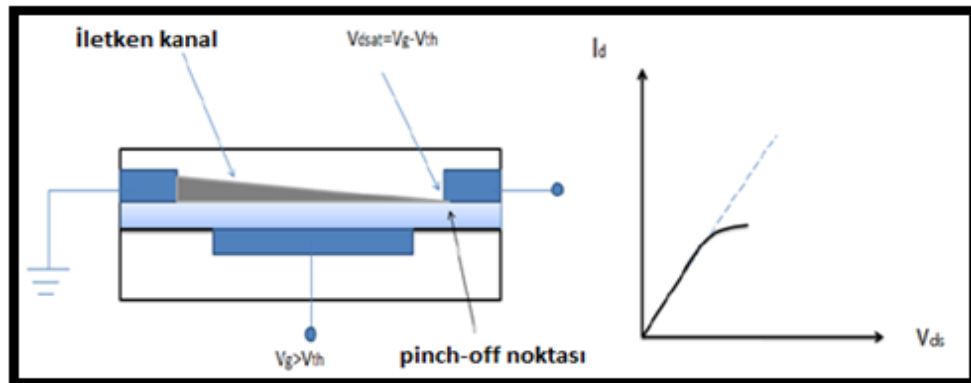


Şekil 2.8: Altın-p3ht ara yüzünün enerji şeması.

Kısacası, bir ince-film transistör bir kapasitör gibi çalışır; kapıya bir voltaj uygulandığında yalıtkanın sınırlarında eşit miktarda (ancak zıt işaretli) yükler indüklenir. Yük-taşıyıcıları yarıiletken malzemenin içine indüklenebiliyorsa yalıtkan-yarıiletken ara yüzünde bir iletken kanal oluşur; çünkü kanalın iletkenliği yük ve uygulanan kapı voltajı ile doğru orantılıdır. Düşük oluk voltajlarında, akım Ohm yasasına göre davranır. Bu koşulda akım, oluk voltajı ve kapı voltajı ile orantılıdır. Oluk voltajı daha da arttırılırsa oluk akımı artışı, voltaj artışı ile orantılı olarak artmaz. Oluk voltajı kapı voltajı değerine ulaştığı zaman akım artışı durur; kanal, oluk voltajından bağımsız hale gelir. Bu olaya "pinch-off"; bu olayın olduğu bölgeye doyum bölgesi adı verilir. Şekil2.3.(a)'da lineer bölgeden doyum bölgesine aşamalı geçiş açık şekilde gösterilmiştir. Şekil2.3.(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 2.9: Doğrusal bölgede kanal yapısı ve I_{ds} akımı.



Şekil 2.10: Doyum bölgesinde kanal yapısı ve I_{ds} akımı.

Lineer ve doyum akımları Eşitlik (1) ve (2) kullanılarak tanımlanır. Bu denklemler iki varsayım yapılarak türetilmiştir:

Birincisi, 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

İkincisi, mobilite, μ , sabittir.

$$I_{DSlin} = \frac{W}{L} \mu C_i (V_{GS} - V_T) V_{DS} \quad (2.5)$$

$$I_{DSdoy} = \frac{W}{2L} \mu C_i (V_{GS} - V_T)^2 \quad (2.6)$$

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:

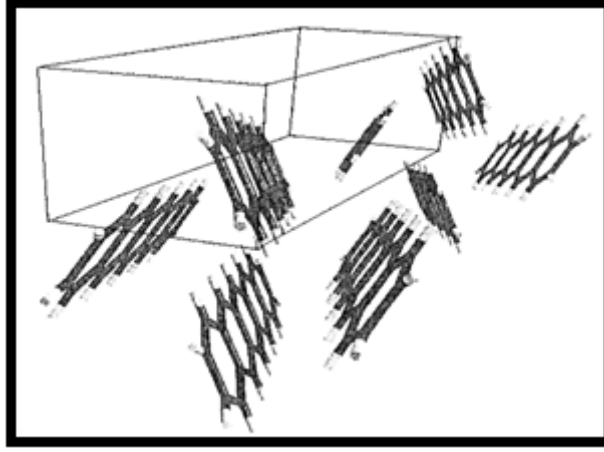
$$\mu = I_{DS} \frac{2L}{W(V_{GS} - V_T)^2} C_i \quad (2.7)$$

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_{onn}/I_{off}). Teoride, transistör kapalı durumdayken akım geçmez, ancak pratikte belirli bir akım vardır. Bu akım I_{off} değeridir. I_{onn}/I_{off} parametresi cihazın sinyali ne boyutlarda yükselttiğini belirler ve bu değer ne kadar yüksekse cihaz performansı da o kadar iyidir. I_{onn}/I_{off} değeri Şekil2.5.'den akımın en yüksek ve en düşük değerleri oranlanarak elde edilir.

2.9. İnce Filmin Kalınlığının Etkisi

Konjügasyon, moleküler yapının içerisindeki C atomlarının sıralı bir şekilde, birbirleri ile tek ve çift bağlar yapmasına denir. 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 bir molekülün büyüklüğüne eşittir denilebilir. Şekil 2.7.'da pentacene kristal yapısı görülmektedir [28]. Bu yapının tek-katmanının kalınlığı 1,5 ile 3 nm arasındadır.



Şekil 2.11: Pentacene'in kristal yapısı.

Herhangi bir tek-katman içindeki bir molekülün kendi katmanında bulunan moleküllere çok yakın, farklı bir tek-katman içindeki moleküllere uzak olmasından dolayı ince-film katmanlı bir yapıdan meydana gelir. Bundan dolayı, katmana paralel yük iletiminin katmana dik yük iletimine göre çok daha etkili olması beklenir. Bu olay, sexythiophene tabanlı cihazların üzerinde yapılan X-ray kırınımı deneyleri ile doğrulanmıştır [30]. Aynı davranış pentacene için de gözlemlenmiştir [31]-[32].

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

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s} \quad (2.8)$$

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 [33]'de bir sayısal çözüm örneği vardır. Akümülayon bölgesinde kabul edilebilir bir yaklaşık çözüm Denk. (2.6)'de verilmiştir:

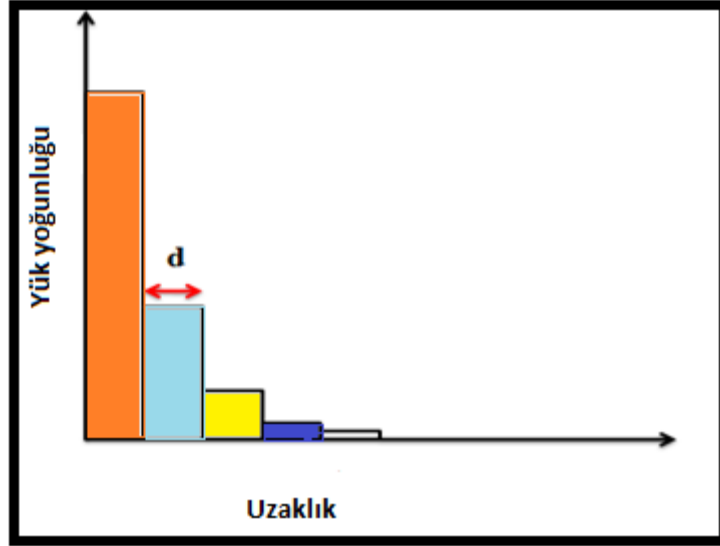
$$n(x) = \frac{\rho(x)}{q} = \frac{(C_i V_{GS})^2}{2kT \varepsilon_s} \left(1 + \frac{x}{L_D \sqrt{2}}\right)^{-2} \quad (2.9)$$

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

$$L_D = \frac{kT \varepsilon_s \sqrt{2}}{q C_i V_G} \quad (2.10)$$

k Boltzman sabiti ve T sıcaklıktır. Yük dağılımını ilk olarak Mott ve Gurney tarafından türetilmiştir [34]. 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 ara yüzüne en yakın tek- tabakada konumlandığı düşünülebilir [35].

Bunlara ek olarak denk. (2.6)'de görülen yük-taşıyıcı yoğunluğunun uzunluğun karesi ile doğru orantılı olarak azalmasıdır; bu, yalıtkan-yarıiletken ara yüzünden uzak mesafeler de göz ardı edilemeyecek sayıda yüklerin bulunduğu anlamına gelir. Eklenmesi gereken ikinci durum 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 [36]. 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 2.12: Bir OTFT'nin iletken kanalına dik yük dağılımı.

d ve n herhangi bir tek-katmanın kalınlığı ve katman sayısı olarak tanımlansın; katmanlar yalıtkan-yarıiletken ara yüzünden başlanılarak numaralandırılsın.

Katmanda birim alan başına düşen yük-taşıyıcı yoğunluğunun (n_i) tahmin edebilmek için i ,inci 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:

$$E_{i-1} - E_i = -\frac{qn_i}{\epsilon_s} \quad (2.11)$$

E_i , i ile $(i + 1)$ nci katman arasındaki sınırdaki bulunan elektrik alanın modülüdür. Katmanlara dik doğrultuda E ve V elektrik alan ve elektriksel potansiyelin değişimi Poisson denkleminin tekrar yazılması ile elde edilir (Eşitlik 3) :

$$\frac{dE}{dx} = \frac{qn(x)}{\epsilon_s} \quad (2.12)$$

$$E = -\frac{dV}{dx} \quad (2.13)$$

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:

$$\frac{n_{i+1}}{n_i} = \exp\left[\frac{q}{kT}(V_i - V_{i+1})\right] \quad (2.14)$$

Birkaç manipülasyondan sonra aşağıdaki denklem serisi elde edilir:

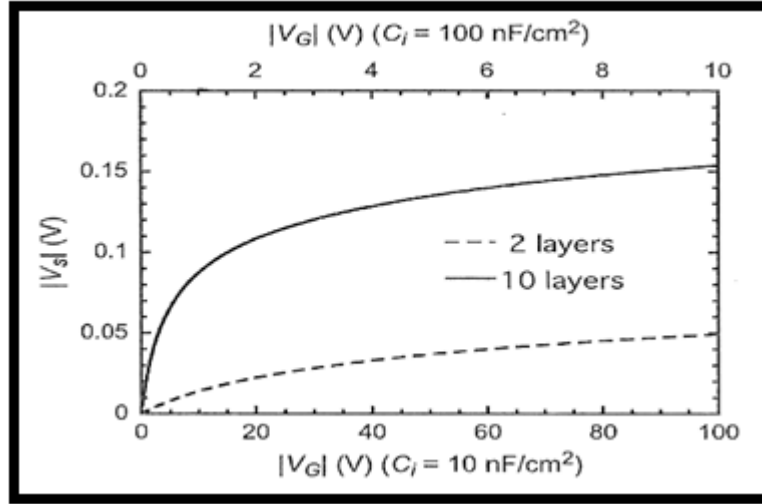
$$n_i = n_{i+1} \exp\left[\frac{dq^2}{kT\epsilon_s}\left(\frac{n_{i+1}}{2} + \sum_{j=i+2}^n n_j\right)\right] \quad (2.15)$$

Eşitlik (2.12)'in analitik çözümü olmamasına rağmen, sayısal çözümü, verilen n inci ve takip eden ilk katmanın yoğunluğundan yola çıkılarak elde edilebilir. n_i ile kapı voltajının bağlantısı aşağıdaki ifade ile verilmiştir:

$$C_i(V_G - V_S) = q \sum_1^n n_i \quad (2.16)$$

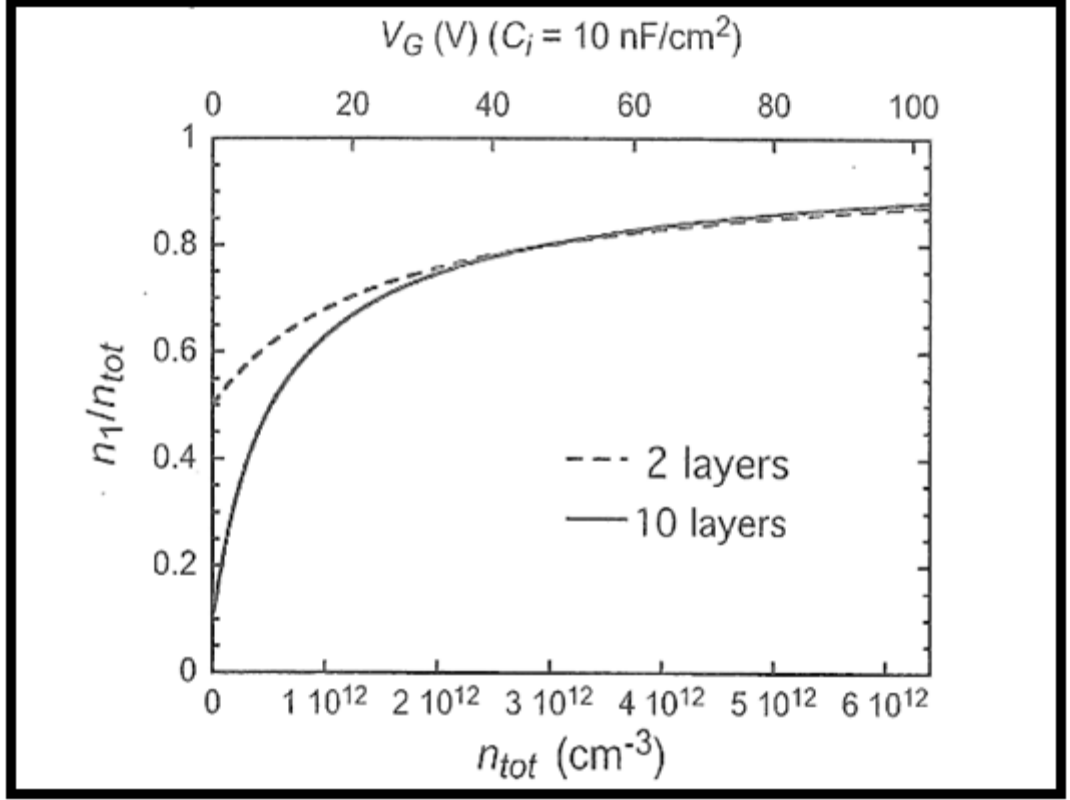
$V_s = V_1$ değeri yalıtkan-yarıiletken ara yüzündeki potansiyeldir. Bu potansiyeli belirleyebilmek için integral $i = 1$ 'den $i = n$ 'e kadar alınarak Eşitlik (2.11) tekrar düzenlenir ($V_{n+1} = 0$ sınır şartı göz önüne alınarak). Bu durumda V_s aşağıdaki gibi olur:

$$V_s = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_1}{n_n} \quad (2.17)$$



Şekil 2.13: İki farklı kapasitans değeri için yalıtın-yarıiletken ara yüzüne düşen potansiyelin kapı voltajına göre değişimi.

Yalıtkan ve iletken ara yüz potansiyelinin kapı voltajının bir fonksiyonu olarak değişimi Şekil2.9.'da gösterilmiştir. Kapı voltajının değeri iki farklı yalıtkan kapasitansı (10 ve 100 nF cm⁻²) için ayrı hesaplanmıştır. Şekil 2.10. birinci tabakanın yoğunluğunun toplam yoğunluğa ($n_{top} = \sum n_i$) 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 $n_i = n_{top}/n$ 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 2.14: Birinci tabakanın yoğunluğunun toplam yoğunluğa oranının toplam yoğunluğun ve kapı voltajının fonksiyonu olarak değişimi.

2.10. Üretim Teknikleri

Organik yarıiletkenler erime noktaları, çözünübilirlikleri ve mekanik özellikleri bakımından anorganik analoglarından çok farklıdır. Bu nedenle, konvansiyonel mikro elektronik fabrikasyon teknikleri organik yarıiletken cihazlar üretmek için çok da elverişli değildir. Yine de, termal oksidasyon ve fotolitografi gibi teknikler gibi klasik mikro elektronikte kullanılan teknikler organik yarıiletken cihazlar üretmek için de kullanılmaktadır. Organik yarıiletken katman ise çözelti veya gaz fazda kaplama yöntemleri ile ince film şekline dönüştürülmektedir. Spin-kaplama 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 tabanlı 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 düşük kaliteli olması ve bütün organik yarıiletkenlerin çözünebilme özelliğinin olmaması bu tekniklerin en büyük sorunlarından. 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 zayıfatı gaz fazda kaplama tekniklerin önemli sorunlarından.

OTFT fabrikasyonunda ilk kullanılan teknik ekran-baskı (screen-printing) tekniğidir. Cihazın önemli elementleri bir paslanmaz-çelik maske yardımı ile çözelti fazında kaplanırdı [37]-[38]. Bu basit teknik ile kaplanan cihazların performansları konvansiyonel teknikler ile üretilen cihazların performansları ile kıyaslanabilir olmasına rağmen, çözünürlüğü 35-100 μm arasındaydı - realisttik uygulamalar için gerekli kritik değerden yüksekti. Bu problemin üstesinden gelebilmek için Bell laboratuvarlarındaki bir araştırma grubu çözünürlüğü 2 μm boyutlarına indirebilen bir yüksek çözünürlüklü baskı tekniği geliştirmiştir [39].

Mikro kontak baskı adı verilen bu teknikte bir önceki kaplanan malzemeyi korumak veya malzeme kaplamaya yardımcı olan başlatıcı görevini sağlamak amacı ile kullanılan kendiliğinden bir araya gelmiş tek-katmanları(SAM (self-assamble monolayer))oluşturmak için elestomerik damgalar kullanılmıştır [40]. Uygun bir alt-katman üzerine altın tabakasının kaplanması ile üretilmeye başlanan transistör 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 regio-regular poly(3-hexylthiophene); (rr-P3HT), yalıtkan poly(methly methacrylate (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 [41]. Desen, poliimid filmlerin oksijen plazma ve fotolitografi teknikleriyle kaldırılması sonucunda elde edilmiştir. Üretilen cihaz yine üst-kontak 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 [42]. 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 dönüşür ve alıcı özellikli diğer ince filme kaplanır. Ancak bütün iletken polimerler üretilen ısıya karşı böyle tepki göstermezler.

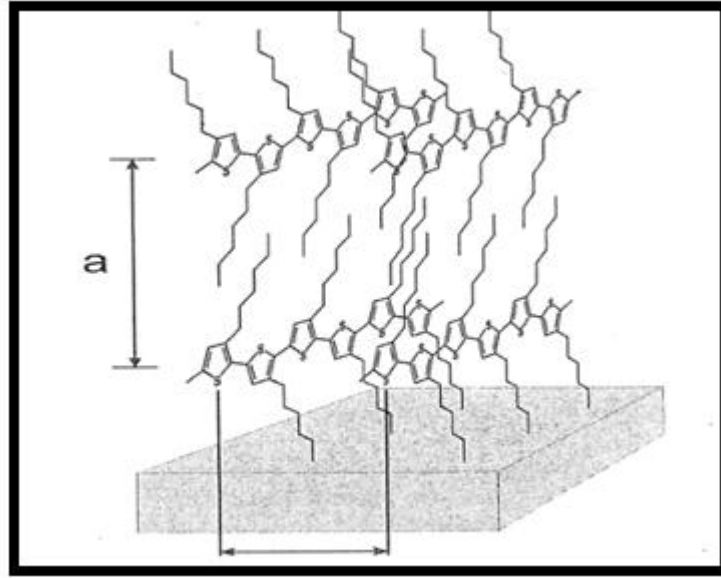
2.11. OFET Fabrikasyonlarında Kullanılan Malzemeler

Daha önce OTFT fabrikasyonlarında kullanılan iki ana malzeme türü olduğundan bahsedilmiştir: 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- ve n-tip olmak üzere yük-taşıyıcıları türlerine göre ayrılırlar. Yalıtkanlar ise organik, anorganik, SAM ve çok bileşenli yalıtkanlar olarak gruplandırılabilir.

2.11.1. Polimerler

Polimer tabanlı OTFT fabrikasyonlarında çok kullanılan iki polimer vardır: polyfluorene (PF) ve poly(3-alkylthiophene) (P3HT). Siringhaus ve arkadaşlarının, spin-kaplama yöntemi ile kaplanmış P3HT üzerinde yaptıkları çalışmaların öncülüğünde polimer OTFT'lerin performanslarının yalıtkan-polimer ara yüzündeki zincirlerin kimyasal ve yapısal düzenlerine kritik şekilde bağlı olduğu gözlenmiştir [74].

Yüksek düzen en başta polimer zincirlerinin düzenliliğine (regio-regularity) bağlıdır; bu, alkil zincirlerinin tiyofen halkalarına bağlanmaları ile ilgili bir durumdur. Yine de, yüksek düzen için sadece bu bağlanma düzeni yeterli değildir. İki tip oryantasyon 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 $0.1 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Burada belirtilmesi gereken bir durum daha vardır: Polimer zincirlerinin alt-taban üzerindeki yönelimlerini etkileyen faktörler henüz tam olarak bilinmemektedir.



Şekil 2.15: "Edge-on" yönelimine sahip rr-P3HT molekülü.

2.11.2. Küçük Moleküller

Pentacene, küçük moleküller bazlı p-tip OTFT fabrikasyonlarında en çok kullanılan malzemedir. Pentacene için elde edilmiş en yüksek mobilite değerleri $6 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 'dir [44].

Pentacene 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 ara yüzler oluşmakta, bundan dolayı, üretilen cihazlar düşük performanslı olmaktadır. Yalıtkan-yarıiletken ara yüzünde yapılan modifikasyonlar sayesinde cihaz performanslarında büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Alt-tabanı ısıtmak ve düşük hızda kaplamak bu sorunu halletmek için alternatif çözümlerdir.

2.11.3. n-Tipi Yarıiletkenler

Daha önceden de bahsedildiği gibi, organik yarıiletkenlerde n- ve p-tip notasyonlar inorganik 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 fullerene C_{60} ve türevleri [45] ve N,N4-dialkly-3,4,9,10-perylene tetracarboxlic diimide türevleridir [46]; 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-tipi bileşikler ile p-tipi organik yarıiletkenlerin elektronik devrelerde birlikte kullanılabilme imkânından dolayı kararlı n-tipi yarıiletkenler üzerindeki çalışmalar önem kazanmaktadır. Bütünleyici metal-oksit yarıiletkenler (CMOS) bu anlamda mikro elektronikte 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- veya p-tipi 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-tipi ve p-tipi bileşiklerden oluşan iç içe geçmiş ağ yapı [47].

Grubun kullandığı birinci bileşik C₆₀'ın bir türevi (6,6-phenly C61-butyric acid mently ester PCBM), ikincisi ise rr-P3HT veya poly-p-phenylenevinylene (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-tipi ve p-tipi bileşikleri birbirinden ayırmak daha akıllıca bir yaklaşımdır.

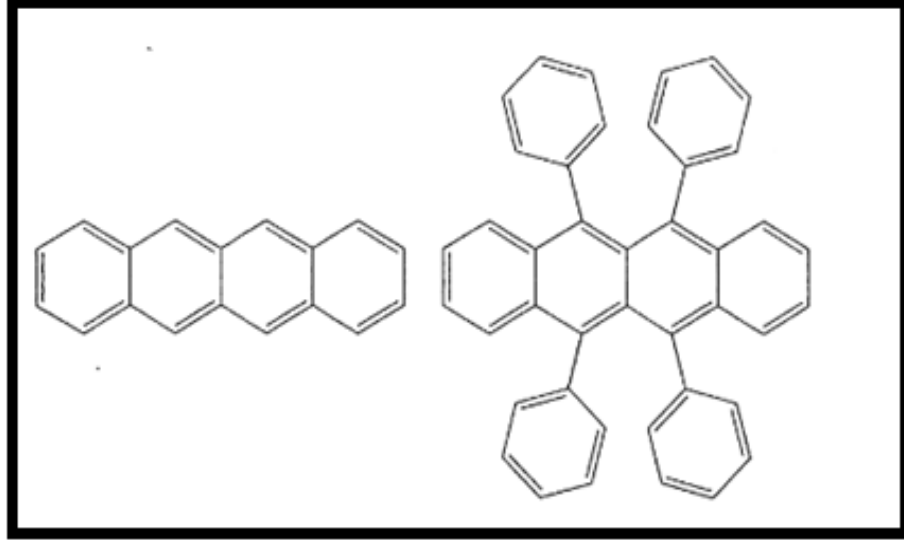
2.11.4. Tek Kristaller

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.

Kristal, daha önceden hazırlanmış yalıtkan-kaynak-oluk yapısının üstüne elektro statik olarak bağlanır [48]. Kontaklar ve kapı elektrotu kristal üzerine direkt kontaklanır [49].

Tek kristallerin kusur konsantrasyonları, buharlaştırma yöntemleri veya çözelti tabanlı 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 en çok kullanılan iki önemli tek kristal vardır: Tetracene ve rubrene (Şekil 2.12)



Şekil 2.16: Tetracene (sol) ve rubrene (sağ) kristallerinin moleküler yapıları.

Tek kristaller ile üretilen cihazların öne çıkan özellikleri [50]: Beklenmeyecek kadar yüksek mobilite (rubrene 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 değerin altına inildikten sonra sıcaklık azaltıldığında ise mobilite düşmektedir. Bu kritik değerler tetracene için $280 \text{ }^\circ\text{K}$, rubrene için $200 \text{ }^\circ\text{K}$ 'dir ve kristal eksenine göre anizotropik mobilite olur.

2.11.5. 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 ara yüzünün kalitesinin öneminden bahsedilmişti.

Geçen on beş yıl boyunca, birçok dielektrik (yalıtkan) malzeme OFTF'lerde kapı dielektriği olarak kullanılmıştır. Prensipde, bu malzemeler Şekil2.13.'deki gibi dört ana grupta toplanabilirler: Anorganik dielektrikler, organik dielektrikler, SAM ve çok-komponentli dielektrikler.



Şekil 2.17: OTFT fabrikasyonlarında kullanılan kapı-dielektriklerinin sınıflandırılmış şekli ile şematik görünümü.

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 [51]. Ancak bu sistemde dielektrik, kullanılan alt-tabanın özelliklerine bağlıdır. Alt-tabanlardan bağımsız dielektrikler üzerine yapılan araştırmaların neticesinde birçok anorganik dielektrik malzeme üretilmiştir (Tablo 2.1). Bu araştırmalar, anorganik oksitler [52] ve nitritler [53] ve onların büyütülme tekniklerini kapsamaktadır.

Tablo 2.2: Bazı anorganik dielektrik malzemeler.

Malzemeler	Hazırlanma metotları	Kaplama sıcaklığı [°C]	Dielektrik sabiti
SiO ₂	Termal büyütme	>600	3.9
SiO ₂	İyon ışınıyla kazıma	80	3.9
Al ₂ O ₃	Kazıma	-	~5.1
Al ₂ O ₃	Anodized yöntemi	r.t.	~4.2
TiO ₂	Anodized yöntemi	r.t.	21
SiN _x	CVD	250-350	6-7
BZT	rf kazıma	r.t.	17.3
BST	rf kazıma	r.t.	16
Ta ₂ O ₅	Kazıma	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 metot, uygun bir solvent içinde çözülmüş polimer çözeltisinin döndürerek kaplama, püskürterek kaplama veya baskı teknikleri ile kaplama 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.

2.12. Neden Esnek Cihazlar?

Günümüz teknolojisinde kullanışlı, ucuz ve taşınabilirliği yüksek cihazlar üretmek ana motivasyonlardan biridir. Bunun için organik malzemeler kullanmak şarttır. OLED, OFET gibi cihazlar üretilip sisteme birlikte entegrasyonu sonucunda bu amaca ulaşılabilir. Şuan hala bu konuda başlangıç seviyesinde olan teknoloji, ilerisi için umut vaat etmektedir. Şekil 2.14.'de bazı prototip cihazlar gösterilmiştir.



Şekil 2.18: Bazı esnek prototip ve öngörülen cihazlar.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

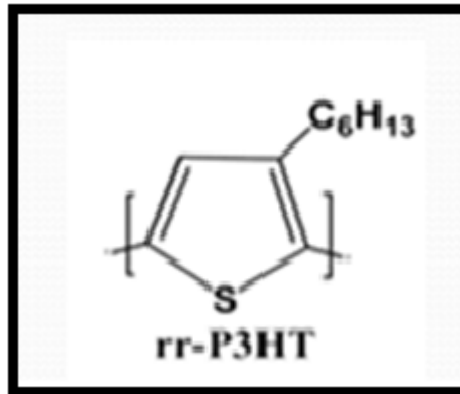
3.1. Esnek Alt-Tabanın Temizlik Aşamaları

Bu çalışmada esnek alt-tabanlar kullanılmıştır (Şekil 3.2.). Kullanılan alt-tabanların tek tarafları yalıtıcıdır, öbür yanı ise ITO kaplıdır. Bundan dolayı kapı kontağı alabilmek için bu katmanın bir kısmı teflon ile sarılıyor. Geriye kalan kısımların temizliği ise cihaz performansı için kritik öneme sahiptir.

İlk önce esnek alt-taban belirli boyutlarda kesildi. Daha sonra kesilen alt-tabanın bir kısmı teflonla sarıldı. Alt taban temizlik amacıyla metanol içerisinde, sonik titreştiricide 10 dakika boyunca titreştirildi. Takip eden aşamada numuneler argon gazı ile kurutuldu. Bu titreştirme ve kurutma işlemleri saf su ve etanol kullanılarak tekrarlandı. Böylece yüzeydeki kirlilikler mümkün olduğu kadar uzaklaştırıldı.

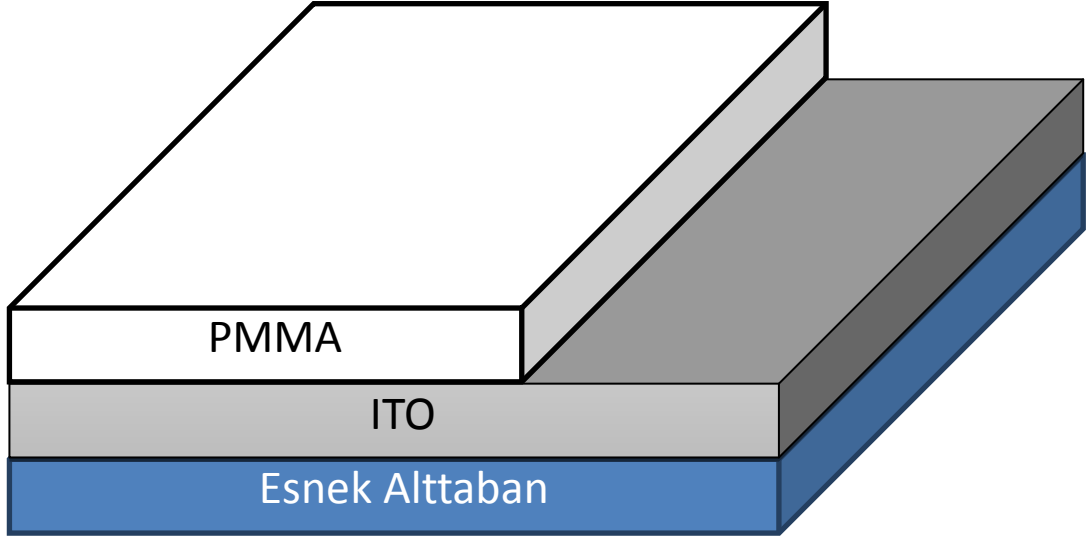
3.2. Döndürerek Kaplama İle rr-P3HT Filmi Büyütme

rr-P3HT (Şekil 3.1.) 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 3.1: rr-P3HT'nin molekül yapısı.

rr-P3HT ince-film şu şekilde hazırlandı: 10 mg/ml oranında hazırlanan kloroform - rr-P3HT karışımı 24 saat boyunca, 60 °C'de manyetik karıştırıcı ile karıştırıldı. Böylece çözünme işlemi tamamlandı. Yarıiletken film kaplanmadan önce Esnek alt tabanın bir kısmı teflon bandı ile sarıldı. Bunu yapmaktaki amaç, yarıiletken polimerin sadece dielektrik katmanın üzerine kaplanmasıdır. Bu aşamada cihazın profil görünümü Şekil 3.2.'deki gibidir.



Şekil 3.2: PMMA kaplandıktan sonraki OFET'in profil görünümü.

Bu işlemlerden sonra, daha önceden hazırlanmış solvent, spin-kaplama yöntemi ile (2000 rpm, 30sn) esnek ITO katmanın üzerinde kaplandı.(Şekil 3.3)



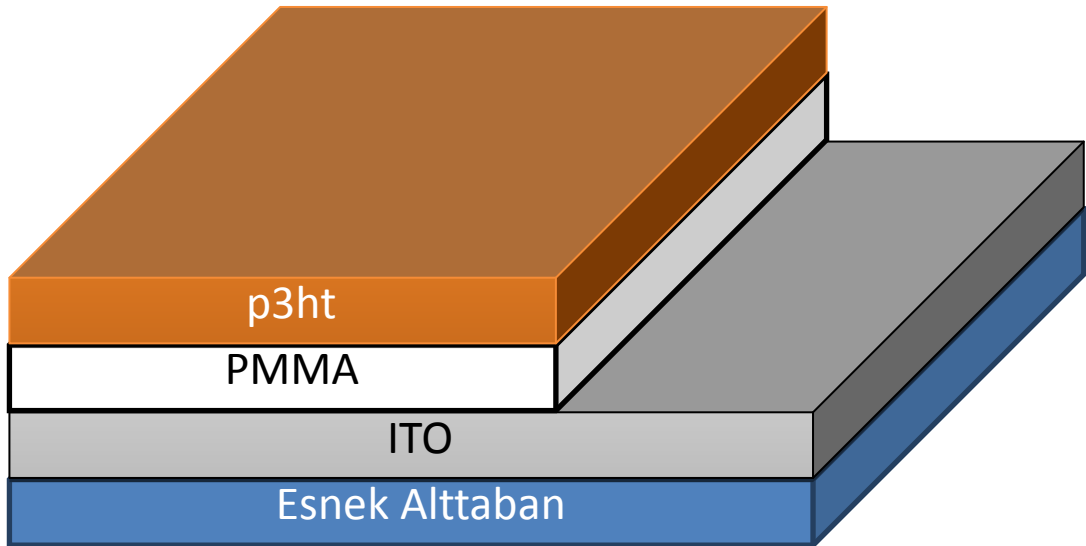
Şekil 3.3: Spin kaplama sistemi.

Bu kaplama işleminden sonra numune 120 °C'lik sıcaklıkta, inert ortamında (Glove-Box) 30 dakika boyunca tavlandı. Bu tavlamadaki amaç filmde kalan solventin kurutulmasıdır. Aşağıda Şekil 3.4.'de "glove-box" sistemi gösterilmiştir.



Şekil 3.4: "glove-box" sistemi.

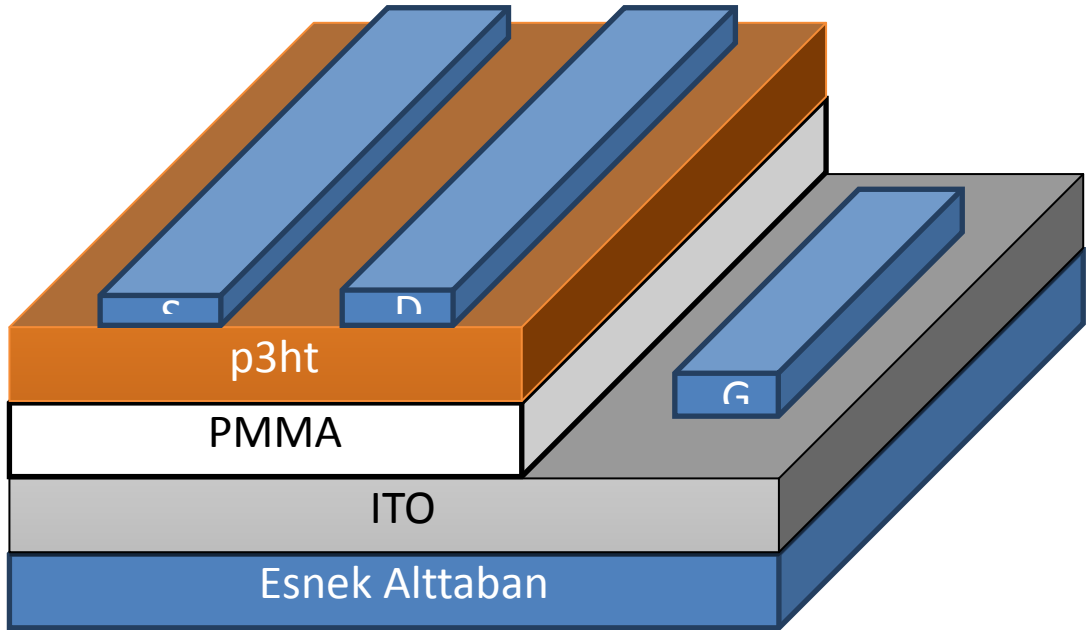
Bu aşamada cihazın profil görüntüsü Şekil 3.5.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Esnek ITO/rr-P3HT yapısının profil görünümü.

3.3. Elektrotların Kaplanma İşlemi

Son aşama ise kontaktların kaplanma aşamasıdır. Kapı, kaynak ve oluk elektrotları bir gölge maskesi kullanılarak, vakum buharlaştırma yöntemi ile 5×10^{-6} mbar basınç altında kaplandı. Kaynak ile oluk arası mesafe elektron mikroskobu ile belirlenmiştir. Bu mesafe OTFT'nin iletken kanalının genişliğidir(W). Kullanılan maskenin boyutlarından dolayı iletken kanalın uzunluğu $L=0,4$ cm'dir. Bu iki parametre transistörün oluk-kaynak arasındaki akımı ve mobilitiyi güçlü şekilde etkiler. Yine kullanılan maske sayesinde kaynak ve oluk elektrotları daha önceden büyütülmüş organik yarıiletkenin, kapı elektrotu ise ITO yüzeyinin üzerine kaplanmış ve transistör tamamlanmıştır. En son numune tekrar 120 °C'lik sıcaklıkla 30 dakika boyunca tavlansmıştır. Böylece kontaktların oturması ve kalan artık solventin de uzaklaştırılması sağlanmıştır. Üretilen transistörün profil görünümü Şekil 3.6.'da gösterilmiştir.

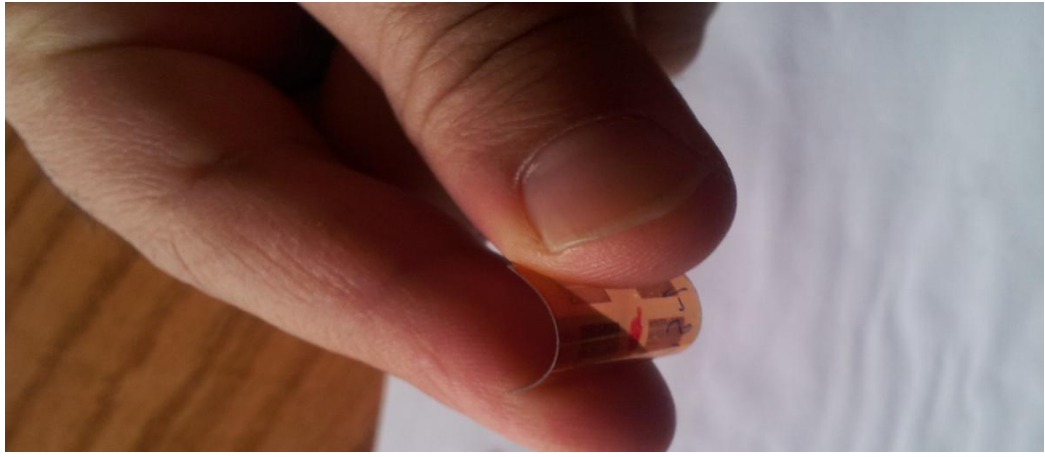
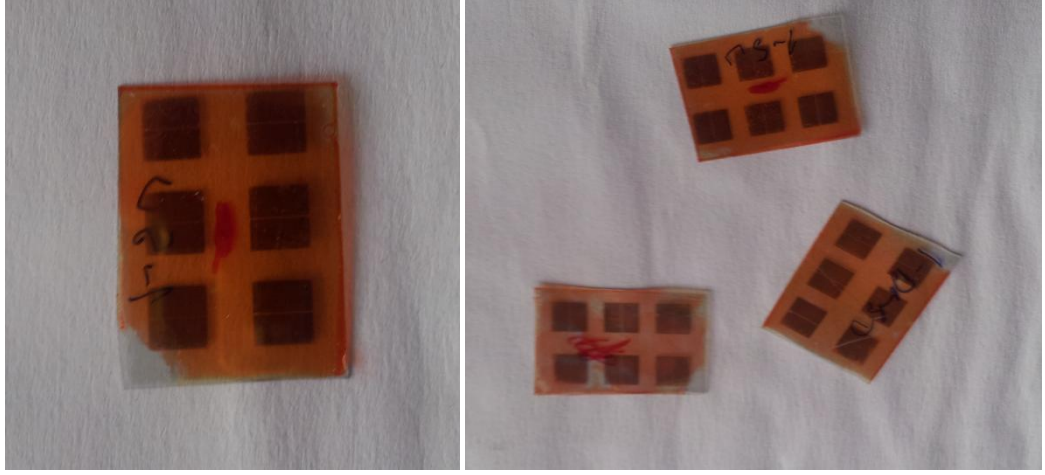


Şekil 3.6: OFET'in son halinin profil görünümü.

Aşağıda metal kontak kaplamanın yapıldığı sistem gözükmektedir.



Şekil 3.7: Kaplamanın yapıldığı vakum buharlaştırma cihazı.



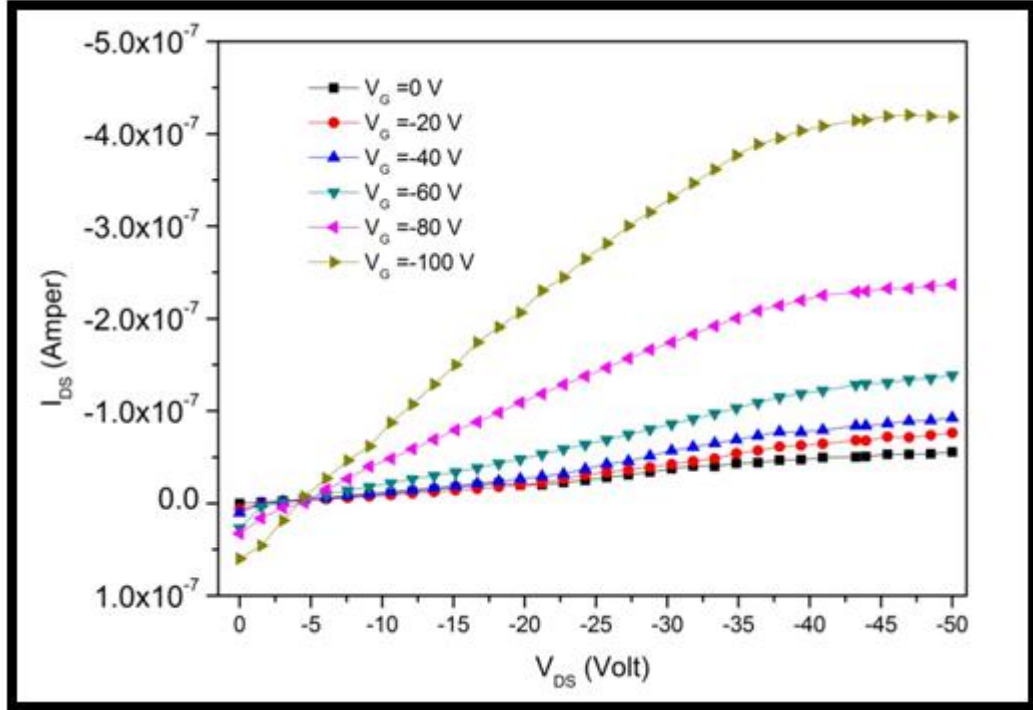
Şekil 3.8: Üretilen esnek OFET cihaz fotoğrafları.

3.4. Karakterizasyon

OTFT'nin çıktı ve iletim karakteristikleri 4200SCS Keithley cihazı kullanılarak alınmıştır. Karakterizasyon yapılırken, kapı-kaynak voltajı (V_{GS}) ve kaynak-oluk arası voltaj (V_{DS}) negatif alınmıştır.

4.BULGULAR ve TARTIŞMA

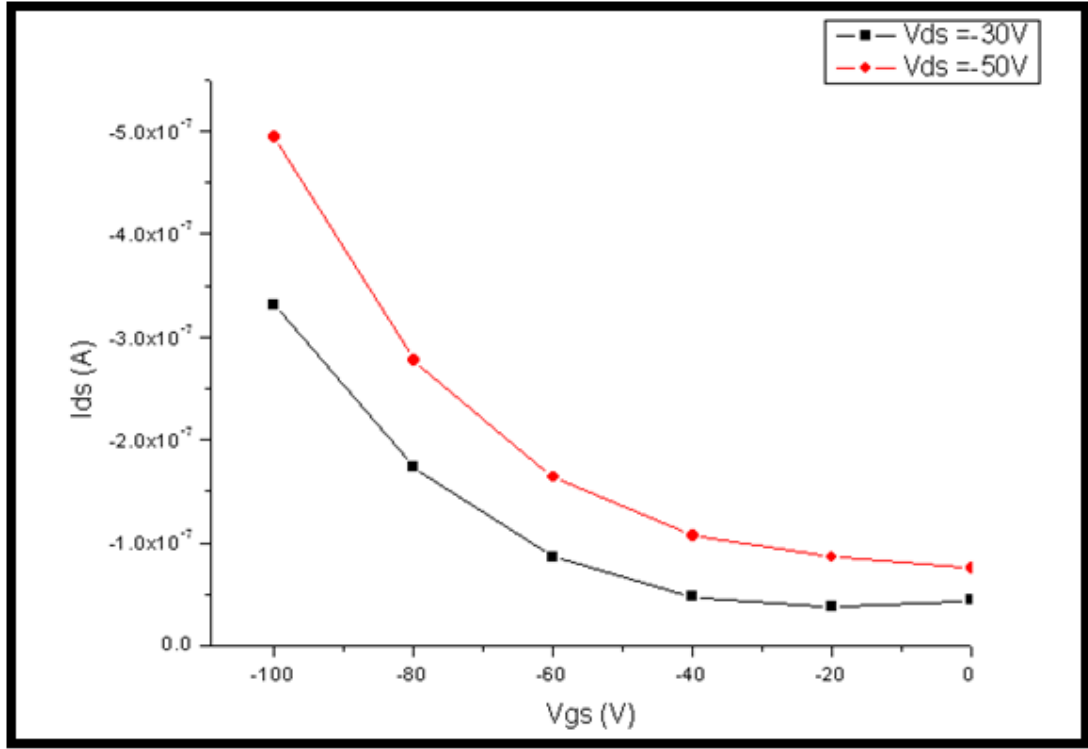
4.1.Esnek ITO/rr-P3HT OTFT'nin Çıktı (I-V) Karakteristiği



Şekil 4.1: Esnek ITO/rr-P3hT OTFT 'nin çıktı (I-V) karakteristiği.

Şekil 4.1.'de gösterilen karakteristik kaynak-oluk akımının (I_{DS}) kapı voltajına (V_G) göre değişimini gösterir ve transistörün çıktı veya I-V karakteristiği olarak adlandırılır. $V_{DS}=0V$ 'dan başlanarak, her adımda 0,1V arttırılarak $V_{DS}=-50V$ 'a kadar kapı voltajı uygulanmış, $V_{GS}=0$ ile -100 V arası 20 V arttırılarak $V_{DS}-I_{DS}$ eğrileri çizilmiştir. . Karakteristik 4200SCS Keithley cihazı kullanılarak alınmıştır. Grafik çizimi Origin Pro 8 programı ile yapılmıştır.

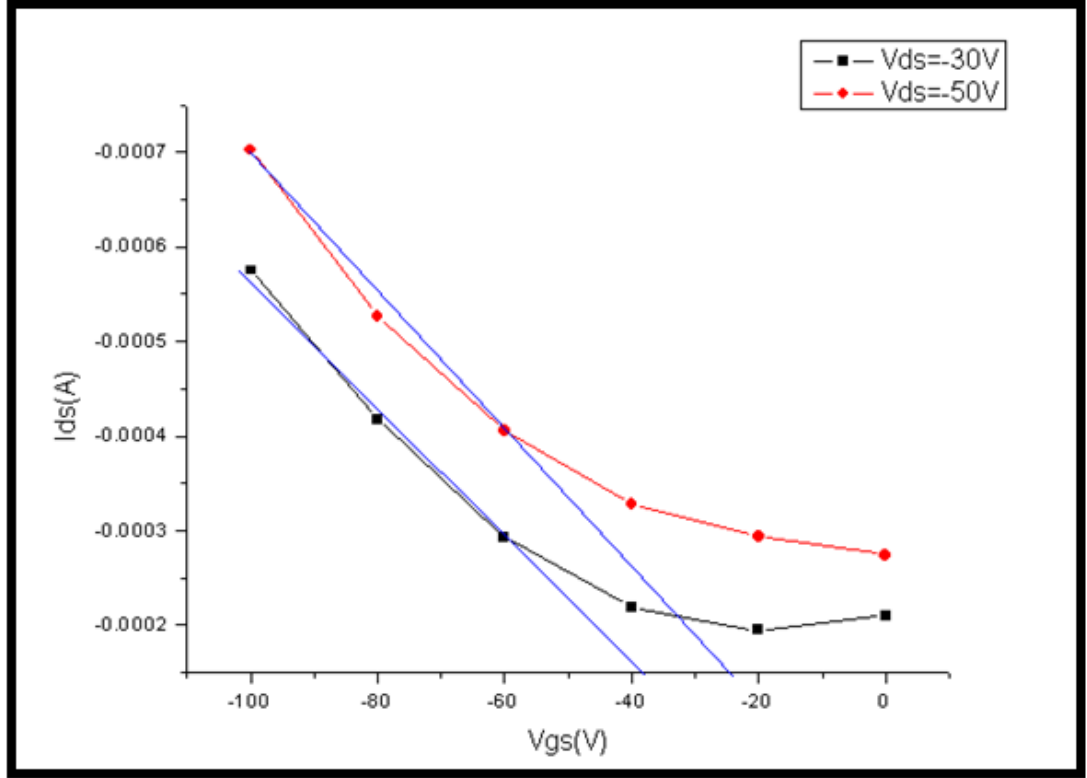
4.2.ITO/rr-P3HT OTFT'nin1.İletim Karakteristiği



Şekil 4.2: Esnek ITO/rr-P3hT OTFT'nin 1. iletim karakteristiği.

Şekil 4.2.'de gösterilen karakteristik sabit bir kaynak-oluk voltajında (V_{DS}),kaynak-oluk akımının (I_{DS}) ve kapı-kaynak voltajı(V_{GS}) ile değişimini göstermektedir. Karakteristik elde edilirken $V_{DS}=-30$ ve -50 V değerlerinde V_{GS} kapı voltajı -100 V ile 0 V arasında taranmıştır. Farklı V_{GS} değerlerine karşılık gelen I_{DS} değerleri bulunmuştur.

4.3.Esnek ITO/rr-P3HT OTFT 'nin 2.İletim Karakteristiği



Şekil 4.3: Esnek ITO/rr-P3HT OTFT'nin 2. iletim karakteristiği.

Şekil 4.3.'de gösterilen karakteristik kaynak-oluk arasındaki akımın karekökünün kapı-kaynak arasındaki voltaj ile değişimini göstermektedir. Bu karakteristik Şekil 4.2.'de gösterilen karakteristiğin I_{DS} eksenin karekökü alınarak tekrar çizilmesi ile elde edilmiştir. V_{gs} eksenini kesen mavi çizgiler eşik (V_t) voltajlarını temsil eder. $V_{ds}=-30V$ için $V_t=-38V$, $V_{ds}=-50V$ için $V_t=-25V$ 'tur.

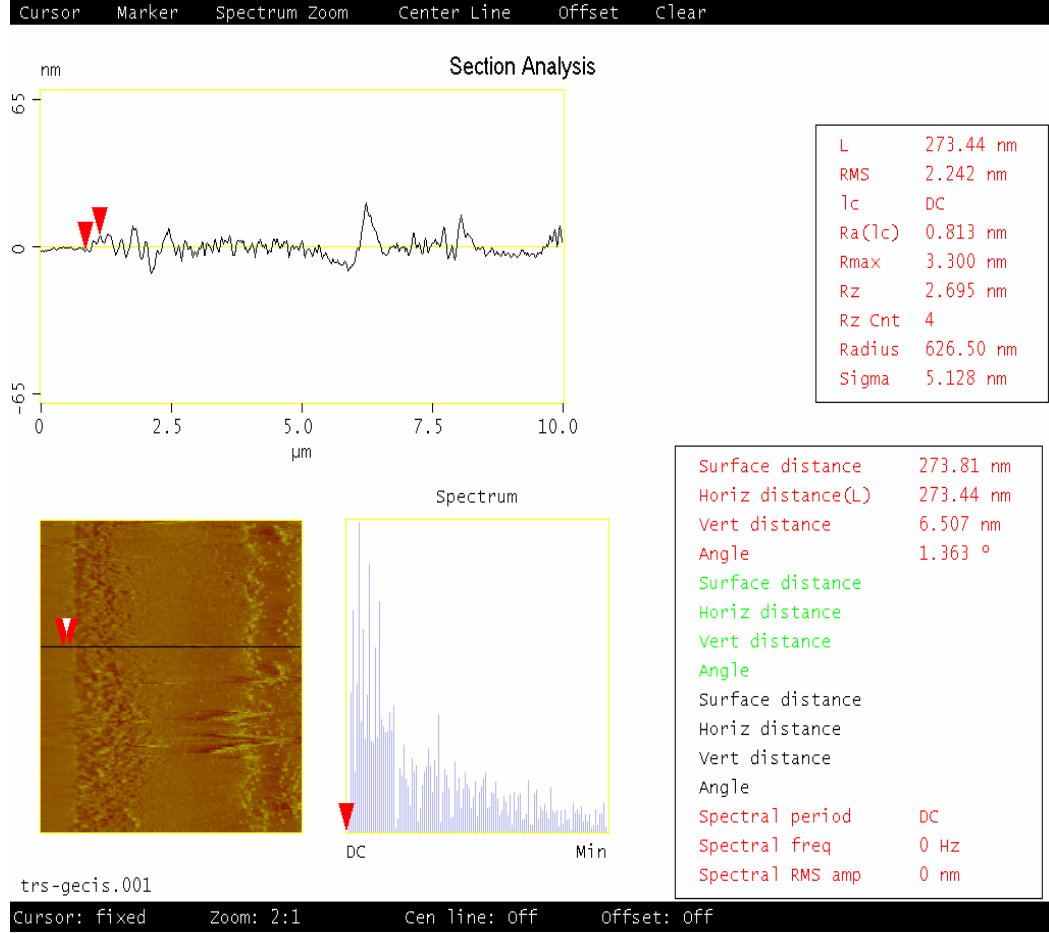
4.4. OFET Kanal Genişliği

OTFT'nin iletken kanalının elektron mikroskobu görüntüsü gösterilmiştir. (şekil 4.4.) kanal uzunluğunun 100 μm olduğu görülmektedir. Bu kanal aralığı, yukarıda verilen mobilite formülüne bakacak olunursa, mobilite ile ters orantılı olup, kanal aralığının büyümesi mobiliteyi azaltır ve kanal aralığının küçülmesi ise mobiliteyi artırır.



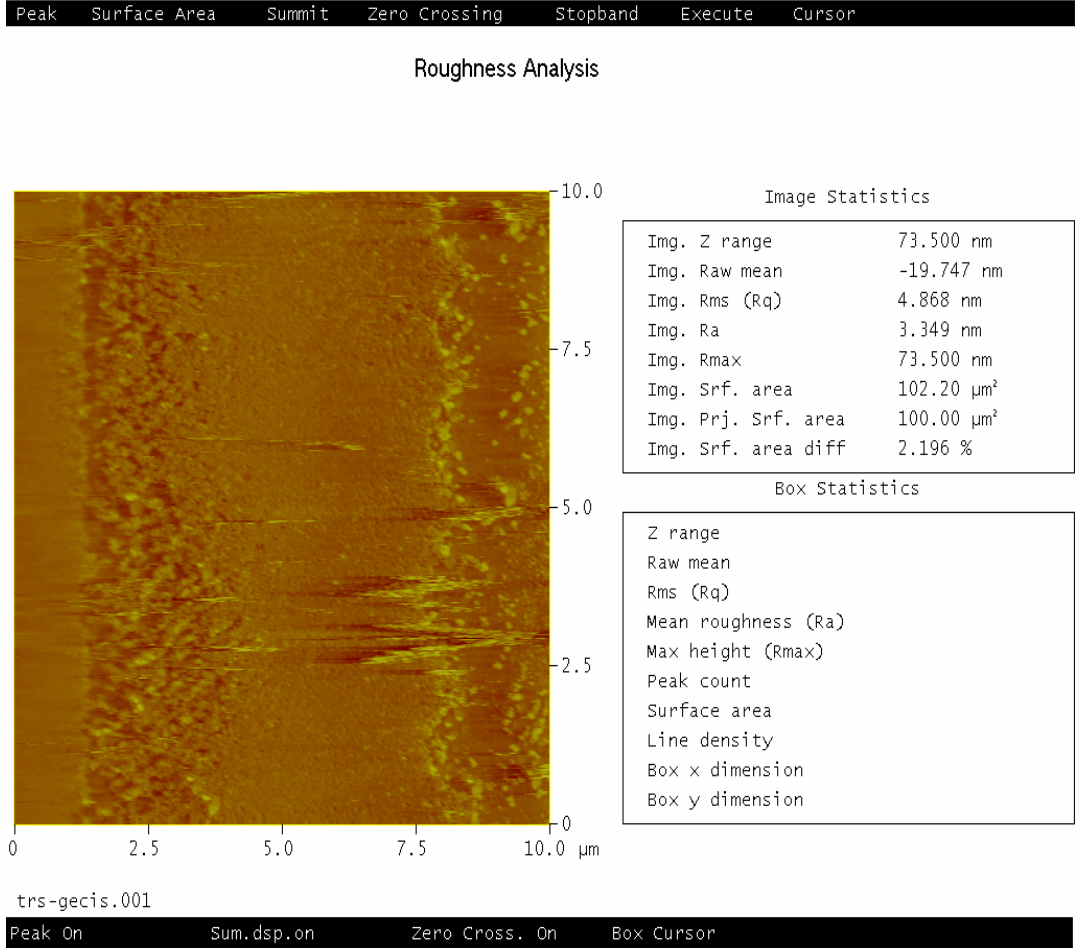
şekil 4.4: Kaynak-oluk arasının (iletken kanal) elektron mikroskobu görüntüsü.

4.5. Üretilen OFET'in AFM Görüntüleri



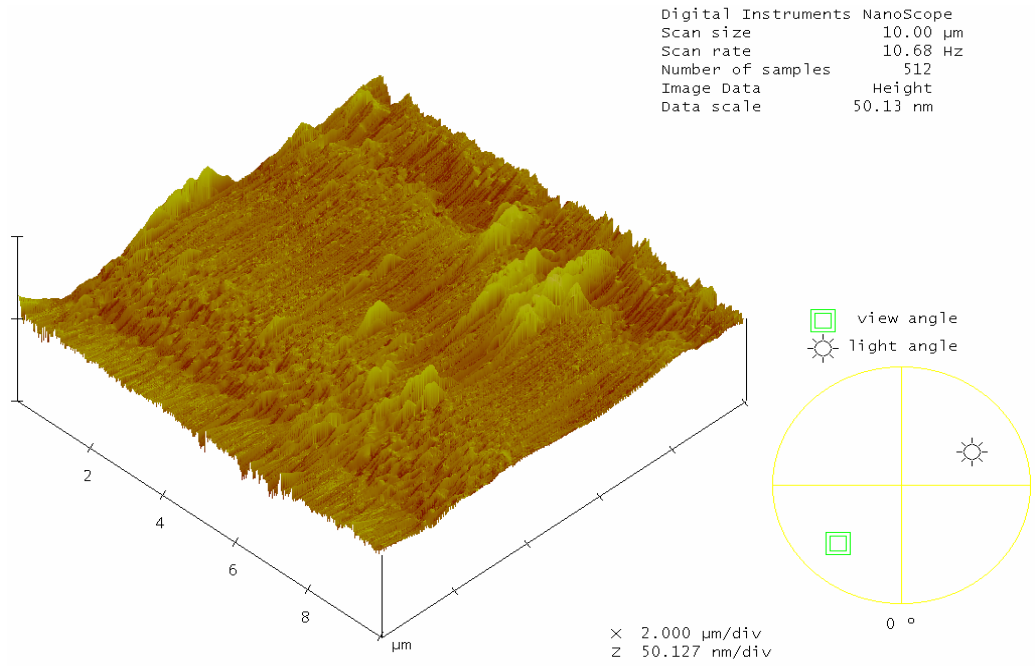
Şekil 4.5: Yüzey iletken kanal arası görüntüsü.

Şekil 4.5. te görüldüğü gibi source veya drain ile iletken kanal arasındaki geçişin başladığı çizginin yüzeyine baktığımızda source, drain ile kanal arasındaki yükseklik farkı 273.44 nm olduğu görülmektedir. Bu fark kontak alabilmek için metal buharlaştırıcı vasıtasıyla buharlaştırdığımız metalin, cihazımızın yüzeyine yapışan metalin kalınlığıdır. Aradaki bu yükselti ne kadar düşük olursa buradan elektronların geçişi daha kolay olacağından cihazın verimliliği artacaktır.

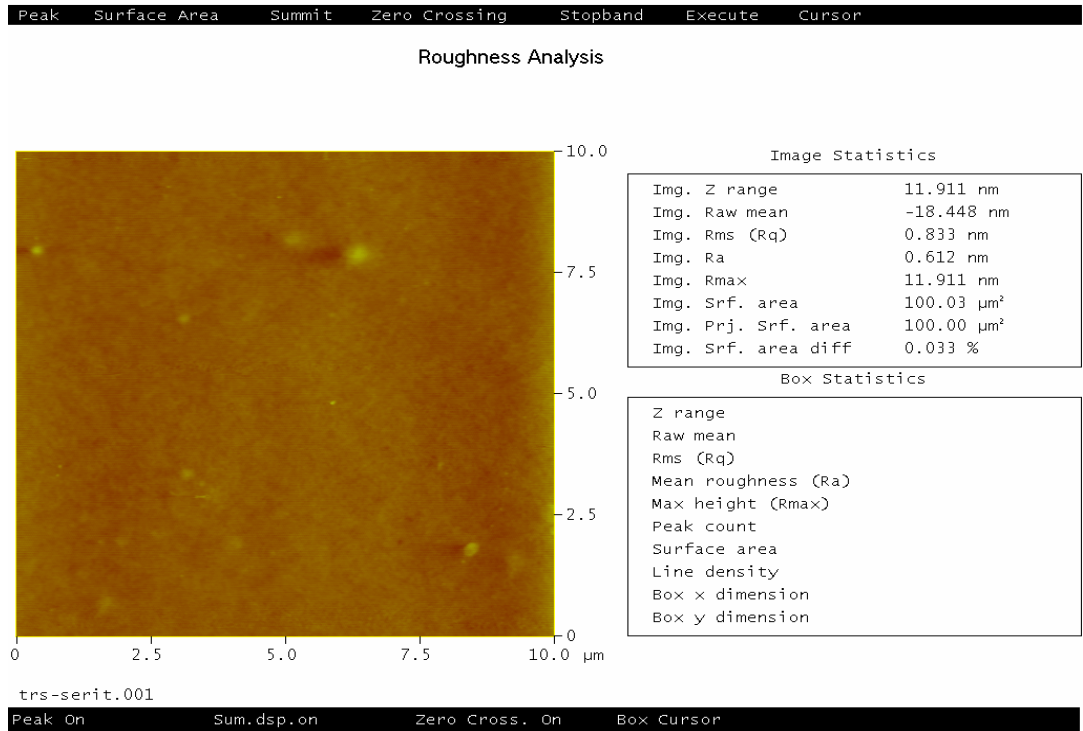


Şekil 4.6: OFET drain yüzey görüntüsü.

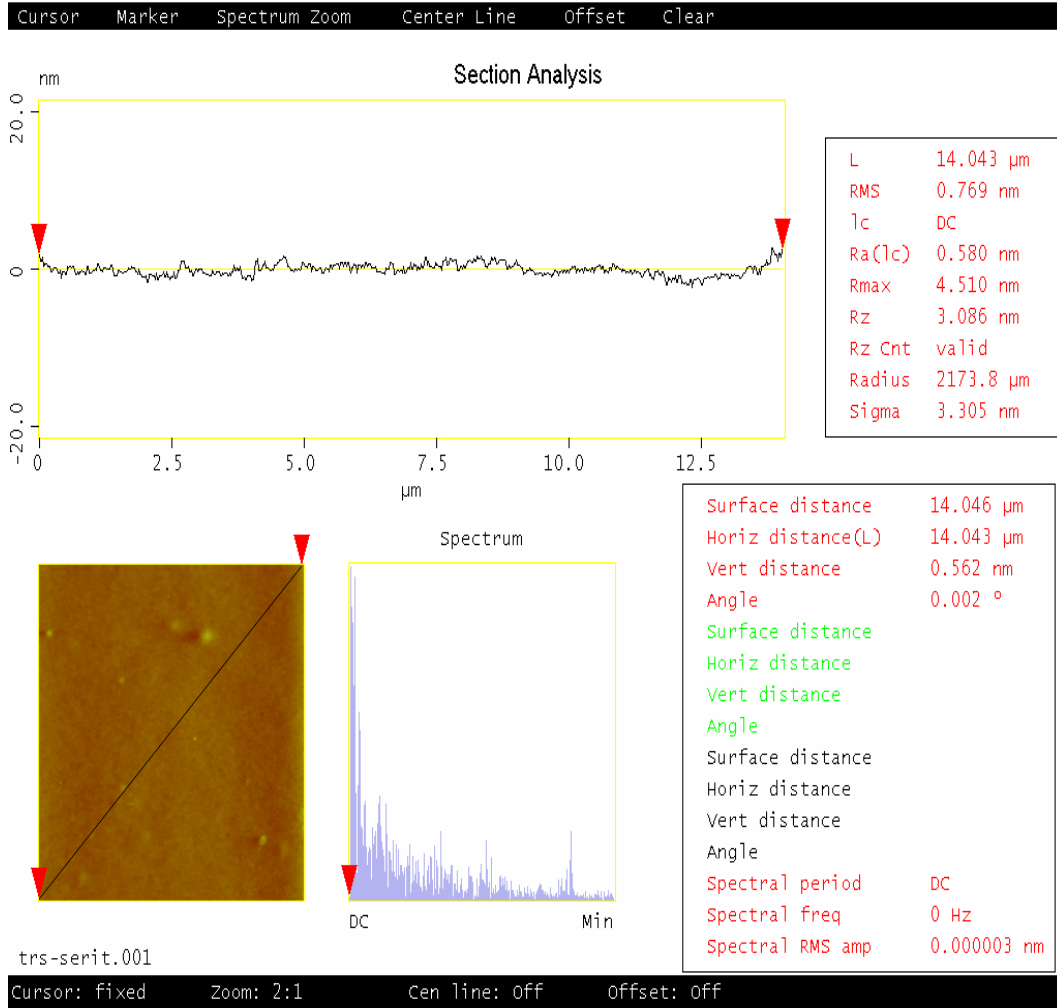
Drain'nin yüzeyindeki maksimum pürüz yüksekliği 73.500 nm'dir. Ortalama pürüz yüksekliği ise 3.349 nm'dir. Bu değerler pürüzsüzlüğe yakın değerler olup kaplama tekniğinin kalitesini ortaya koymaktadır. Yüzeydeki bu maksimum pürüz ise kaplama yaparken inert ortam olmadığı için çevredeki tozlar ve oksitlenmenin etkisiyle olmuştur. İleride yapılabilecek çalışmalarda, çalışmaların geneli inert ortamda yapılırsa, maksimum verimde cihazlar yapmak mümkün olacaktır.



Şekil 4.7: OFET'in drain yüzeyinin 3 boyutlu görüntüsü.

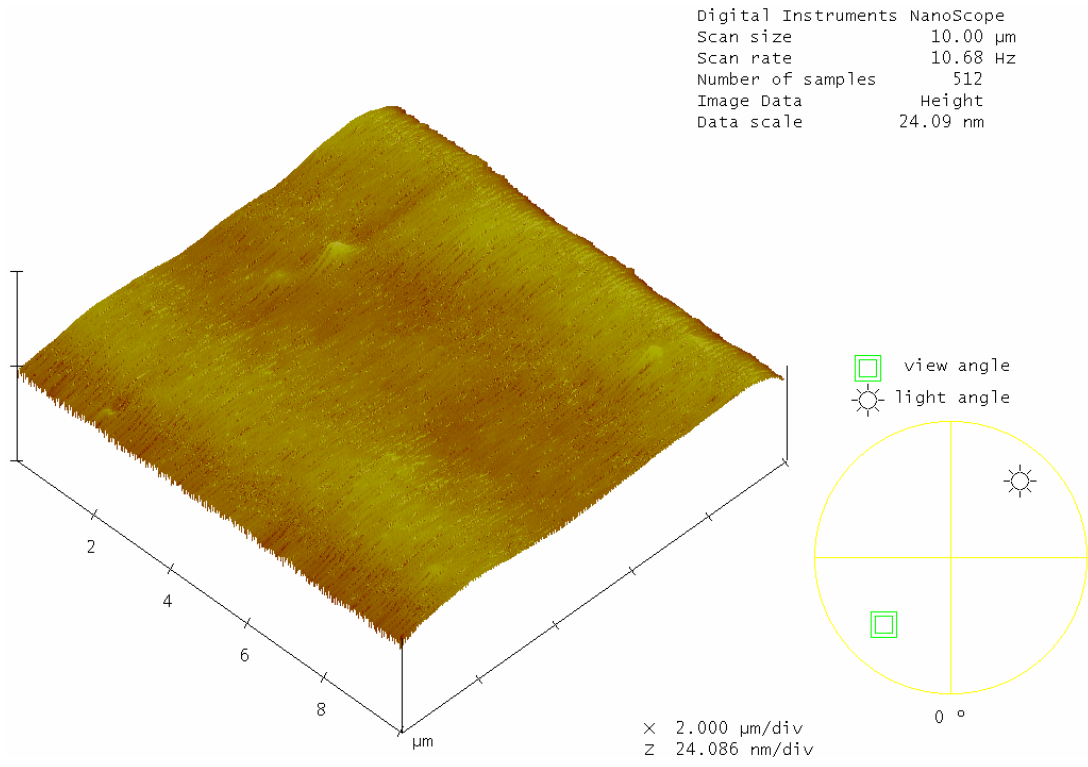


Şekil 4.8: OFET iletken kanal yüzey görüntüsü.



Şekil 4.9: OFET iletken kanal yüzey pürüz analizi

Şekil 4.9. da görüldüğü gibi iletken kanal aralığının pürüzlülük yüzeyi maksimum yüksekliği 4.510 nm'dir, ortalama pürüz yüksekliği ise 0.580 nm olup pürüzsüz bir yüzeye çok yakın sonuçlar alınmıştır. Organik yarıiletken malzemeleri hazırlarken ve bunların iyi bir şekilde karıştırıp sonrasında ise kaplama işlemini yaparken her aşamasına çok özen göstermenin verdiği neticeyle pürüzsüze yakın bir yüzey elde edilmesi sağlanmış olur.



Şekil 4.10: OFET iletken kanalın 3 boyutlu yüzey görüntüsü.

5. SONUÇ ve YORUM

5.1. Esnek ITO/rr-P3HT Çıktı (I-V) Karakteristiği

Şekil4.1.'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. Esnek ITO/rr-P3HT Çıktı (I-V) Karakteristiği

Şekil4.2.'de $V_{GS}=0, -100 V$ negatif kapı voltajlarına karşılık gelen $V_{GS}-I_{DS}$ eğriler gözükmemektedir. Kapı voltajının negatif alınmasının nedeni pozitif bölgedeki davranışın gözlemlenmesidir. Şekilden anlaşılacağı gibi $V_{GS}= -100 V$ değerinde akım en yüksek değerdedir. Negatif 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 ara yüzünde elektronlar birikmektedir; p-kanal olarak çalışan transistörün akım değerleri düşmektedir. Sonuçta, $0 V$ kapı voltajı değerine geldikten sonra akım daha fazla düşmemektedir. Bu seviyede görülen akım iletken kanaldan sızan sızıntı akımıdır. Transistörün yaklaşık $V_{DS}=-40 V$ değerinde doyuma gittiği söylenebilir.

5.3. I_{on}/I_{off} Değeri

Transistörler için bir diğer önemli parametre ise açık/kapalı akım oranıdır (I_{on}/I_{off}). Bu oran transistörün kapı 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 akımların en yüksek ve en düşük olduğu durumlar oranlanarak bulunmuştur. Bulunan değer transistör için yaklaşık $I_{on}/I_{off}= 10^1$ 'dir. Bu

değer henüz realistik uygulamalar için yeterli olmasa da organik elektronik cihazlar için yeterli bir seviyededir. Bu oran birçok parametreye bağlıdır. İnce-filmin kalitesi, kontakların kalitesi ve yalıtkanın kalitesi bu parametrelerin en önemlileridir.

5.4. 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 hem mobilitenin yüksek olmasını sağlar hem de realistik uygulamalar için gereklidir.

V_T değerleri Şekil 4.3.te görülen doğruların eksenleri kestikleri noktalara karşılık gelen voltaj değerleridir. Karakteristiklerden, ITO/rr-P3HT için $V_{ds}=-30V$ için $V_T=-38V$, $V_{ds}=-50V$ için $V_T=-25V$ değerleri elde edilmiştir. Buradan, uygulanan V_{ds} voltajına göre eşik voltajlarının değişimi gözlenmektedir.

5.5. Mobilite

Mobilite klasik elektronik cihazlarda olduğu gibi organik elektronik cihazlar için de çok önemli bir parametredir. Üretilen cihazların kapı kapasitansları ITO/rr-PMMA/P3HT için $C_i=20nFcm^{-1}$ bulunmuştur. Şekil 4.3.'daki eğrinin eğimi, Şekil 4.4'deki elektron mikroskobu görüntülerinden $L=100 \mu m$ ve kullanılan maskenin $W=4000\mu m$ değerleri alınarak bütün bu veriler Eşitlik (2.3)'de yerine yazılarak mobiliteler ITO/rr-P3HT için $\mu=7,23 \times 10^{-3} cm^2 V^{-1} s^{-1}$ bulunmuştur. Bu değer rr-P3HT'nin bu cihazlar için ölçülen mobilite değerleridir. Daha önceden rr-P3HT'nin mobilite değerinden bahsedilmişti (bkz. 2.3.1.).Buradan, üretilen cihazların mobiliteleri tatmin edici derecede yüksektir. 500nm kalınlıkta dielektrik tabakaya sahip ITO/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.

6. ÖNERİLER

Uzun süren laboratuvar çalışmalarıyla, esnek alt taban üzerine büyütülen organik alan etkili transistör (OFET) başarıyla üretildi ve yüksek lisans tezi haline getirildi. Yeni nesil teknolojisi olan esnek OFET yapım çalışmaları, İnorganik transistörlere nispeten çok daha düşük maliyetle ve hatta stabilize olan çok pahalı laboratuvarlarda değil Enstitümüz bünyesinde bulunan laboratuvarlarda üretildi.

Çalışmalarda, cihaz üretilirken bazı aşamalar inert ortamda yapıldı. Diğer aşamaları ise oksijen ve nemin olduğu ortamda yapıldı. Bu durum ise, cihazın en büyük düşmanları olan nem ve oksijen tarafından cihazın çalışmasını ve verimliliğini çok büyük ölçüde düşürmektedir. Bu durumu minimize etmenin yolu, cihazı üretirken kullanılan tüm ekipmanı, inert ortama alıp, cihaz üretim aşamalarının bütününe bu ortamda yapmak gerekmektedir. Cihazın ölçümü, cihaz düz zeminin üzerine konularak alındı, esnek moddaki performansına bakılması için, cihazın esnetilerek ölçümünün alınması gerekir.

Yapılması gereken diğer önemli çalışma ise, cihaz üretimi tamamlandıktan sonra, cihazın çalışmasını olumsuz etkilemeyen ve cihazla uyum sağlayabilen şeffaf bir koruyucu tabaka ile kaplanmasıdır. Bu vesile ile cihaz, inert ortam dışına alındığında nem ve oksijenden etkilenmesi minimize edilerek, cihazın ömrünün uzaması sağlanmış olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Koeningsberger J., Weiss J., (1911), "Organic Electronics", Annual Physics, 35(3), 1-46.
- [2] Stahl F. A., (2003), "An enlightening history of the emergence of semiconductors can be found in", Applied Physics Letters, 71(2), 1170-1173.
- [3] Crone B. K., (2001), "Thin Films", Applied Physics, 89, 5125-5126.
- [4] Sheraw C. D., (2002), "Semiconductors", Applied Physics Letters, 80, 1088-1090.
- [5] Klauk H., (2006), "Organic Electronics, Materials Manufacturing Applications". WILEY-VCH Verlag GmbH & KGaA, Weinheim ISBN, 3,527-528.
- [6] Bilgin V., (2003), "ZnO Filmlerinin Elektrik, Optik, Yapısal ve Yüzeysel Özellikleri Üzerine Kalay Katkısının Etkisi", Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi.
- [7] Eckertova L., (1986), Physics of Thin Films, Plenum Press, New York and London, 340.
- [8] Hass G., Thun R. E., (1969), "Physics of Thin Films Advances in Research and Development", Academic Press, USA 5(3), 341-342.
- [9] Pejova B., Grozdanov I., (2006), "Structural and optical properties of chemically deposited thin films of quantum-sized bismuth (III) sulfide", Materials Chemistry and Physics 99, 39-49.
- [10] Ebisawa F., Kurokawa T., Nara S., (1983), "Bipolar Transistors", Journal of Applied Physics, 54(2), 3255-3256.
- [11] Sze S. M., (1981), "Physics of semiconductor devices", John Wiley & Sons USA, 37, 868-869.
- [12] Koeningsberger J., Weiss J., (1911), "Organic Electronics", Annual Physics 35, 1-46.
- [13] Ebisawa F., Kurokawa T., Nara S., (1983), "Bipolar Transistors", Journal of Applied Physics, 54(2), 3255-3256.
- [14] Eckertova L., (1986), Physics of Thin Films, Plenum Press, New York and London, 340.

- [15] Garnier F., Yassar A., Hajlaoui R., Horowitz G., Deloffre F., Servet B., Ries S., Alnot P., (1993), "Oxide Thin-Film Transistors", *Chemistry Social*, 115(2), 8716-8721.
- [16] Karl N., (2001), "Charge Carrier Mobility in Organic Crystals", in Farchioni", *Organic Electronic Materials*, Springer, 23, 367-368.
- [17] Bassler H., (1981), "Organic Thin Film Transistors", *Physics State Solution*, 107(3), 9-10.
- [18] Dimitrakopoulos C. D., (2002), "Organic Semiconductors", Malenfant. *Advance Materials*, 14(2), 99-100.
- [19] Stadler P., (2006), "Hysteresis in Bio-Organic Field-Effect Transistors", Diploma Thesis at Linz Institute of Organic Solar Cells.
- [20] Kelley T. W., Muiers D. V., Baude P. F., Smith T. P., Jones T. D., (2003) Symposium process 771, 169, Los Angeles, Californiya, USA, 17 March.
- [21] Lilienfeld J. E., (1930), Transparent Oxide Electronics, US Patent 1,745,175.
- [22] Kahng D., Atalla M. M., (1963), in IRE Solid-State Devices Research Conference, Pittsburg, PA, US Patent 3,102, 230.
- [23] Ebisawa F., Kurokawa T., Nara S., (1983), "Bipolar Transistors", *Journal of Applied Physics*, 54(2), 3255-3256.
- [24] Weimer P. K., (1962), "Fabrication of a planar water gated organic field effect transistor using a hydrophilic polythiophene for improved digital inverter performance", *Applied Physics*, 50, 1462-1469.
- [25] Spear W. E., (1972), "Effective mobility in amorphous organic transistors: Influence of the width of the density of states", *Non-Crystall Solids*, 8(10), 727-738.
- [26] Neudeck G. W., Malhotra A. K. , (1976), "Characterization of partially dissipated solitons in a traveling-wave field-effect transistor", *Solid State Electron.*, 19(5), 721-729.
- [27] Nalwa H. S., (2003), "High performance top-gate field-effect transistors", *Handbook of Organic Electronics and Photonics*, 3(4), 153-176.
- [28] Stadler P., (2006), "Hysteresis in Bio-Organic Field-Effect Transistors", Diploma Thesis, Linz Institute of Organic Solar Cells.
- [29] Holmes D., Kumaraswamy S., Matzger A. J., Vollhardt K. P. C., (1999), "Carbon nanosheets derived from soluble pitch molecules and their applications in organic transistors", *Chemical Euratom*, 5(2), 3399-3412.

- [30] Garnier F., Yassar A., Hajlaoui R., Horowitz G., Deloffre F., Servet B., Ries S., Alnot P., (1993), "Oxide Thin-Film Transistors", *Chemistry Social*, 115(1), 8716-8721.
- [31] Minakata T., Nagoya I., Ozaki M., (1991), "Solution-processed semiconducting aluminum-zinc-tin-oxide thin films and their thin-film transistor applications", *Physics* 69(5), 7354-7356.
- [32] Spear W. E., (1972), "Effective mobility in amorphous organic transistors: Influence of the width of the density of states", *Non-Crystall Solids*, 8(10), 727-738.
- [33] Tanase C., Meijer E. J., Blom P. W. M., Leeuw D. M. de, (2003), "Characterization of organic thin film transistors with hysteresis and contact effects", *Organic Electronic*, 4(3), 33-37.
- [34] Mott N. F., Gurney R. W., (1940) "Elektronic Processes in Ionic Crystals", 1st, Clarendon Press, Oxford.
- [35] Dodabalapur A., Torsi L., Katz H. E, (1995), "Unlocking the full potential of light emitting field-effect transistors by engineering charge injection layers", *Science*, 268(1), 270-271.
- [36] Sancho-Garcia J. C., Horowitz G., Bredas J.L., Cornil J., Chem J., (2003), "Temperature dependence of the transport properties of spin field-effect transistors built with InAs and Si channels", *Physics*, 119, 1253-1258.
- [37] Garnier F., Hajlaoui R., Yassar A., Srivastava P., (1994), "New method for the extraction of bulk channel mobility and flat-band voltage in junctionless transistors", *Science*, 265, 1684-1686.
- [38] Bao Z. N., Feng Y., Dodabalapur A., Raju V. R. A., Lovinger J., (1997), "Flexible thin-film transistors using multistep UV nanoimprint lithography", *Chemical Materials*, 9, 1299-1300.
- [39] Rogers J. A., Bao Z. N., Makhija A., Braun P., (1999), "Characteristics of thin-film transistors", *Advance Materials*, 11, 741-745.
- [40] Xia Y., Whitesides G. M., Angrew., (1998), "In-situ study of pn-heterojunction interface states in organic thin film transistors", *Chemical Education*, 37, 550-575.
- [41] Sirringhaus H., Kawase T., Friend R. H., Shimoda T., Inbasekaran M., Wu W., Woo E. P., (2000), "Enhancing the performance of organic thin-film transistors using an organic-doped inorganic buffer layer", *Science*, 290(1), 2123-2126.
- [42] Blanchet G. B., Loo Y. L., Rogers J. A., Gao F., Fincher C. R., (2003), "Charge carriers in double-layer organic field-effect transistor", *Applied Physics Letter*, 82, 463-465.

- [43] Sirringhaus H., Brown P. J., Friend R. H., Nielsen M. M., Bechgaard K., Langeveldvoss B. M. W., Spiering A. J. H., Jasssen R. A. J., Meijer E. W., Herwig P., Leeuw D. M. de, (1999), "Ambipolar field-effect transistors with bilayered thiophene/phenylene co-oligomers", *Nature*, 401(1), 685-688.
- [44] Kelley T. W., Muires D. V., Baude P. F., Smith T. P., Jones T. D., (2003) *Organic Transistors, Symposium, Process*, 169-179, Melbourne, Avustralya, 11 May.
- [45] Jarret C. P., Pincler K., Newbould R., Friend R. H., (1996), "Organic field-effect transistor based sensors with sensitive gate dielectrics", *Synthesis Metals*, 77(5), 35-38.
- [46] Katz H. E., Lovinger A. J., Johnson J., Kloc C., Siegrist T., Li W., Lin Y. Y., Dodabalapur A., (2000), "Organic field-effect transistors as a test-bed for molecular electronics: A combined study with large-area molecular junctions", *Nature*, 404, 478-481.
- [47] Meijer E. J., De leeuw D. M., Setayesh S., Veenendaal E. van, Huismann B. H., Blom P. W. M., Hummelen J. C., Scherf U., Klapwijk T. M., (2003), "Stretched organic transistors maintain mobility on flexible substrates", *Nature Material*, 2(1), 678-682.
- [48] Boer R. W. I. De, Klapwijk T. M., Morpurgo A. F., (2003), "Organic thin-film transistor memory with Ag floating-gate", *Applied Physics Letters*, 83, 4345-4347.
- [49] Podzorov V., Pudalov V. M., Gershenson M. E., (2003), "Aluminium oxide prepared by UV/ozone exposure for low-voltage organic thin-film transistors", *Applied Physics Letters*, 82(2), 1739-1741.
- [50] Podzorov V., Menard E., Borissov A., Kiryukhin V., Rojers J. A., Gershenson M. E., (2004), "Carbon nanotube nanoradios: The field emission and transistor configurations", *Physics Revolation Letter*, 93, 866-867.
- [51] Tsumaru A., (1986), "Molecular gating of transistors by amine-terminated layers", *Applied Physics Letters*, 49, 1210-1211.
- [52] Web 1, (2013), <http://eng.harran.edu.tr/~nbesli/SEG/02.YariIletkenler.pdf>, (Eriřim Tarihi: 26/05/2013).
- [53] Web 2, (2013), www.semiconductor.com, (Eriřim Tarihi: 25/05/2013).

ÖZGEÇMİŞ

Hasan Türkan 16.08.1985 yılında Adıyaman ilinin Kâhta ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğretimini Adıyaman'da tamamladı. Bir sene İngilizce hazırlık sınıfından sonra, 2006 yılında girdiği Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsünü Fizik Bölümü'nü 2010 yılında lisans derecesi ile bitirdi. 2010-2011 Eğitim-Öğretim yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programına başladı.