

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YENİ SENTEZ KOBALT FTALOSİYANİN TABANLI  
ORGANİK TRANSİTÖR ÜRETİMİ VE  
ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Cihat İLİK**

**Enstitü Anabilim Dalı : FİZİK**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Sadık BAĞCI**

**Ocak 2017**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YENİ SENTEZ KOBALT FTALOSİYANİN TABANLI  
ORGANİK TRANSİSTÖR ÜRETİMİ VE  
ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

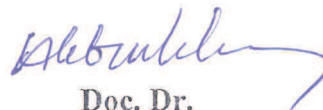
**Cihat İLİK**

**Enstitü Anabilim Dalı : FİZİK**

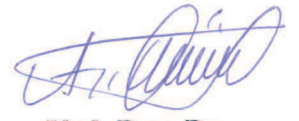
**Bu tez 23 / 01 / 2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.**



**Doç. Dr.  
Sadık BAĞCI  
Jüri Başkanı**



**Doç. Dr.  
Ali ÇORUH  
Üye**



**Yrd. Doç. Dr.  
Alparslan ATAHAN  
Üye**

## BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.



Cihat İLİK

23.01.2017

## **TEŞEKKÜR**

Bu çalıŐmayı hazırlamamda bana yardımcı olan değerli hocalarım Doç. Dr. Sadık BAĞCI, Doç. Dr. Meryem Nilüfer YARAŐIR, Uz. Dr. Ahmet DEMİR ve Uz. Dr. Ahmet Turgut BİLGİÇLİ'ye Şimdiye kadar üzerimde emeği bulunan tüm hocalarıma, her zaman yanımda olan dostlarıma ve ayrıca bugüne kadar benden maddi ve manevi tüm desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vii
TABLolar LİSTESİ .....	ix
ÖZET .....	x
SUMMARY .....	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.. .....	1
BÖLÜM 2.	
YARIİLETKENLER.....	4
2.1. Yarıiletken ve Özellikleri.....	4
2.2. Yarıiletken İnce Filmler .....	8
2.3. Organik Yarıiletkenler .....	9
2.4. Organik Yarıiletken Malzemeler .....	14
2.4.1. Politiyofenler.....	16
2.4.2. Poliflorenler .....	16
2.4.3. Çeşitli konjuge yapıdaki moleküller .....	16
2.4.4. Fullerenler ve çözülebilir türevleri .....	18
2.5. Organik Yarıiletkenlerin Temel Özellikleri.....	19
2.5.1. Optiksel özellikler .....	20
2.5.2. Yük taşıyıcı iletimi .....	21

### BÖLÜM 3.

ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLER .....	25
3.1. Transistörler .....	25
3.2. Organik İnce Film Transistör Yapısı .....	28
3.3. Organik Alan Etkili Transistör .....	30
3.4. Organik Alan Etkili Transistörlerin Çeşitleri .....	32
3.5. Organik Alan Etkili Transistörlerin Çalışma Prensibi.....	34
3.5.1. Doğrusal (lineer) rejim bölgesi .....	38
3.5.2. Kısıtılma noktasındaki doyum rejiminin başlaması .....	38
3.5.3. Doyum bölgesi .....	39
3.6. Alan Etkili Transistörün Performans Karakteristikleri . .....	39
3.6.1. Mobilite değerinin hesaplanması . .....	40
3.6.2. Alt eşik değer (subthreshold) eğrisinin hesaplanması .....	41
3.6.3. Açma kapama (on/off) oranı .....	42
3.6.4. Geçiş iletkenlik (transconductance) değeri .....	43
3.7. Organik Alan Etkili Transistörlerde Kullanılan Üretim Teknikleri.....	43
3.7.1. Vakum buharlaştırma tekniği .....	44
3.7.2. Langmuir-Blodget tekniği .....	45
3.7.3. Çözelti prosesli döndürülerek kaplama yöntemi.....	45

### BÖLÜM 4.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	49
4.1. CoPc'nin Yapısı.....	49
4.2. CoPc Tabanlı OFET'in Hazırlanışı .....	51
4.3. Karakterizasyon.....	52

### BÖLÜM 5.

BULGULAR.....	53
5.1. CoPc'nin Enerji Aralığı ve UV Karakteristiğinin İncelenmesi.....	53
5.2. CoPc/SiO <sub>2</sub> Tabanlı OFET'in Akım-Voltaj Karakteristiğinin İncelenmesi...54	

BÖLÜM 6.	
SONUÇ .....	59
KAYNAKLAR.....	60
ÖZGEÇMİŞ .....	65

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

V	: Uygulanan voltaj
$\mu$	: Yük taşıyıcı mobilitesi
$\rho$	: Yük dağılımı
A	: Amper
$C_i$	: Birim alan başına kapasitans
D	: Katman aralığı
E	: Elektrik alan
$E_g$	: Yarıiletken band aralığı
$I_{DS}$	: Kaynak oluk akımı
J	: Akım yoğunluğu
$N_o$	: Etkin durum yoğunluğu
N	: Toplam yük taşıyıcı yoğunluğu
$n_i$	: Kendiliğinden yük taşıyıcı yoğunluğu
OLED	: Organik ışık yayan diyot
OPVC	: Organik fotovoltaiik hücre
OTFT	: Organik ince film transistör
P <sub>3</sub> AT	: Poly(3-alkiltiophene)
PCBM	: 6,6-phenly C61-butyric acid mently ester
PMMA	: poly (methly methacrylate)
Q	: Elektronun yükü
rr-P <sub>3</sub> HT	: regio-regular poly (3-hexylythiophene)
SiO <sub>2</sub>	: Silikon Dioksit
T	: Sıcaklık
$V_{DS}$	: Oluk kaynak voltajı
$V_{GS}$	: Kapı kaynak voltajı
$V_T$	: Eşik voltajı



V	: Yük taşıyıcılarının sürüklenme hızları
S	: Saniye
K	: Boltzman sabiti
$I_{on}/I_{off}$	: Açık kapalı akım oranı
OFET	: Organik alan etkili transistör
PF	: Polifloren
CoPc	: Kobalt ftalosiyanın

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Organik ve polimer yapıları alan etkili transistörler üzerine yayınlanan makale sayısı (Institute for scientific information web of science) .....	3
Şekil 2.1. Bir metalin, bir yalıtkanın ve bir katkılı yarıiletkenin enerji diyagramları	5
Şekil 2.2. Katkılı bir yarıiletkenin iletkenliğinin sıcaklık bağımlılığının Arrhenius eğrisi.....	7
Şekil 2.3. OFET'lerde kullanılan başlıca p tipi organik yarıiletken malzemelerin kimyasal yapıları. ....	13
Şekil 2.4. OFET'lerde kullanılan başlıca n tipi organik yarıiletken malzemelerin kimyasal yapıları. ....	13
Şekil 2.5. En basit konjüge $\pi$ -elektron sistemi olan ethene molekülünün $\sigma$ ve $\pi$ bağları (sol) ve $\pi$ -konjüge molekülün enerji seviyeleri (sağ). ....	14
Şekil 2.6. Bazı prototip organik yarıiletkenlerin moleküler yapıları .....	15
Şekil 2.7. Farklı fazlardaki organik moleküllerin optiksel spektralarının şematik görünümü. ....	20
Şekil 2.8. Bir organik molekülün enerji seviyeleri şeması.....	21
Şekil 2.9. Bir izole molekül ve bir moleküler kristalin enerji seviyeleri.. ....	22
Şekil 2.10. Bir izole molekülün (sol), bir moleküler kristalin (orta) ve bir amorf katının (sağ) enerji seviyeleri. ....	23
Şekil 3.1. Transistör a) görüntüsü, b) sembolü. ....	25
Şekil 3.2. npn ve pnp yapılarına sahip transistörler. ....	27
Şekil 3.3. OTFT yapısının şematik gösterimi. İki cihaz da üst kapı yapısına sahiptir (a): Alt kontak; (b): Üst kontak.....	29
Şekil 3.4. OTFT'nin tipik çıktı (üst) ve iletim (alt) karakteristikleri. ....	29
Şekil 3.5. Organik alan etkili transistörün yapısı. ....	30

Şekil 3.6. OFET karakteristikleri a) Değişken kapı voltajına göre oluk akımı ve oluk voltajı karakteristiği b) Oluk akımın kapı voltajına göre değişim karakteristiği.....	32
Şekil 3.7. Organik alan etkili transistörler için farklı yapı tasarımları.....	33
Şekil 3.8. OFET'in çalışma prensibini anlatan enerji düzeyi diyagramı. ....	35
Şekil 3.9. OTFT'nin tipik çıktı (a) ve iletim (b) karakteristikleri. ....	36
Şekil 3.10. $I_{ds}$ akımının doğrusal bölge rejimi. ....	38
Şekil 3.11. Kısıtılma noktasındaki doyum rejimi başlangıcı.....	38
Şekil 3.12. Transistörün doyum (saturation) bölgesi. ....	39
Şekil 3.13. N kanal organik alan etkili transistörün akım gerilim eğrileri.....	40
Şekil 3.14. Gebze Üniversitesi'nde kullanılan vakum buharlaştırma cihazı. ....	44
Şekil 3.15. Döndürme kaplama yöntemi ile oluşturulan ince film numuneleri. ....	46
Şekil 4.1. 3-(undesiloksi)ftalonitril'in kimyasal yapısı.....	49
Şekil 4.2. CoPc'nin kimyasal yapısı. ....	50
Şekil 4.3. CoPc'nin farklı konsantrasyonlarda soğurma spektrumu.....	50
Şekil 4.4. SiO <sub>2</sub> /CoPc tabanlı OFET için ortak geometrik üst kontak şeması ....	51
Şekil 4.5. Keithley 2612A cihazı. ....	52
Şekil 5.1. CoPc'nin, UV spektrofotometresine karşı dalgaboyu soğurum grafiği. ....	53
Şekil 5.2. $I_{DS}$ - $V_{DS}$ negatif çıkış eğrilerine bağlı SiO <sub>2</sub> /CoPc tabanlı OFET'in farklı $V_{GS}$ potansiyelleri.....	54
Şekil 5.3. SiO <sub>2</sub> /CoPc tabanlı OFET' in $I_{DS}$ - $V_{GS}$ ve $(I_{DS})^{(1/2)}$ - $V_{GS}$ karakteristik eğimi ( $V_{DS} = -3$ ). ....	55
Şekil 5.4. CoPc tabanlı OFET cihazının (a) Yüzeyden (b) Kesitten alınan SEM görüntüleri. ....	56
Şekil 5.5. CoPc OFET'in yüzeyden alınan EDAX analizi.....	56

## TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1. İlk beş poliasen'in ana absorpsiyon piklerinin dalga boyları ile birlikte molekül yapıları .....	15
Tablo 2.2. Literatürde olan ve OFET'lerde ölçülen mobilite değerleri .....	19

## ÖZET

Anahtar kelimeler: OTFT, OFET, kobalt ftalosiyenin, SiO<sub>2</sub>, kompozit yarıiletken, mobilite

Yeni sentez kobalt ftalosiyenin (CoPc) tabanlı organik alan etkili transistör (OFET) ve organik ince film transistör (OTFT) dielektrik materyal kapı olarak SiO<sub>2</sub> ile oluşturuldu. 1-Dodecanol parçasını içeren yeni sentez kobalt ftalosiyenin <sup>1</sup>H NMR, FT-IR, MALDI-TOF/MS, UV-Vis spektral ve termal analiz yöntemleriyle karakterize edildi. Sonrasında kompozit yarıiletken materyal ve yeni sentez CoPc tabakalı OTFT'nin elektriksel karakterizasyonu incelendi. Termal buharlaştırma yöntemiyle cihazın kaynak ve savak kısmı için Ag, kapı kısmı için de Au kaplandı. CoPc tabaka spin kaplama metoduyla hazırlandı. Yapılan ölçümler sonucunda CoPc OTFT'nin doygunluğu (  $\mu_{FET}$  )  $2,01 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$  mertebesinde olduğu görüldü. Ayrıca cihazın  $I_{on}/I_{off}$  ve  $V_T$  değerleri sırasıyla  $2 \times 10^2$  ve -2,25 V olarak hesaplandı. Sonuç olarak yapılan çalışma bize yeni sentez CoPc'nin OTFT üzerinde kayda değer bir performansa sahip olduğunu göstermiştir.

# FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF THE OFET BASED ON NOVEL COBALT PHTHALOCYANINE CONTAINING ALKYL CHAIN

## SUMMARY

Keywords: OTFT, OFET, cobalt phthalocyanine, SiO<sub>2</sub>, composite semiconductor, mobility

An organic thin film transistor (OTFT) and organic field effect transistor (OFET), based on novel cobalt phthalocyanine (CoPc) was fabricated with SiO<sub>2</sub> as the gate dielectric material. Novel alpha-substituted cobalt phthalocyanine bearing 1-Dodecanol moiety has been characterized by <sup>1</sup>H NMR, FT-IR, MALDI-TOF/MS, UV-Vis spectral and thermal analysis. Subsequently, the electrical characterization of the composite semiconductor material and the new synthesized CoPc layered OTFT was investigated. Au were deposited for gate and Ag were deposited for source and drain contacts of the device by using thermal evaporation method. CoPc layer was prepared with spin coater method. The CoPc OTFT exhibited saturation at the order of  $\mu_{\text{FET}}$  of  $2,01 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ .  $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$  and  $V_{\text{T}}$  of this device were calculated  $2 \times 10^2$  and -2,25 V, respectively. The result of this study shows us that the new synthesis CoPc has a remarkable performance on OTFT.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Bilim ve teknolojiye yakın geleceğe yön verecek nanoteknoloji, endüstri toplumlarının bilgi toplumlarına dönüşümünde en önemli rolü üstlenmiştir. Günümüzde nanoteknoloji, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde teknolojik bir yarışa dönüşmüştür. Hızla gelişen teknoloji ile birlikte elektronikte kullanılan malzemeler hızla küçülmüş ve küçülmeye devam etmektedir. Hızla gelişmekte olan teknolojiye, inorganik malzemelerin yerini üretim süreçlerindeki kolaylıktan ve oldukça düşük maliyetlerden dolayı organik malzemeler almıştır.

2000'de Nobel Kimya Ödülü'nü getiren iletken polimerler [1] ile bunların yalıtkan ve metal arasındaki bölgeye katkılanabildiklerinin keşfedilmesiyle organik elektronik üzerine yoğun çalışmalar günümüze kadar oldukça artmıştır. 1980'li yıllarda organik güneş pili [2], ışık yayan diyot [3] ve alan etkili transistörler [4] yapılmaya başlamıştır. Bu aygıtlara hem akademik dünyada hem de endüstride artarak devam eden ilgi sonucu, organik aygıtlar ve bunlardan organik alan etkili transistörler (OFET) piyasada uygulama alanları bulmuş ve hala kullanılmaktadır. 1930 yılında alan etkili transistör ilk defa Lilienfeld tarafından bulunmuştur [5]. Genel olarak alan etkili transistör, kaynak (source) ve savak (drain) adı verilen iki omik kontak arasında oluşturulan iletken kanallı bir levha olarak tanımlanan bir kapasitördür. Kanal içindeki yük taşıyıcılarının yoğunluğu, kapı (gate) elektrotu denilen ikinci bir kapasitör levhaya voltaj uygulanması ile ayarlanır. Kahng ve Atala tarafından 1960 yılında ilk defa silikon tabanlı metal oksit yarıiletken alan etkili transistör (MOSFET) üretilmiştir [6]. Günümüzde MOSFET teknolojisi, modern mikroelektronik teknolojisinin bütünleşik devre teknolojisi alanında en önemli bileşenlerinden birini oluşturmaktadır.

1970'li yıllara kadar kabul edilen görüş, organik materyallerin elektriksel özelliğe sahip olmadıkları, yalnızca yalıtkan materyal olarak geniş kullanım alanlarına sahip

oldukları yönündeydi. İlk olarak A. J. Heeger polietilen moleküllerinin doping işlemi yardımıyla iyi bir iletkene dönüştürülmesini başarmıştır [7]. Bu önemli olaydan itibaren, iletken polimer teknolojisi araştırma alanlarında ve çeşitli endüstrilerde gelişmektedir. Konjuge polimerler, oligomerler ve diğer molekülleri içeren organik yarıiletken çalışmaları, organik alan etkili transistör teknolojisinin gelişimine büyük katkı sağlamıştır.

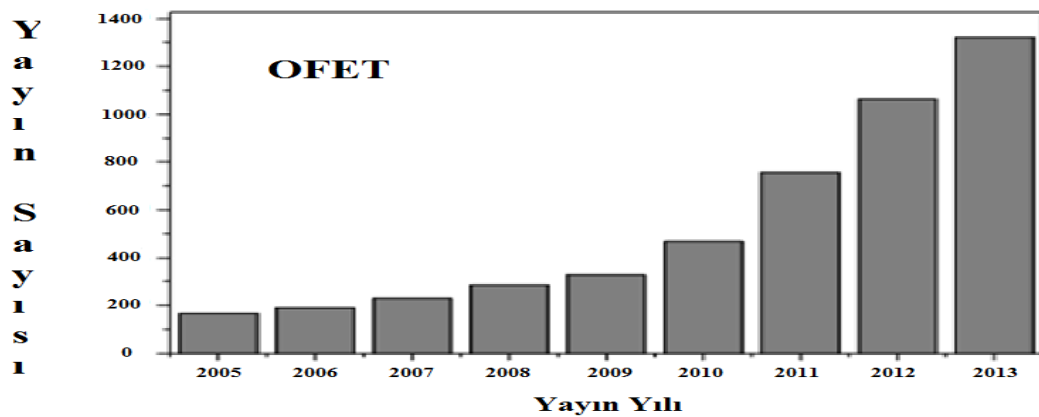
1987 yılında tanımlanan organik alan etkili transistörler (OFET), modern mikro elektronik sektörünün en önemli bölümlerinden biri olmuştur. 1986'da yeterli sayılabilecek düzeyde akım kazancı olan politiyofen (PT) tabanlı ilk OFET geliştirilmiştir [8]. Organik alan etkili transistörlerin bilinen silikon tabanlı transistörlere nazaran birçok avantajları vardır. Bu avantajların başlıcaları; düşük maliyetli üretimleri, üretim çeşitliliğine sahip olmaları ve esnek yüzeylerde kullanılabilmesidir [9]. Organik ince film elektroniği teknolojisi, son on yıl içerisinde organik ince film transistörlerinin ilk örnekleri olarak, radyo frekans tanımlayıcısı ve organik bütünleşmiş devreleri uygulama alanlarında gelişmekte olan bir teknolojidir [10]. Organik ince film transistörler, organik entegre devre tasarımlarında ve polimer devre tasarımlarında ticari olarak uygulama alanına sahiptirler.

Günümüzde de akademinin ve sanayinin araştırma merkezlerinde organik aygıtların farklı konfigürasyonlarını araştırmak için birçok programlar oluşturulmuştur. OFET'in çalışmasında etkili olan birçok parametre vardır. Daha iyi bir cihaz elde edebilmek için bu parametreler değiştirilerek çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Üretilen OFET'lerde organik malzemelerdeki, iletkenlik [11], metal organik yarıiletken arayüzeyi, metal organik yalıtkan arayüzeyi ya da organik yarıiletken, organik yalıtkan arayüzeyindeki [12] temel mekanizmalar araştırılmış ve çeşitli arayüzey çalışmaları yapılmıştır. Bazen de üretim tekniklerinde vakum tabanlı ince film sistemleri ya da standart litografi teknikleri gibi farklı yöntemler [13] denenerek hedefe yönelik ucuz ve esnekliğe dayalı cihazlar elde edilmiştir. Melez OFET çalışmaları da denenmektedir. Ayrıca simülasyon çalışmaları [14] ve deneylerden elde edilen sonuçlarla kıyaslamalar da yapılmaktadır.



Organik alan etkili transistörlerde, silisyum ve germanyum gibi tek kristal inorganik yarıiletken tabanlı alan etkili transistörlerle karşılaştırıldığında, elde edilen yük taşıyıcı mobilite değeri çok düşüktür. Buna karşın son yıllarda yapılan çalışmalar sonucu rubrene tek kristal tabanlı organik alan etkili transistörlerde  $15,4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  mobilite değeri elde edilmiş olup, bu mobilite değeri ile amorf silikon tabanlı transistörlerin mobilite değerlerine ulaşılmıştır [15]. Ayrıca, inorganik transistörlerdeki gelişim hızla limit değerlere doğru gitmekte, ileri teknolojik uygulamalar açısından organik alan etkili transistörler geliştirmekte olan mükemmel bir potansiyel oluşturmaktadır. Günümüzde organik transistörler amorf silikon tabanlı alan etkili transistörlerle yarışabilmektedir.

Organik tabanlı transistörlerin getireceği en önemli yenilikler esnek ve ucuz olması olarak özetlenebilir. Ucuzluk, belki de küçük veya orta ölçekli sanayicilerin de bu alanda üretim yapabilmesini sağlayacaktır. Esneklik ise yepyeni özelliklere sahip yaşamı kolaylaştıran elektronik ürünler olarak karşımıza çıkabilecektir. Belirtilen başlıca avantajlarından dolayı organik alan etkili transistörler son yıllarda nano teknolojik uygulamalarda önemli bir yere sahiptir. Son yıllarda organik ve polimer transistörler üzerine yayınlanan makale ve araştırma sayısında büyük bir artış görülmüştür (Şekil 1.1.).



Şekil 1.1. Organik ve polimer yapıları alan etkili transistörler üzerine yayınlanan makale sayısı (Institute for scientific information web of science)

## **BÖLÜM 2. YARIİLETKENLER**

### **2.1. Yarıiletken ve Özellikleri**

Sözlükte bir yarıiletken "Elektriksel iletkenliği bir yalıtkan ile bir iletkenin elektriksel iletkenlikleri arasında olan, metal olmayan katıdır." şeklinde tanımlanır. Kelimenin ilk çıkış noktası 1911 tarihidir [16]. O tarihte katının elektriksel iletkenliği tam olarak bilinmiyordu. Klasik fizik metallerin iletkenliklerini tanımlayabiliyordu, ancak bu tanımlama metal olmayan katı malzemelerin (silikon ve benzerleri, oksitler ve sülfatlar) anormal davranışlarını açıklayamıyordu. Sıcaklık ile iletkenliğin doğru orantılı olması, fotoiletkenlik, rektifikasyon ve fotovoltaj etkiler gibi etkilerin gözlemlendiği bu anormal malzemeler için "yarıiletkenler" tabiri kullanılmaya başlandı. Bu anormallikler ancak kuantum mekaniğinin ilerlemesi ve takiben katıların band teorisinin geliştirilmesi ile açıklanabilmiştir [17].

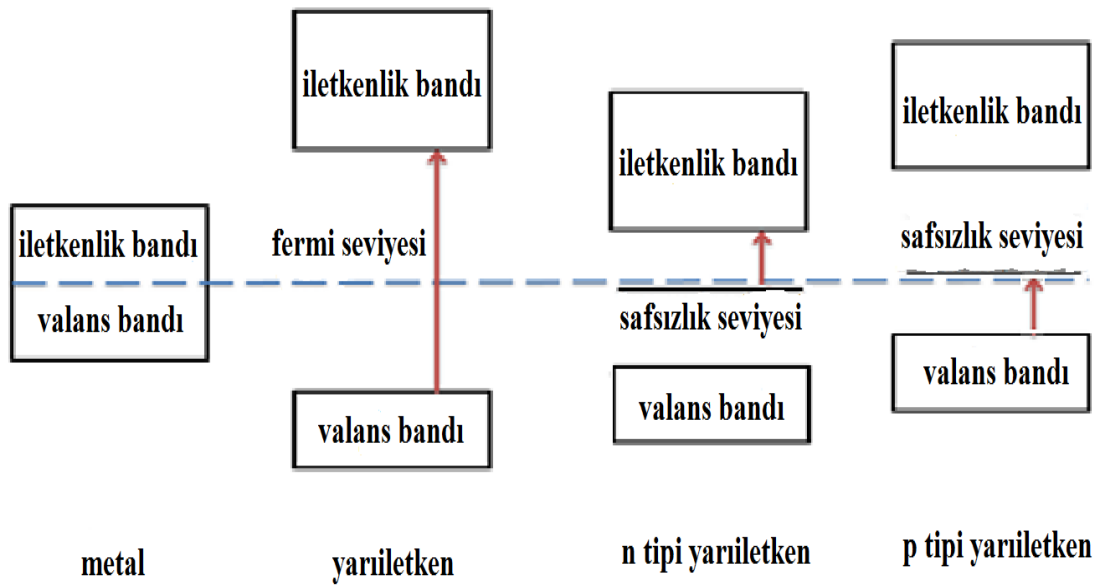
Yarıiletkenlerin modern bir sözlükteki tanımı: "Bir yarıiletken çok düşük sıcaklıklarda bir yalıtandır, fakat onun oda sıcaklığında yüksek bir elektriksel iletkenliği vardır. Bir yalıtkan ile bir yarıiletken arasındaki fark çok iyi tanımlanamaz, ancak kabaca bir yarıiletken yeterince düşük band aralığına sahip bir yalıtandır ve iletkenlik bandı oda sıcaklığında yeteri kadar doludur." [18].

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

Yukarıdaki tanımlamalar aslında kendiliğinden (intrinsic) yarıiletkenler için geçerlidir. Yarıiletkenleri elektronikte bu kadar kullanışlı yapan özellik, bu malzemelerin elektronik özelliklerinin düzgün seçilen, az miktardaki safsızlık

katkılanması ile kontrollü bir şekilde değiştirilebilmesidir. Bu sürece katkılama süreci denir; katkılanan yarıiletkenlere de dış kaynaklı (extrinsic) yarıiletkenler denir.

Kendiliğinden ve dış kaynaklı yarıiletkenler arasındaki fark metallerin, yalıtkanların ve yarıiletkenlerin enerji diyagramları Şekil 2.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Bir metalin, bir yalıtkanın ve bir katkılı yarıiletkenin enerji diyagramları [19]

Teori, iletkenlik bandı kısmen dolu olan metal ile valans bandı dolu, iletkenlik bandı tamamen boş olan yalıtkan arasındaki farkı açıklar. Bir yalıtkan ancak ve ancak  $T = 0$  K' de tamamen yalıtmandır. Sıcaklık artar artmaz, elektronlar valans bandından iletkenlik bandına termal olarak 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.

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 yarıiletkenlere p tipi yarıiletken, iletkenlik bandının alçaltıldığı yarıiletkenlere ise n tipi yarıiletken denir. P tipi yarıiletkende boşluk konsantrasyonu, n tipi yarıiletkende ise elektron konsantrasyonu daha fazladır.

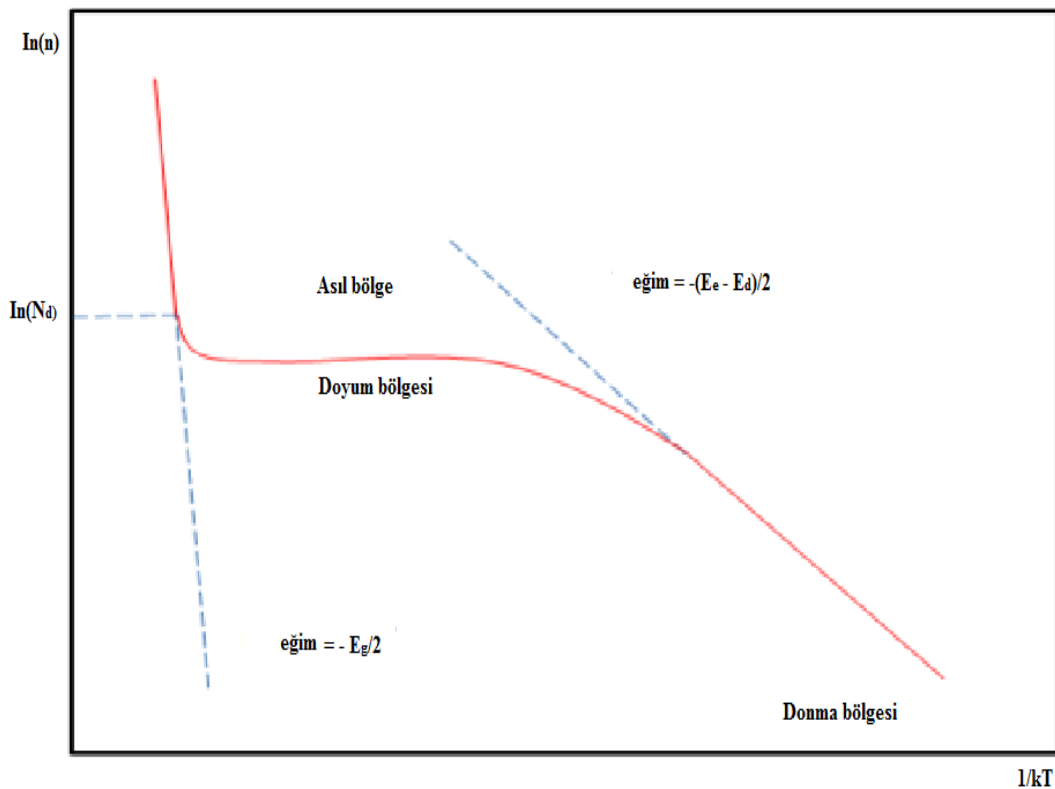
Günümüz teknolojisinde güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirmede yarıiletkenlerden çok fazla faydalanılmaktadır. Çünkü güneşten gelen fotonlar, yarıiletken malzemelerin atomik yapısında bulunan zayıf moleküler bağları kırarak elektronların serbest kalmalarını sağlarlar ve böylece bu serbest elektronlar yarıiletken malzemede elektron akışını sağlamış olurlar. Günümüzde kullanılan bazı saatler ve hesap makineleri, bu yapı ile çalışmaktadır.

Yarıiletkenler 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 yarıiletkenler 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 dış kaynaklı yarıiletken malzemeler denir.

Bir yarıiletkeni katkılamak, o yarıiletkenin valans bandının (p tipi katkılama) veya iletkenlik bandının (n tipi katkılama) kenarlarına yakın yerel (lokalize) enerji seviyeleri oluşturmaktır. Böylece, bir elektronu iletkenlik bandına indüklemek için gerekli enerji termal enerji ile kıyaslanabilir seviyeye düşürülür.

Doplanmış (dış kaynaklı) tipik bir yarıiletkenin iletkenliğinin sıcaklık bağımlılığı Şekil 2.2.'de gösterilmiştir. Eğri üç farklı bölgeyi içerir. Yüksek sıcaklıklarda kendiliğinden bölge termal aktifleşmiş davranış ile karakterize edilir. Ara bölgeye doyum bölgesi denir. Bu bölgede iletkenlik pratik olarak sıcaklıktan bağımsızdır. Son bölge düşük sıcaklıklarda yük taşıyıcılarının hareketsiz olduğu bölgedir. Elektronik cihazlar için önemli olan bölge yük taşıyıcı yoğunluğunun katkılamaya eşit olduğu bölge olan doyum bölgesidir.

Bu aşamada not edilmesi gereken ana unsur katkılamanın yüksek saflıkta olması gerektiğidir. Aslında mikroelektronikte kullanılan silikon ve diğer birkaç bileşik haricinde, birçok yarıiletken eşit miktarda n tipi ve p tipi katkı safsızlıkları içerir; kompanse malzeme olarak adlandırılan bu malzemeler kendiliğinden yarıiletken gibi davranırlar. Hemen hemen bütün organik yarıiletkenler bu kategoridedir. Özellikle, organik yarıiletkenlerdeki katkılama etkileri yüksek yoğunluklu katkılama görülebilir. Bu seviyelerde katkılanmış organik yarıiletkenler yarıiletkenden çok iletkenler ve elektronik cihaz yapmak için uygun değildir.



Şekil 2.2. Katkılı bir yarıiletkenin iletkenliğinin sıcaklık bağımlılığının Arrhenius eğrisi [19]

## 2.2. Yarıiletken İnce Filmler

Yarıiletken ince film 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 [20].

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 [21].

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 [22].

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,

fotovoltaik araçlar ve elektrokronik 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 [23].

Yarıiletken malzemelerin nano boyutlarda olmasının önemli bir özelliği, yarıiletkenin sahip olduğu değerlik bandının ( $E_g$ ) değerinde artış gözlemlenirken, yarıiletkenin nano kristal yapısının çapında azalma gözlenmesidir [24].

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 [25].

### **2.3. Organik Yarıiletkenler**

Organik kimya içerisinde sınıflandırılan kimyasalların büyük çoğunluğu, genelde elektriksel yalıtkanlıkları bakımından önemli rol oynarlar. Son yıllarda, uygun elektriksel karakteristikler sergileyen organik bileşikler keşfedildi [26,27]. Organik yarıiletkenler terimi, önemli bir ölçüde karbon-karbon (C-C) bağımlı organik katıların tanımlanmasında kullanılır, fakat bazen elektron iletim kabiliyeti de sergilemektedirler [28]. Bütün tanımlamalarda ortak ayırt edici faktör, materyal

karakteristiği olarak elektriksel özdirenç özelliğinin olmasıdır. Organik yarıiletkenler, metallerin ve yalıtkanların arasında elektronik iletkenlikleri sergileyen ve genelde iletkenlikleri metallerin ve yalıtkanların arasında olan malzemelerdir. Organik yarıiletkenler, karbon ve hidrojen atomlarından meydana geldikleri için organik yarıiletkenler olarak adlandırılır. Organik yarıiletkenlerin elektriksel iletkenliği, sıcaklıkla üssel bir artış göstermektedir. İletkenlik mekanizmaları, yarıiletkenlerin iletkenlik mekanizmalarına benzemektedir.

20. yüzyılın ortalarına doğru, transistörlerin icadı ile Si ve Ge gibi inorganik yarıiletkenler önceki yaygın metallere daha çok, elektroniklerde baskın bir rol oynadılar. Aynı zamanda, 20. yüzyılın sonunda katıhal malzemelerine bağlı vakum tüplü elektroniklerin yerine, günlük yaşamımızdaki yarıiletken mikroelektroniklerin bulunduğu elektronikler gelişti. 21. yüzyılın başlarında ise, materyallerin yeni bir sınıfının anlaşılmasını ve gelişmesine sebep olan gelişmeleri mümkün kılan ve çoğunlukla organik yarıiletkenler olarak bilinen yeni bir elektronik devir ile karşı karşıyayız. Tam manasıyla organik yarıiletkenlerin konuşulması yeni değildir. Antrasen kristallerinin (bir protip organik yarıiletken) karanlık ve fotoiletkenliğinin ilk çalışılması, 20. yüzyılın başlarına dayanmaktadır [29].

Organik yarıiletkenler bahsi tamamen yeni değildir. Antrasen kristalinin [30] fotoiletkenliği üzerindeki çalışmalar 20. yüzyılın başlarına kadar uzanır [29,31]. Daha sonraları, 1960'larda, elektrolüminesansın keşfi ile moleküler kristaller bilim adamları tarafından daha derin şekilde araştırılmıştır. Bu araştırmalar yük taşıyıcı iletimi ve optiksel uyarımları içeren temel süreçleri kapsamaktadır [32,33].

1970'lerde, konjüge polimerlerin başarılı sentezi ve kontrollü katkılanması ile ikinci önemli organik yarıiletken türü elde edilmiştir [1]. Organik fotoiletkenler (doplanmış polimerler) ile birlikte bu iletken polimerler elektrofotolitografide fotoreseptör veya iletken kaplama olarak kullanılmaya başlanmıştır [34].

1980 de konjüge polimerler ve oligomerlerden ince film transistörlerin ilk başarılı üretimiyle ve p ve n iletken materyalleri [2] ile verimli bir organik hetero-eklem



fotovoltaik pilinin yapısından dolayı, katkısız organik yarıiletkenlere olan ilgi giderek artmaktadır. Son yıllarda, hem akademik hem de endüstriyel araştırma laboratuvarlarındaki büyük çabalardan dolayı, organik ışık yayan diyotlar hızla gelişti ve aynı zamanda ilk ticari OLED'lerin üretilmesine sebep oldu. Organik alan etkili transistörler veya organik fotovoltaik pil (OPVC)ler gibi organik yarıiletkenlerin diğer uygulamalarında da yakın gelecekte daha da geliştirileceği umulmaktadır.

Organik yarıiletkenlerin başlıca iki sınıfı vardır. Bunlar: düşük moleküler ağırlıklı materyaller ve polimerlerdir. Her ikisi de moleküllerinde  $sp^2$  hibritleşmesi olan C-atomlarının pz –orbitalleri ile oluşan ortak bir konjuge  $\pi$ -elektron sistemine sahiptir. Moleküllerin  $\pi$  ve  $\sigma$ -bağlarının görünümü, her ne kadar benzerde olsa,  $\pi$ -bağı daha zayıftır. Böylece, konjuge moleküllerin en düşük elektronik uyarılmaları, görünür spektral aralıkta ışık soğrulmasına veya emisyonuna sebep olan bir 1,5 ve 3 eV enerji bant aralığı ile uyarılan  $\pi$ - $\pi^*$  geçişleridir. Materyallerin bu iki sınıfı arasındaki önemli bir fark, ince filmlerinin oluşmasının farklı oluşudur. Organik yarıiletkenlerdeki bantların yapısı temel olarak inorganik yarıiletkenlerinkinden farklıdır[35].

Konjuge organik malzemeler, ince film elektroniğinde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Son zamanlarda, organik yarıiletkenler ve onların türevleri kullanılarak, Schottky diyotlar ve organik alan etkili transistör gibi yapılar hazırlanmakta ve elektronik karakterizasyonları yapılmaktadır. Organik yarıiletkenler, elektronik malzemelerde aktif bileşenler olarak kullanılabilir ve bu malzemeler, kolay üretilirliği, düşük maliyet ve geniş alan malzeme karakterizasyonundan dolayı olası avantajlara sahiptir. Bu durum, organik malzemeler ile inorganik malzemelerin yer değiştirmesine yeni bir olanak sağlamaktadır. Çoğu organik malzemeler, akım taşıyıcıları olarak boşluklar ile p tipi yarıiletkenlerdir [36].

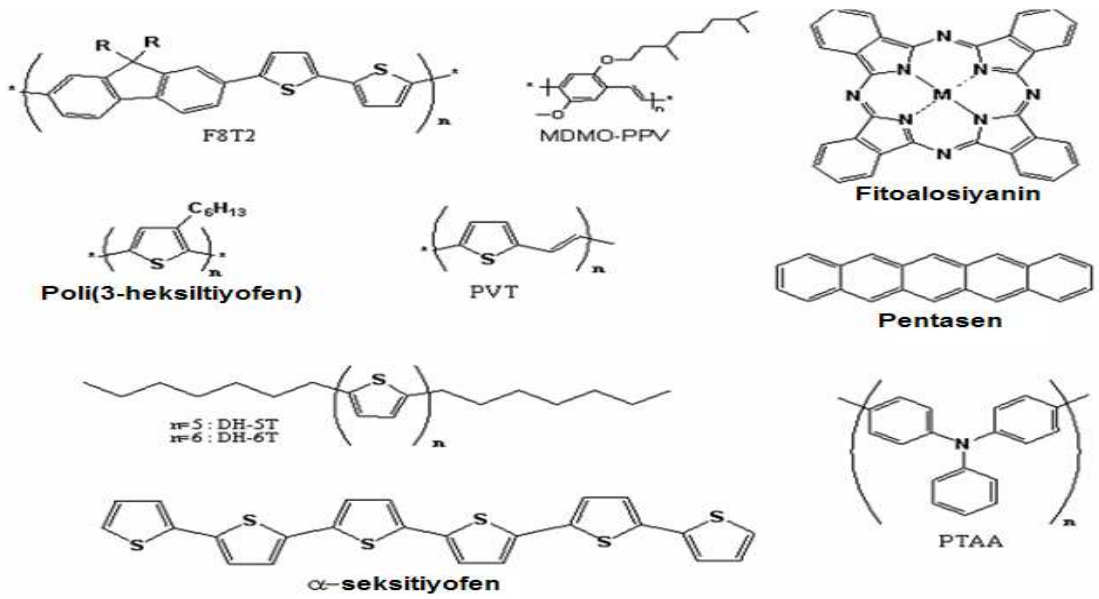
Transistör teknolojisinde, pentasen bileşiği bu alanda kullanılan p tipi yarıiletkenlerden ilkidir. Yarıiletkenlerde elektrik iletkenliği başka elementler katkılanarak değiştirilebilir. N tipi ve p tipi denilen iki tip katkılama vardır. Elektrik iletkenliği, sadece negatif yüklü elektronlarla değil; aynı zamanda pozitif yüklü boşluklarla da ilgilidir. Metallerden farklı ama yalıtkanlarla ortak olan özelliği ise,

yariletkenlerde değerlik bandı ile iletkenlik bandı arasında bir enerji aralığı vardır. Bu enerji aralığı yalıtkanlarda 5 eV'den fazla iken, yariletkenlerde 1,5 eV dolaylarındadır. Yariletkenlerin iletkenlikleri sıcaklık ve manyetik alana da duyarlıdır. Organik yariletkenlerin rezistansı inorganik yariletkenlerden daha fazladır, hatta neredeyse yalıtkanlar kadar yüksektir. Maliyetleri inorganik yariletkenlere göre daha düşüktür. Esnek altlıkların üzerine bile ince bir film tabakası şeklinde yerleştirilebilir. Polimer elektroniği, iletken polimerlerin 1977 de keşfedilmesinden beri çok hızlı bir şekilde gelişmektedir. İletken polimerler, ışık yayan diyotlar, alan etkili transistörler ve fotodiyotlar gibi birkaç optoelektronik malzemelerde aktif bir malzeme olarak kullanılmaktadırlar [37].

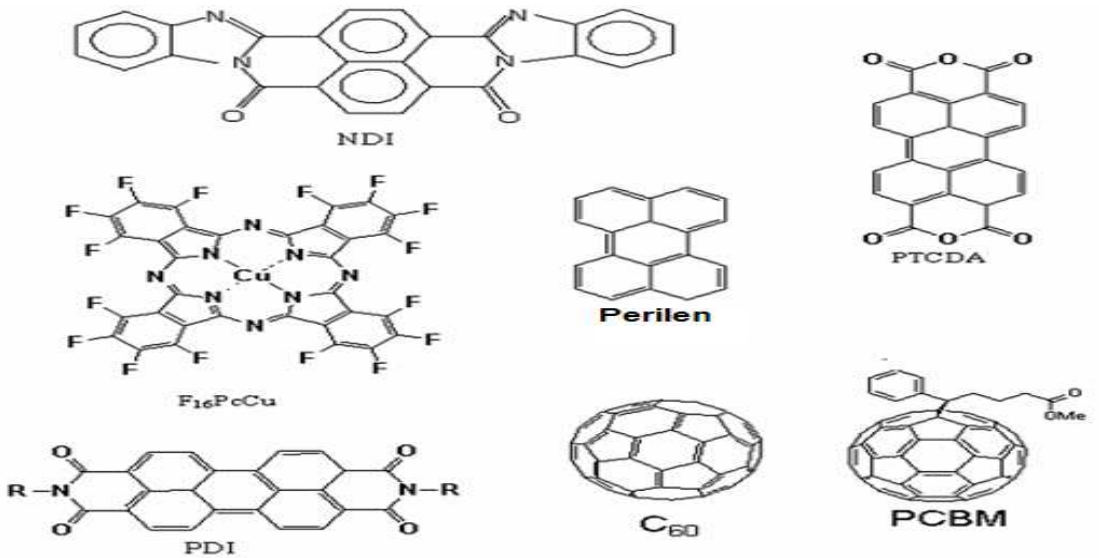
1987 deki ilk rapordan beri, OFET'lerin verimi hızla gelişmektedir. Son yıllarda, çok somut gelişmeler görülmektedir ve OFET'ler, şimdilerde amorf silisyum malzemeleri gibi diğer ince film transistörler ile yarışmaktadırlar. Özellikle kaliteli filmlerin üretilmesinden dolayı, gelişmeler sağlanmış ve böylece küçük moleküller malzemeler polimerlerden daha çok önem kazanmıştır. OFET'ler de, alan etkili mobilite ve açma kapama akım oranı birincil öneme sahiptir. MOSFET'lerin açma kapama oranları,  $10^9$  mertebesindeyken, Si:H TFT'ler de bu oran,  $10^6$  civarlarındadır. Yüksek mobilitenin yüksek akımlarda sağlandığı, dolayısıyla yüksek açma kapama oranı elde edildiği görülmektedir [38].

Son zamanlarda, organik yariletken malzemeler içerisinde, polimerler ve  $\pi$ -konjuge organik oligomerler önemli bir araştırma konusu oluşturmaktadır. Organik yariletken malzemeler, p tipi veya n tipi gibi farklı yük taşıyıcı özelliklerine sahiptir. P tipi malzemeler, düşük iyonlaşma potansiyel değerlerine sahip ve n tipi malzemeler ise yüksek elektron ilgilerine sahiplerdir. Çoğunluk taşıyıcıları boşluklar olan yariletkenler p tipi ve çoğunluk taşıyıcıları elektronlar olan yariletkenler n tipi yariletken olarak adlandırılmaktadır. OFET'lerin hazırlanmasında kullanılan n tipi yariletken malzemelere göre, p tipi organik yariletken malzemelerin havaya karşı daha kararlı olması ve daha yüksek mobiliteye sahip olduklarından organik yariletken malzemeler içerisinde, p tipi organik yariletkenler daha çok kullanılmaktadır.

N tipi organik yarıiletken malzemelerin birçoğu, yapısında bulunan su ve oksijen ile reaksiyona giren organik anyonlar ve birtakım karbanyonlardan dolayı p tipi organik yarıiletken malzemelere göre havaya karşı daha hassas olup [39], n tipi organik yarıiletken malzemelere göre, p tipi organik yarıiletken malzemelerin alan etkili mobiliteleri daha yüksektir. Böylece, organik yarıiletkenlerin yük taşıma taşıyıcılarına göre, transistörler n tipi veya p tipi olarak tanımlanır. Şekil 2.3. ve Şekil 2.4.'de sırasıyla, organik alan etkili transistörlerde kullanılan p tipi ve n tipi organik yarıiletken malzemelerin kimyasal yapıları gösterilmektedir.



Şekil 2.3. OFET'lerde kullanılan başlıca p tipi organik yarıiletken malzemelerin kimyasal yapıları [38]



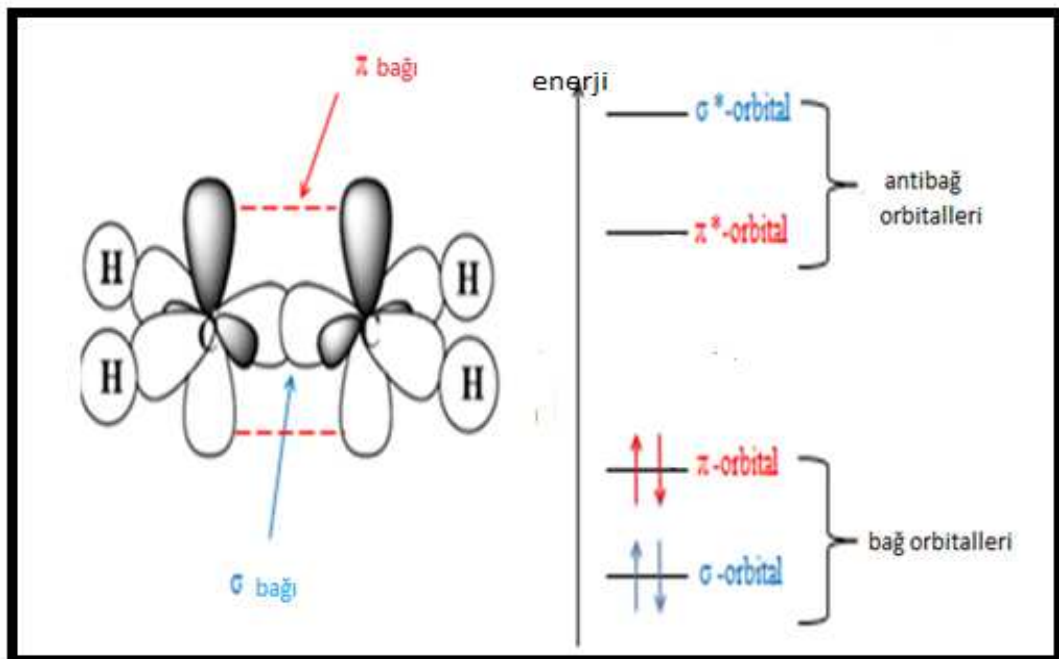
Şekil 2.4. OFET'lerde kullanılan başlıca n tipi organik yarıiletken malzemelerin kimyasal yapıları [38]

## 2.4. Organik Yarıiletken Malzemeler

Organik yarıiletkenlerin 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 Pz orbitalleri tarafından oluşturulmuş konjüge  $\pi$ -elektron sistemleri vardır (Şekil 2.5.).


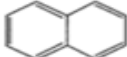
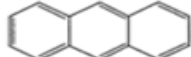

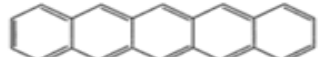
Tablo 2.1.'de görüldüğü gibi polyacene grubunun enerji aralığının molekül içindeki konjügasyon derecesiyle kontrolü sağlanabilir. Böylece organik yarıiletken malzemelerin optoelektronik özelliklerinin değiştirilebilmesi için geniş imkânlar elde edilmiş olur. Aşağıdaki Şekil 2.6.'da bazı prototip malzemeler gösterilmiştir.

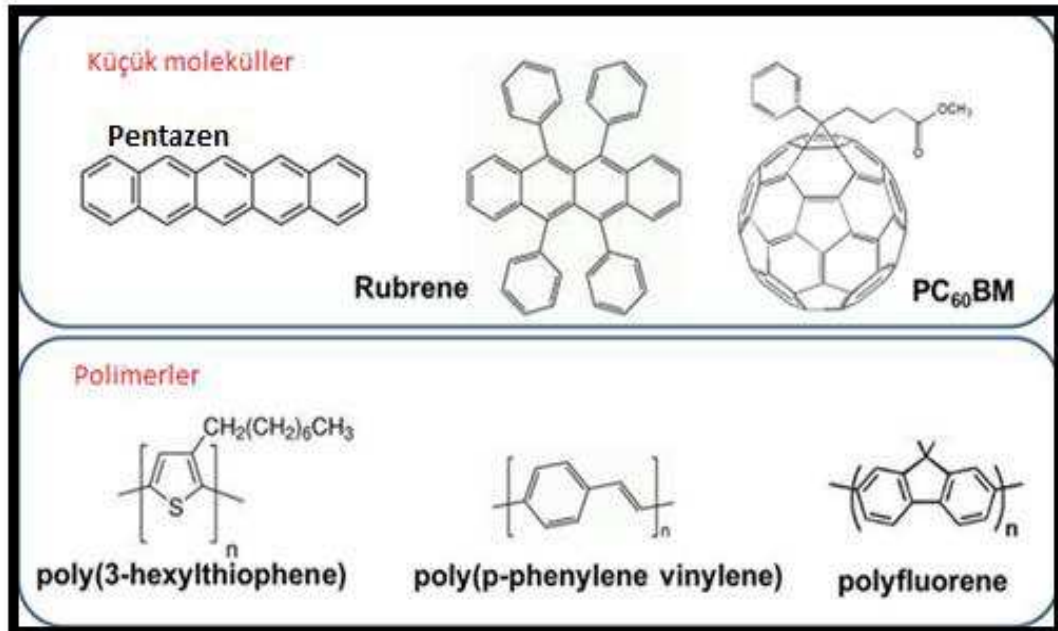
Organik yarıiletkenleri ince film şeklinde kullanabilmek için iki ayrı sınıfa ayırdığımız konjüge polimerler ve küçük ağırlıklı moleküllere uygulanacak yöntemler farklıdır. Konjüge polimerler döndürerek kaplama (spin coating) veya baskı (print) teknikleri gibi teknikler ile kaplanabilirler. Küçük moleküller 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 2.5. En basit konjüge  $\pi$ -elektron sistemi olan ethene molekülünün  $\sigma$  ve  $\pi$  bağları (sol) ve  $\pi$ -konjüge molekülün enerji seviyeleri (sağ)

Tablo 2.1. İlk beş poliasen'in 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 2.6. Bazı prototip organik yarıiletkenlerin moleküler yapıları

Günümüzde,  $\pi$ -konjuge organik oligomerler ve polimerler organik yarıiletken malzemeler içerisinde önemli bir araştırma konusu oluştururlar. Farklı yük taşıyıcı özelliği olarak, organik yarıiletken materyaller ya p tipi ya da n tipi taşıyıcı özelliğine sahiptir. P tipi yarıiletken yapılarında çoğunluk taşıyıcıları boşluklar, n tipi yarıiletken yapılarında çoğunluk taşıyıcıları elektronlar olarak tanımlanır. Bundan dolayı transistörler p tipi veya n tipi olarak adlandırılır. N tipi ve p tipi materyaller sırasıyla yüksek elektron ilgileri ve düşük iyonlaşma potansiyel değerleri olarak tanımlanır. Buna karşın, organik yarıiletken materyaller içerisinde şimdiye kadar daha çok p tipi olanların üzerine araştırmalar yapılmıştır.

### 2.4.1. Politiyofenler

Politiyofen yapılara eklenen alkil zincirler çözünürlüğü arttırmasına rağmen, alkil eklenen taraf yalıtkan özellik gösterir. Eklenen zincir boyunun artmasıyla birlikte poli(3-butiltiyofen) ve poli(3-desiltiyofen) alan etkili transistör yapılarının mobilite değerlerinde büyük ölçüde düşüşler meydana gelmiştir [40]. Poli(3-hekziltiyofen) ince filminden elde edilen mikro kristal yapı ile yüksek yük taşıyıcı mobiliteye ulaşılmıştır. Bu yapının iyonlaşma potansiyeli (yaklaşık 4,9-5,0 eV) altın gibi havada kararlı birçok omik kontak için uygun değerler ihtiva eder. P<sub>3</sub>HT alan etkili transistör yapıları, yüksek değerli mobilite değeri ve açma/kapama (on/off) oranına sahip olmasından dolayı, polimer optoelektronik uygulama devrelerinde kullanım alanına sahiptir [41]. Poli(2-hidroksietil metakrilat) yalıtkanı gibi küçük yüzey pürüzlülüğüne sahip uygun yalıtkan tabaka ile kullanılan poli(3-hekziltiyofen) OFET'lerin mobilite değerinde artma gözlenmiştir [42]. Politiyofen tabanlı transistörlerde en yüksek mobilite değeri kloroform çözücüsü kullanılarak elde edilmiştir [9]. Poli(3-hekziltiyofen) konjuge polimer kullanılarak elde edilen en yüksek boşluk mobilite değeri 0,1 cm<sup>2</sup>/Vs civarlarındadır [43].

### 2.4.2. Poliflorenler

Poliflorenler, birçok organik çözücüde tamamen çözünebilmektedirler. Moleküllerin bozulma sıcaklığı 400 derecenin üzerindedir. Bu nedenlerden dolayı basit üretim teknikleri ile (spin coating vb.) düzgün bir film oluşturulabilirler. Florenlerin, elektron mobilite değerleri yüksektir. Poli(9,9-dioktilfloren) için 10<sup>-3</sup> ile 10<sup>-2</sup> cm<sup>2</sup>/Vs ve F<sub>8</sub>T<sub>2</sub> için 6.10<sup>3</sup> cm<sup>2</sup>/Vs mobilite değerleri elde edilmiştir [44]. Salleo ve arkadaşları bu tip materyallerin yalıtkan yüzey üzerindeki kimyasal değişim etkileri üzerinde çalışmalar yapmışlardır [45].

### 2.4.3. Çeşitli konjuge yapıdaki moleküller

Belirli bir çözücü içerisinde çözülebilen polimer materyallere alternatif olarak kullanılan küçük moleküllü organik yarıiletken materyaller, ya bir çözücüde çözülerek

ya da belli bir sıcaklık altında buharlaştırma (süblimleşme) yöntemi kullanılarak istenilen şekilde bir ince film tabaka oluşturulabilirler. Bu çeşit buharlaştırma yöntemi kullanarak üretilen materyallere en iyi örnek beş benzen zincirine sahip aromatik bir birleşik olan pentasen materyalidir.

Pentasen, organik alan etkili transistörlerde p tipi organik yarıiletken olarak en yaygın kullanım alanına sahip bir materyaldir. Polimerik yalıtkan kullanılarak elde edilen pentasen organik transistörlerdeki en yüksek mobilite değeri  $3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  [46] ve kimyasal olarak değiştirilen  $\text{SiO}_2$  tabaka üzerine oluşturulan pentasen organik transistörden elde edilen en yüksek mobilite değeri  $6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  olarak tespit edilmiştir [47]. N tipi organik materyaller içerisinde fulleren ve türevleri, transistör uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır. Polimerik yalıtkan kullanılarak tasarlanan ve hot wall epitaxy yöntemi kullanılan alan etkili transistörlerde  $6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  mobilite değerlerine ulaşılmıştır. Küçük molekülü organik yarıiletken materyallerden fulleren türevi PCBM (Fenil C61 butirik asit metil ester) yapısındaki yan zincir bağı nedeniyle bir çözücüde çözülebilir bir davranış gösterir. Bu da bu kimyasal maddenin belli bir çözücüde çözülerek düzgün bir ince film oluşturulmasını sağlar. Polimerik yalıtkan kullanılarak yapılan PCBM tabanlı OFET'lerde mobilite değeri  $0,2 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  değerlerinde elde edilmiştir [48]. Değişik sıcaklıklarda sıvı kristal fazı oluşturan organik materyallere bağlı küçük molekülü yan zincir bağları, çözelti bazında yüksek kristal yapılı ince film oluşumunu sağlamaktadır. Hekzabenzokoronenler gibi diskotik sıvı kristal moleküller diskotik dizileri boyunca mobilite değeri  $0,01 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  civarında elde edilmektedir [49].

Konjuge oligotiyofenlerin yük taşıyıcı mobilite değeri, oligotiyofen halkasının sonuna eklenen alkil zinciri sayesinde artabilmektedir [50]. Bütün tiyofen oligomerler arasında  $\alpha$ -seksitiyofen ( $\alpha$ -6T) ve türevleri aktif organik materyal olarak geniş bir kullanım alanına sahiptir.  $\alpha$ -6T OFET'lerin taşıyıcı mobilite değeri,  $10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Vs}$  ile  $0,01 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  arasında elde edilmiştir [51]. Son zamanlarda Halik ve arkadaşları tarafından alkil grubu içeren oligotiyofenler için mobilite değeri  $1,1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  olarak tespit edilmiştir [52]. Halik ve arkadaşları bu çalışmada alkil grubu içeren oligotiyofenleri, alkil yan zincir bağlarını farklı uzunlukta geliştirip sentezlemişler ve

organik alan etkili transistörün performansının, eklenen yan zincir bağlarının uzunluklarına bağlı olarak değiştiğini tespit etmişlerdir.

Ftalosiyanimler, kusursuz optoelektronik ve kuvvetli optik absorplama özelliklerinden dolayı organik yarıiletken olarak yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Ftalosiyanimler, güneş pilleri ve foto iletkenlerde geniş uygulama alanlarına sahiptirler [53]. Metaloftalosiyanim tabanlı OFET'lerde mobilite değeri yaklaşık 0,11  $\text{cm}^2/\text{Vs}$  olarak rapor edilmiştir [54].

Pentasen organik yarıiletkeni ile birlikte  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  gibi inorganik yalıtkan kullanılarak oluşturulan organik transistörler, yaygın olarak kullanılmaktadır [55].  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yalıtkanı üzerinde oluşturulan pentasen film tabanlı organik alan etkili transistörlerde mobilite değeri 3,4  $\text{cm}^2/\text{Vs}$  kadar gelişme göstermiştir [56]. Benzer diğer çalışmalarda, pentasen materyali kullanılarak en yüksek mobilite değeri 6  $\text{cm}^2/\text{Vs}$  elde edilmiştir [57].

#### 2.4.4. Fullerenler ve çözülebilir türevleri

C60 tabanlı organik alan etkili transistör çalışmalarının ilki 1993 yılında yapılmış ve  $10^{-3} \text{cm}^2/\text{Vs}$  elektron mobilite değeri elde edilmiştir [58]. Bu çalışmaları takiben, 1995 yılında Bell laboratuvarlarında 0,3  $\text{cm}^2/\text{Vs}$  mobilite değeri elde edilmiştir [59]. Ayrıca, 2003 yılında yapılan çalışmalarla mobilite değeri 0,5  $\text{cm}^2/\text{Vs}$  değerine ulaşılmıştır [60]. Organik yalıtkan üzerine hot wall epitaxy yöntemi ile oluşturulan C60 transistörde 0,63  $\text{cm}^2/\text{Vs}$  mobilite değerine ulaşılmıştır [61]. Son zamanlarda fulleren C60 kullanılarak oluşturulan ince film çalışmalarında, C60 organik yarıiletken materyali kaplanmadan önce organik yalıtkanın belirli sıcaklıklarda ısıtma işlemine tabi tutulup performans parametreleri incelenmiş ve bu çalışmalar ışığında 6  $\text{cm}^2/\text{Vs}$  mobilite değerine ulaşılmıştır [62].

Metanofulleren gibi belirli bir çözücüde çözülebilen fullerenlerden olan PCBM (Fenil C61 butirik asit metil ester) genel olarak n tipi yarıiletken özelliği göstermekte ve mobilite değeri  $10^{-3}$  ile 0,2  $\text{cm}^2/\text{Vs}$  arasında bulunmaktadır [63]. Aşağıdaki Tablo



2.2.'de 1983 yılından 2005 yılına kadar organik alan etkili transistörlerde kullanılan organik yarıiletkenlerin mobilite gelişimleri gösterilmektedir.

Tablo 2.2. Literatürde olan ve OFET'lerde ölçülen mobilite değerleri [64]

Yıl	Materyal (Kullanılan Method)	Mobilite	-VT	Ion / Ioff
2015	CoPc (v)	2,01E-1	-2,25	2E2
1989	NiPc (v)	1,7E-4	3-10	NR
1994	NiPc (v)	6,8E-4	24,7	>1E3
	NiPc (v,100 °C)	0,02		
2003	NiPc (v)	8,9E-3	17	NR
1996	CuPc (v)	0,02	10	4E5
2000	CuPc (v)	3E-4	NR	E7
2004	CuPc-Au-CoPc (v)	0,11	8,9	E5
	CuPc (v)	0,04	13,8	E5
2008	CuPc (v)	1,22E-2	8	7E3
1997	CuPc (v,125 °C)	2E-2	NR	NR
1997	SnPc (v,125 °C)	3,4E-3	NR	NR
1997	ZnPc (v,200 °C)	2,8E-3	NR	NR
2006	ZnPcTO (LB)	1,1E-4	NR	E3
1998	CuPcF16 (v,125 °C)	0,03	NR	5E4
1998	ZnPcF16 (v,125 °C)	4,6E-4	NR	NR
1998	CoPcF16 (v,30 °C)	1,8E-6	NR	NR
1998	CoPcF16 (v,215 °C)	4,3E-5	NR	NR
2005	CuPcF16 (v)	5E-3	0,5	E3

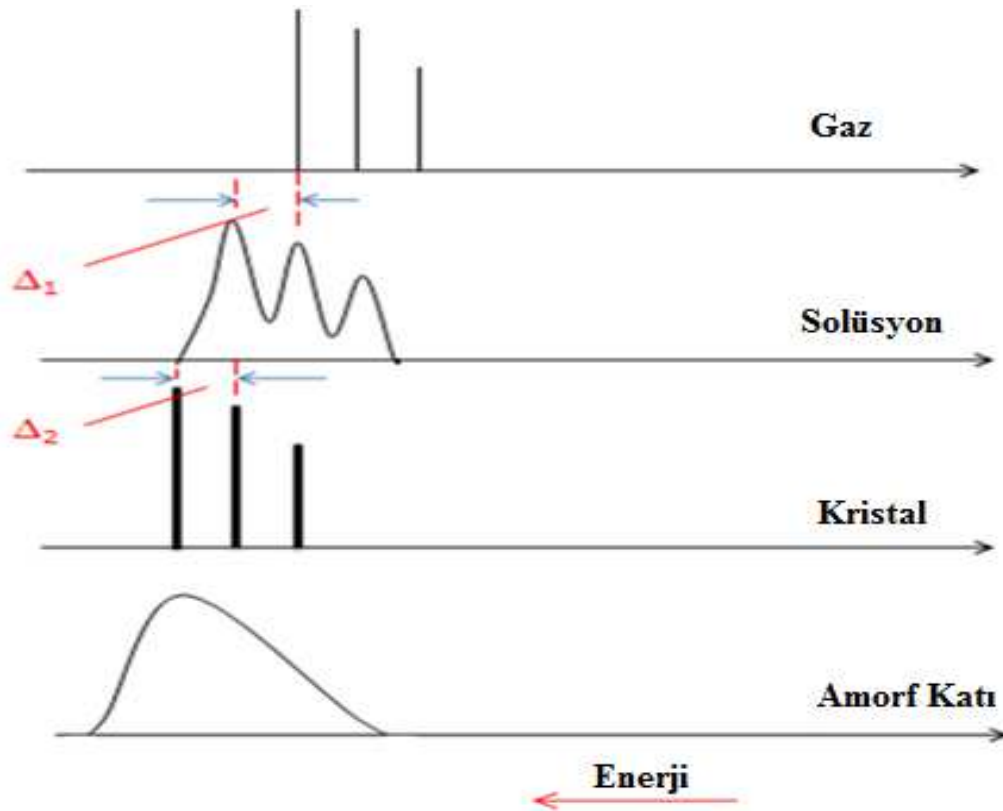
## 2.5. Organik Yarıiletkenlerin Temel Özellikleri

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

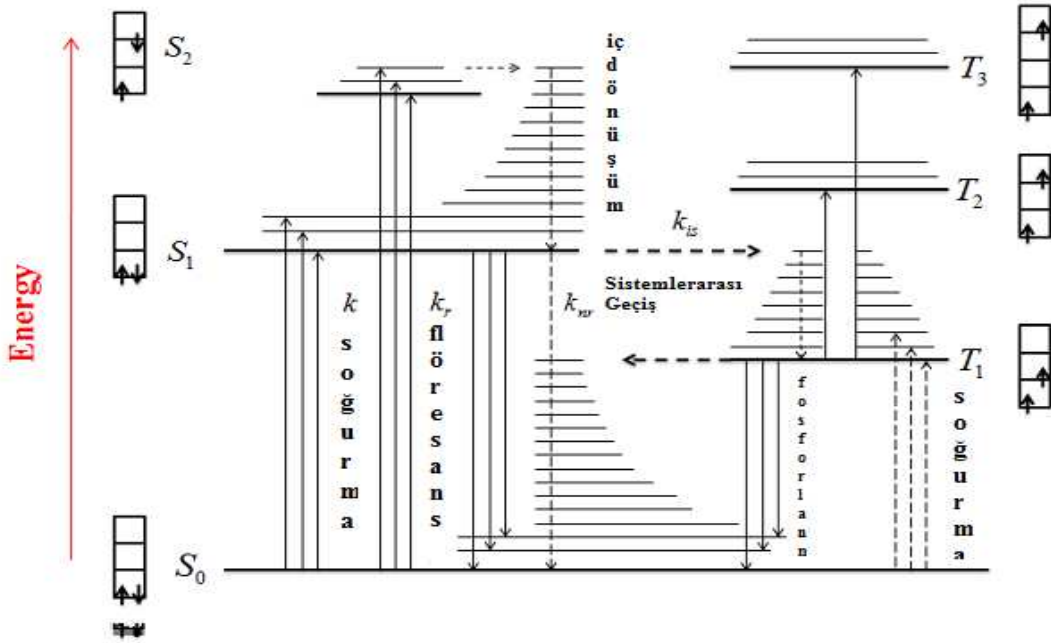
çünkü polimer zincirlerinin morfolojisi mekanik özellikleri değiştirebilir. Yine de, bu tür malzemelerde komşu zincirler arasındaki elektronik etkileşim düşüktür.

### 2.5.1. Optiksel özellikler

Düşük elektronik delokalizasyondan dolayı birinci dereceli optik absorpsiyon ve organik moleküler katının lüminesans spektraları gaz fazın ve çözeltinin spektraları ile benzerdir. Özellikle, katıhal spektrasında moleküler titreşimler önemli rol oynarlar ve çoğu kez bu titreşim modları oda sıcaklığında bile gözlemlenebilir. Yine de katıhal spektrası seçim kuralları, salınım şiddeti, enerjik konum gibi detaylarına ayrılabilir; ayrıca, kristal yapısından veya polimer zincirinin diziliminden dolayı bir anizotropiden bahsedebiliriz. Bununla birlikte, düzensiz organik katılar genellikle kayda değer bir spektral genişleme sergilerler. Bu, Şekil 2.7.'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Farklı fazlardaki organik moleküllerin optiksel spektralarının şematik görünümü.  $\Delta_1$  ve  $\Delta_2$  çözelti ve katıhaldeki solvent kaymalarını belirtir [65]



Şekil 2.8. Bir organik molekülün enerji seviyeleri şeması (sol: singlet manifold, sağ: triplet manifold) Düz çizgiler ışıklı, kesik çizgiler ışısız geçişleri gösterir [33]

Düşük elektronik delokalizasyonunun bir sonucu olarak organik yarıiletkenlerin iki önemli özelliği ortaya çıkar. Bunlardan ilki, foto fiziksel özellikler bakımından önemli sonuçlar doğuran iyi tanımlanmış spin durumlarının (singlet ve triplet) olmasıdır (Şekil 2.8.). Bununla birlikte sistemler arası zayıf bir geçiş süreci vardır. Bu olay OLED'lerdeki elektrolüminesans kuantum verimliliğinin üst sınırını belirler. Diğer önemli özellik ise optiksel eksitonların (exciton) genellikle bir molekül çevresinde lokalize olmasıdır. Bu lokalizasyon sonucunda eksiton bağlanma enerjileri tipik olarak 0.5 ile 1 eV arasında olur. Bu nedenle, organik fotovoltaiik hücrelerde birbirinden bağımsız pozitif ve negatif yük taşıyıcıları üretebilmek için bu bağlanma enerjilerini aşmak gerekir.

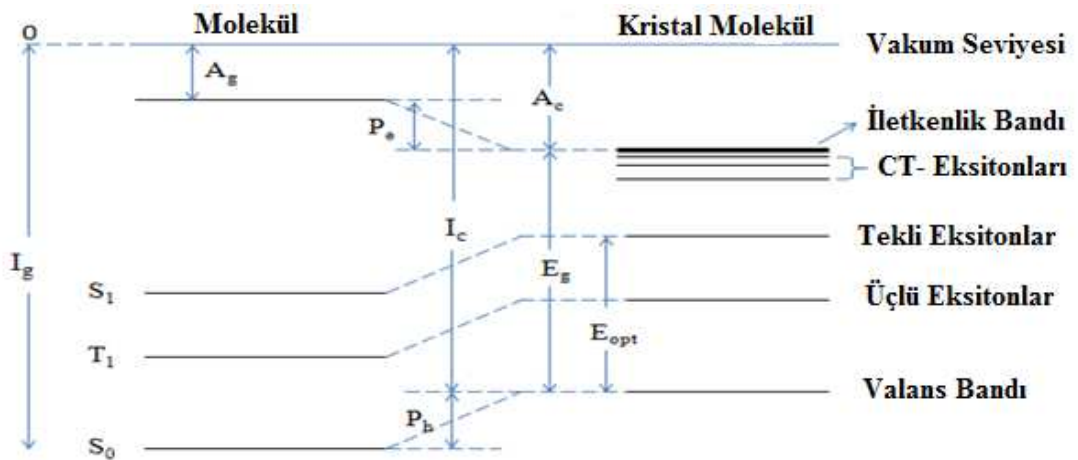
### 2.5.2. Yük taşıyıcı iletimi

Organik moleküler katılarda elektron ve boşluk (hole) iletimi iyonik moleküler durumlar göz önüne alınarak incelenir. Örneğin, bir boşluk oluşturmak için nötral bir M molekülünden bir elektron alınır. Bu durumda bir radikal  $M^+$  kasyonu oluşur. Böylece, bu boşluk bir molekülden diğer moleküle hareket edebilir. Aynı şekilde, elektron iletimi negatif yüklenmiş radikal  $M^-$  anyonu oluşturmak ile mümkündür. Gaz

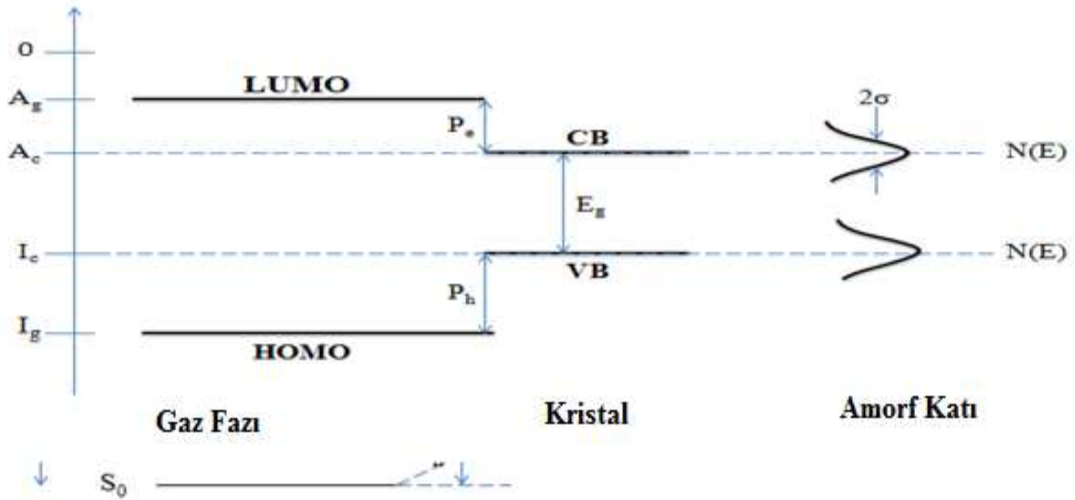
fazındaki izole moleküllerle kıyaslandığında, katıda iyonik durumlar stabilize edilir. Bunun nedeni Şekil 2.9.'daki enerji diyagramlarında gösterilen kutuplanma (polarizasyon) enerjileridir. Bu resimden açıkça anlaşılır ki, eksiton bağlanma enerjisinden dolayı birinci uyarılmış tekli (singlet) durum ile taban durumu arasındaki optiksel band aralığı tek parçacığın bir koleksiyonsuz elektron-boşluk çifti yaratabilmesi için gerekli band aralığından kayda değer şekilde düşüktür. Moleküler kristallerden organik moleküler katılara geçerken bahsetmemiz gereken önemli bir olay vardır: Yerel olarak değişen kutuplanma enerjileri. Düzensiz katıda yerel olarak değişen kutuplanma enerjilerinden dolayı enerji seviyeleri genişlikleri Gaussian durum yoğunluğuna göre değişir (Şekil 2.10.).

Düzen derecesine bağlı olarak organik yarıiletkenlerdeki yük taşıyıcı iletimi mekanizması iki ana durumda incelenebilir: Band ve sıçrama iletimi. Band iletimi tipik olarak çok yüksek olmayan sıcaklıklarda, yüksek saflığa sahip moleküler kristallerde gözlenir. Ancak, elektronik delokalizasyonun düşük olmasından dolayı band genişliği anorganik yarıiletkenlere kıyasla küçüktür. Bunun sonucunda oda sıcaklığında moleküler kristallerdeki yük taşıyıcı mobiliteleri yalnızca 1 ile 10 cm<sup>2</sup>/Vs değerleri arasında olur [66]. Band iletiminin bir karakteristik özelliği olan sıcaklık bağımlılığı düşük sıcaklıklara inilirken bir kuvvet yasası ile karakterize edilir. Fakat tuzaklardan dolayı bu davranıştan belirli sapmalar gözlenmiştir [67].

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



Şekil 2.9. Bir izole molekül (sol) ve bir moleküler kristalin (sağ) enerji seviyeleri[31]



Şekil 2.10. Bir izole molekülün (sol), bir moleküler kristalin (orta) ve bir amorf katının (sağ) enerji seviyeleri[68]

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

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

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

$$j = enV = en\mu E$$

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

Birinci parametre olan mobilite organik yarıiletkenlerde düzen derecesi ve saflığa güçlü bir şekilde bağlıdır ve bundan dolayı hazırlık aşamaları ve ince film büyütme şartlarına göre değişir. Mobilite değerleri moleküler kristallerde  $1-10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  değerleri

arasında olurken, amorf organik katılarda  $10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/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 [9, 56, 69].

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

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

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

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

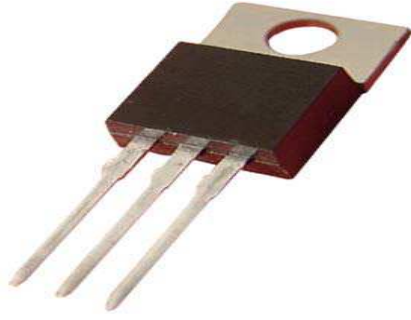
- Elektrokimyasal doplama
- Kontaklardan yük taşıyıcı enjeksiyonu
- Yük taşıyıcıların foto jenerasyonu
- Alan etkili katkılama.

## BÖLÜM 3. ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLER

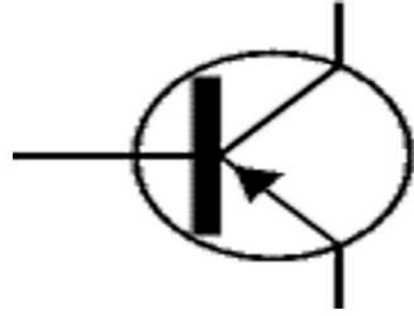
### 3.1. Transistörler

Transistörler yarıiletken malzemelerden yapılmış elektronik devre elemanlarıdır (Şekil 3.1.).

a)



b)



Şekil 3.1. Transistör a) görüntüsü, b) sembolü

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 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 kırılabilirlik, bazen yavaş çalışma, minyatürize edilememesi, yüksek güç tüketimi ve yüksek ısı yayma gibi sorunlardı. 1920'lerin ortalarında, triotun yerini katıhal cihazlarının alabileceği fikri ortaya çıktı. Ekim 1926'da, Julius Edgar Lilienfeld "İki terminali arasındaki elektrik akımının üçüncü farklı bir terminalden uygulanan potansiyel ile değiştirilen cihaz" şeklinde bir patent aldı [5].

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 konseptedir. Her iki transistör de farklı çalışma mekanizmalarına sahiptir.

1948 yılında, Walter H. Brattain ve John Bardeen kristal redresör (doğrultucu) yapmak için Bell laboratuvarlarında çalışıyorlardı. Esas olarak yapılan; çeşitli kristallere temas eden bir catwhiskerin (dedektör ibresi) tek yönde iletken, diğer yönde büyük bir direnç göstermesi ile ilgili bir çalışmaydı. Deneysel sırasında germanyum kristalinin ters akıma daha çok direnç gösterdiği ve daha iyi bir doğrultma işlemi yaptığı gözlemlendi ve böylece germanyum redresörler ortaya çıktı.

Brattain ve Bardeen germanyum redresör ile yaptıkları deneylerde, germanyum kristali üzerindeki serbest elektron yoğunluğunun, redresörün her iki yöndeki karakteristiğine olan etkisini incelediler ve bu sırada, catwhisker'e yakın bir başka kontak daha yaparak deneylerini sürdürdüler. Bu sırada ikinci whiskerde akım şiddetlenmesinin farkına vardılar ve elektronik tarihinin bir dönüm noktası olan transistör keşfedilmiş oldu.

Adını 'Transfer Resistor' yani taşıyıcı direnç kelimesinden alan transistorün geliştirilmesine daha sonra William Shockley de katıldı ve bu üçlü 1956 yılı Nobel Fizik Ödülü'ne layık görüldüler.

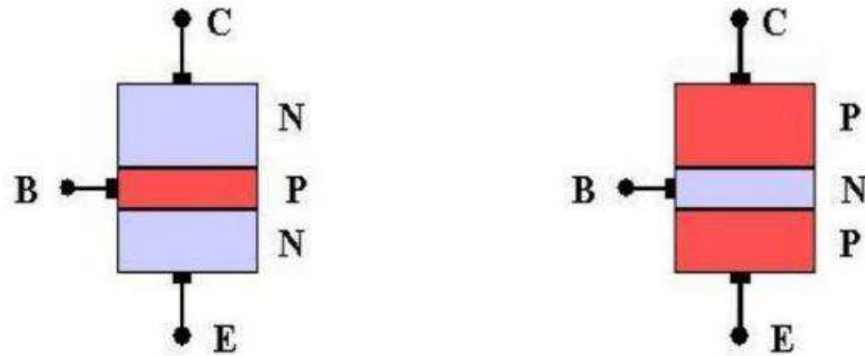
Sonraki 50 yıl boyunca malzeme teknolojileri üzerinde yapılan araştırmalar neticesinde silikon-silikon dioksit, metal-metaloksit-yarıiletken alan etkili transistör (MOSFET) üretilmiştir [70]. Bugün, MOSFET'ler en çok kullanılan transistör çeşitleridir; kişisel bilgisayarlarda kullanılan işlemcilerin içinde, cep telefonlarında ve birçok farklı elektronik cihazlarda kullanılırlar. Elektronik alanda en fazla kullanılan entegre devre elemanlarından biri olan transistörlerin en temel tipleri:

- Yüzey eklemli transistör



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

Bununla beraber transistör tiplerinden olan FET'leri polarlıkları ve çeşitliliklerine göre sınıflandırabiliriz. Polarlıklarına göre sınıflandırma, n tipi ve p tipi yarıiletken kullanılmasına göre iki şekildedir. Transistörler yarıiletkenlerin npn veya pnp şeklinde devreye işlenmesi ile oluşturulur (Şekil 3.2.). 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 3.2. 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 vazgeçilmez transistörlerdir. Çift kutuplu eklem transistörlerin baz, kollektör ve emitör

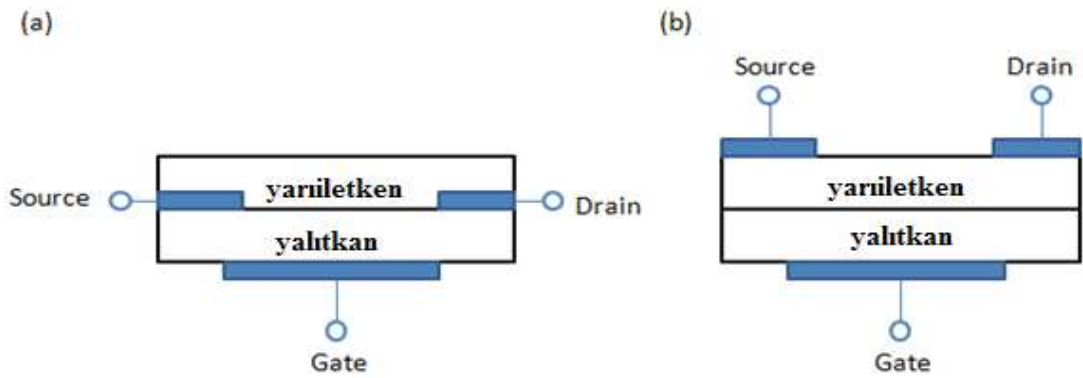
kontaklarına karşılık alan etkili transistörlerde kapı (gate), savak (drain), kaynak (source) kontakları karşılık gelir. Hem tek olarak hem de entegre devrelerde milyarlarca transistör bir arada üretilebilmektedir. Transistörler çalışma temellerinde omik ve Schottky kontaklarla ilgili temel konular ile 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 [24]. Temel olarak FET bir sığa gibi çalışır.

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) [71]. 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 [72,73].

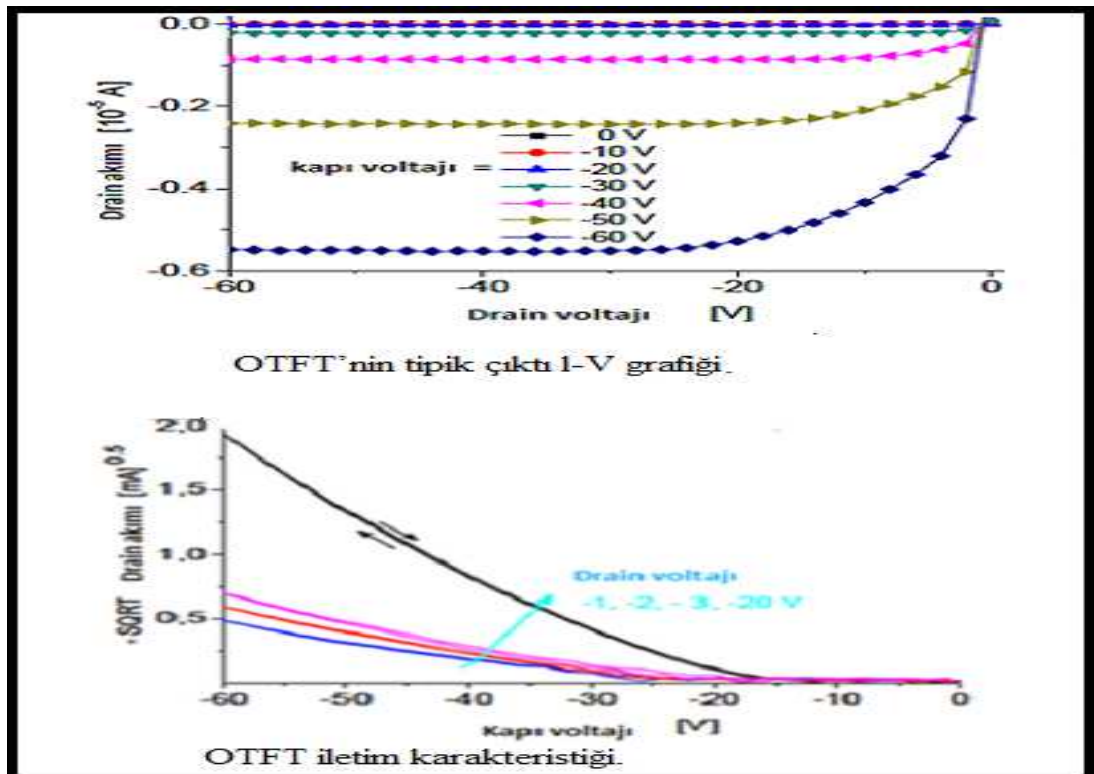
### 3.2. Organik İnce Film Transistör Yapısı

OFET'ler ile OTFT'ler aynı mimariye sahiptirler. OTFT'ler farklı geometrik yapılar da üretilebilirler. Kabaca, bir OTFT üç kısımdan oluşur: Bir yalıtkan, bir ince film katmanı ve üç elektrot. Elektrotlardan ikisi, kaynak (source) ve savak (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 3.3.'de alt kontak ve üst kontak yapılarının ayrı ayrı gösterildiği üst kapı yapısına sahip OTFT'lerin şematik görünümü gösterilmiştir. Her

iki yapının da avantajları ve dezavantajları vardır. Alt kontak yapısında kontaklar yalıtkanın üzerine kaplanmıştır; eğer bahsedilen silikon dioksit gibi bir anorganik yalıtkan ise kontaklar mikrolitografik 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. OTFT'nin tipik çıktı (üst) ve iletim (alt) karakteristikleri Şekil 3.4.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. OTFT yapısının şematik gösterimi. İki cihaz da alt kapı yapısına sahiptir. (a): Alt kontak; (b): Üst kontak [19]

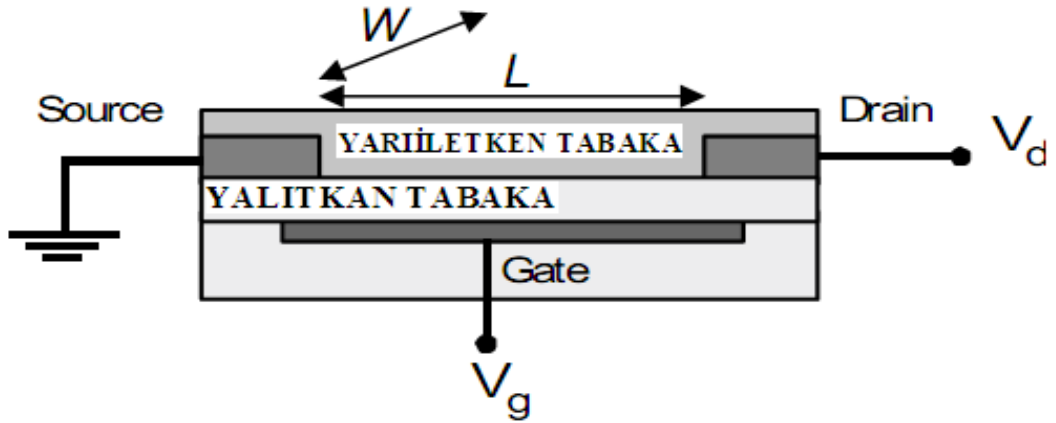


Şekil 3.4. OTFT'nin tipik çıktı (üst) ve iletim (alt) karakteristikleri

### 3.3. Organik Alan Etkili Transistörler

Alan etkili transistör, kaynak ve savak adı verilen iki omik kontak arasında oluşturulan iletken kanallı bir levha olarak tanımlanan bir kapasitördür. Alan etkili transistör, Şekil 3.5’de gösterilen organik polimer yalıtkan tabaka, organik yarıiletken materyal tabaka ile kaynak, savak ve kapı olmak üzere 3 elektrottan meydana gelmiştir.

Aşağıdaki şekilde görülen diğer parametreler; kanal boyu =  $L$  (kaynak ve savak kontaktarı (genellikle LiF/Al veya Altın arasında kalan mesafe), kanal genişliği =  $W$  ile belirtilmiştir (Şekil 3.5.).



Şekil 3.5. Organik alan etkili transistörün yapısı

Alan etkili transistörlerde kullanılan ince yarıiletken tabaka, kapı elektrotu üzerindeki yalıtkan tabaka ile kontak durumundaki kaynak ve savak elektrotları arasındaki bölümde bulunmaktadır.

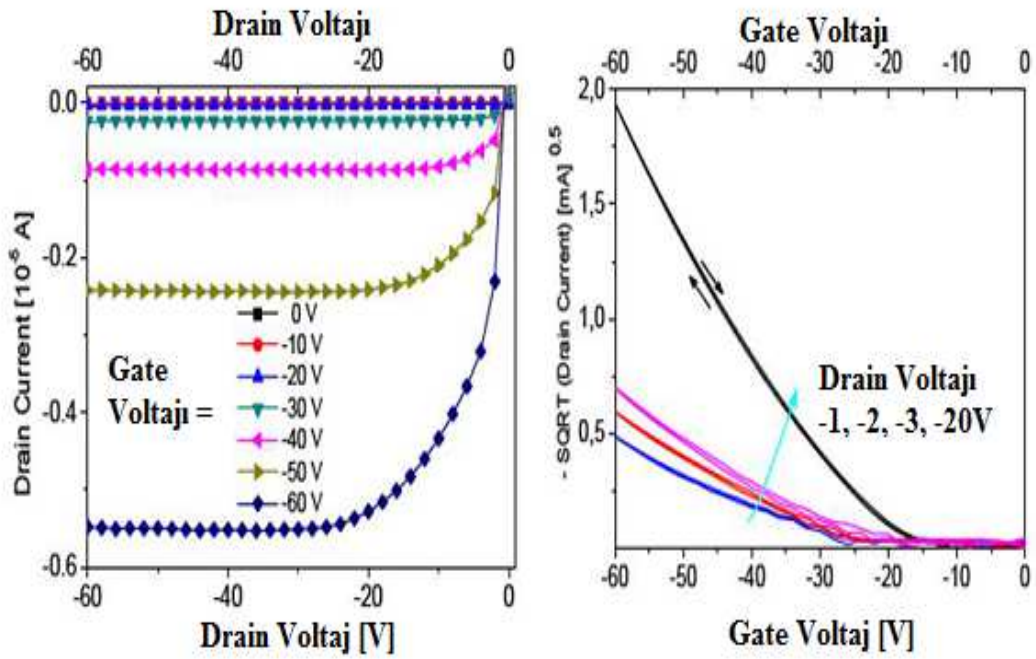
Organik yarıiletkenler üzerinde çalışmalar 1930'ların sonlarında başlamıştır. Alan etkili transistör (FET)ler, mikroelektronikte çok önemli bir uygulama alanına sahiptir. Alan etkili transistör, ilk defa Lilienfeld tarafından 1930 yılında bulunmuştur [74]. Kahng ve Atala tarafından, silikon esaslı metal oksit yarıiletken alan etkili transistör (MOSFET), 1960 yılında ilk defa üretilmiştir [6]. Ancak, organik ince film transistörler (OTFT) üzerindeki çalışmalar 1980'lerin sonlarında başlamıştır. Bu çalışmalar, polimerler ve küçük moleküller ile OTFT'lerin üretilmesi üzerinedir. İlk

üretileen 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 mobilitelelerinin amorf silikonun mobilitesine yetiştığı dönemlerde endüstriyel gruplar OTFT'ler üzerine çalışmaya karar vermişlerdir.

Alan etkili transistörlerde kullanılan ince yarıiletken tabaka, kapı elektrotu üzerindeki yalıtkan tabaka ile kontak durumundaki kaynak ve savak elektrotları arasındaki bölümde bulunmaktadır. Bilinen ilk organik alan etkili transistör, 1986 yılında politiyofen kullanılarak yapılmıştır [4]. Organik alan etkili transistörlerde kullanılan yarıiletken ince film tabaka oluşumu, kullanılan malzemenin fiziksel özelliğine bağlı olarak vakum süblimleştirme (vacum sublimated), döndürerek kaplama (spin coating), damlatarak kaplama (drop casting) yöntemleri kullanılarak oluşturulur. Gate elektrotu, yalıtkan tabakanın alt kısmında bulunan indiyum kalay oksit (ITO) denilen ince bir iletken tabakadan meydana gelmiştir.

Organik alan etkili transistörlerde, yüksek dielektrik katsayısına sahip inorganik yalıtkan tabaka ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiNx}$ , vb.) ve polimer yapılu yalıtkan tabaka PMMA (Poli(metilmetakrilat)), PVP (Poli(vinilfenol)), PVA (Poli(vinilalkol)) vb.) olarak başlıca 3 türlü yalıtkan tabakadan meydana getirilen transistör, yapısına ve tasarımda istenilen özelliklere bağlı olarak tasarlanmaktadır [75]. Yarıiletken tabakaya yük enjeksiyonunu sağlayan, kaynak ve savak elektrotları genellikle altın gibi kaliteli metaller ile iletken polimerler tarafından oluşturulur [76]. Alan etkili transistör yapısında voltaj, kapı elektrotuna ( $V_g$ ) ve savak elektrotuna ( $V_d$ ) uygulanır. Kaynak elektrotu, genellikle toprak olarak belirlenir ( $V_s=0$ ). Kaynak ile savak arasındaki potansiyel fark kaynak savak voltajı olarak tespit edilir ( $V_{ds}$ ) [38]. Alan etkili transistör yapısına pozitif kapı voltajı uygulandığında, kaynak elektrotundan enjekte edilen yükler kapı elektrotundan daha negatif bir değerde olduğu zaman elektron enjeksiyonu meydana gelmektedir. Benzer bir durum, negatif kapı voltajı uygulandığında kaynak elektrotuna enjekte edilen yükler kapı elektrotundan daha pozitif bir değerde olursa delik (hole) enjeksiyonu oluşmaktadır [77]. Savak ile

kaynak arasında uygulanan gerilim ile de bu kanaldan akım geçmesi sağlanır. Kapı voltajını arttırdığımızda bu kanalda oluşan deliklerin sayısı yalıtkanın özelliğinden dolayı artar ve akım değeri artar ve yalıtkanın yükler kapı voltajına göre tam olarak ayrıldığına savak akımı doyuma gider. Kapı voltajı arttırıldığında akım daha fazla artar sonra yine doyuma gider. Bu şekilde transistör karakteristiği elde edilir (Şekil 3.6.).



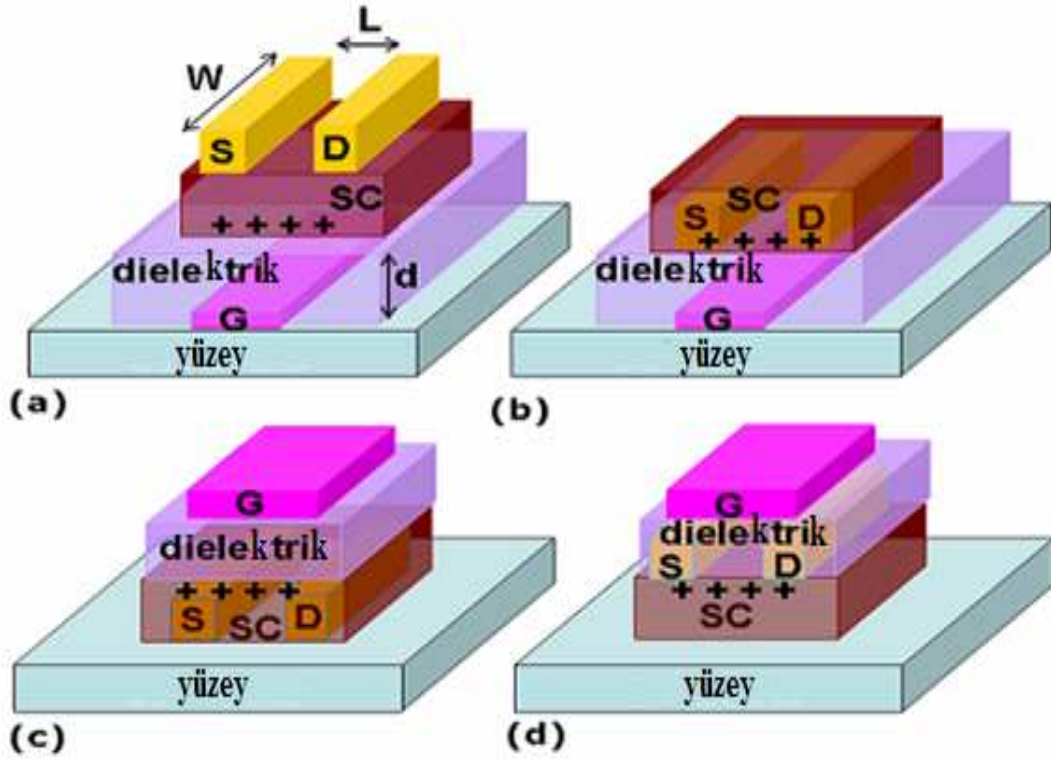
Şekil 3.6. OFET karakteristikleri a) Değişken kapı voltajına göre oluk akımı ve oluk voltajı karakteristiği b) Oluk akımının kapı voltajına göre değişim karakteristiği

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.

### 3.4. Organik Alan Etkili Transistörlerin Çeşitleri

Organik alan etkili transistörlerde kullanılan yarıiletken materyalin özellikleri ve yapıda kullanılan gate yalıtkan tabaka tarafından sağlanan çeşitli transistör yapıları,

çok farklı transistör karakteristikleri gösterebilmektedir. Bu çeşit transistörlerde kullanılan değişik tasarım yapıları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Organik alan etkili transistörler için farklı yapı tasarımları [38]

Organik alan ekili transistörler için bilinen başlıca transistör yapıları aşağıda belirtilmiştir.

- a) Üst yüzey kontak / alt katman kapı (top contact /bottom gate) (TC/BG)
- b) Alt katman kontak / alt katman kapı (bottom contact / bottom gate) (BC/BG)
- c) Alt katman kontak / üst yüzey kapı (bottom contact / top gate) (BC/TG)
- d) Üst yüzey kontak / üst yüzey kapı (top contact / top gate) (TC/TG)

Bu entegrelerden en çok tercih edilen yapı, Şekil 3.7.'de gösterilen alt tabanı kapı elektrotu üst kısmı kaynak ve savak elektrotları olarak tasarlanan yapıdır. Bu yapının yaygın olarak kullanılmasının nedeni, ince film transistörlerden örnek alınarak yüksek kalitede bir yalıtkan tabaka oluşturulması ve alt kısımda bulunan kapı yalıtkan maddesi sayesinde oluşturulan elektrik alanıyla kontrol edilmesidir [15].

Diğer bir tasarım olan, üst kısım kapı elektrot alt kısım savak ve kaynak elektrotuna sahip OFET yapılarının en önemli avantajı, organik yarıiletken maddenin esnek substrat yüzeyinde oluşturulması ve bu sayede uygun kullanım alanına rahatça entegre edilmesidir [38]. Organik alan etkili transistörlerde kullanılan elektrotlar, fotolitografi (photolithography), özel gölgelendirmeli maskeleme yöntemi (shadow mask evaporation), çeşitli formlardaki baskılama (printing) yöntemleri kullanılarak oluşturulur. Transistörlerde kanal boyu (L), top kontak (üst yüzey kontak) yapılarında özel gölgelendirmeli maskeleme yöntemi kullanılarak onlu mikrometre ( $\mu\text{m}$ ) katlarında yapılar tasarlanabilir. Alt katman kontak (bottom contact) yapılarında ise kanal boyu daha küçük bir değer olarak fotolitografi veya baskılama yöntemi ile elde edilir.

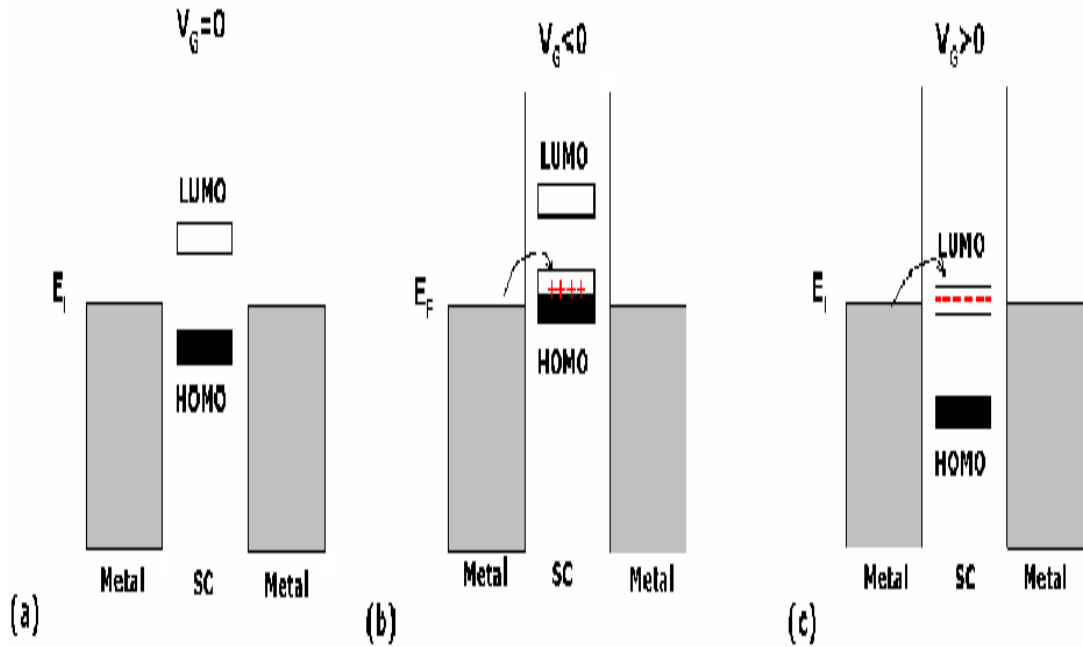
Kullanılan farklı transistör yapıları, enjekte edilen elektrotların pozisyonu ile bu elektrotlarla ilişkili olan kapı elektrotunun konumundan dolayı oluşmaktadır. Alt katman kontak / alt katman gate yapısında yükler, yarıiletken/yalıtkan ara yüzeyinde direk olarak birikerek kanal oluşumu sağlanır. Fakat diğer geometri yapılarında ((TC/BG) ve (BC/TG)) ise iletken kanal yarıiletken tabaka tarafından ayrılır. Böylece yükler ilk olarak iletken kanala erişmeden önce birkaç nanometrelik yarıiletken kalınlığını geçmek zorundadır. Transistör yapıları arasındaki diğer bir farklılık ise, farklı morfolojilere sahip yüzeylerdeki yalıtkan/yarıiletken ve elektrot/yarıiletken ara yüzeylerinden meydana gelen tuzak düzeylerinin miktarlarıdır [38].

### **3.5. Organik Alan Etkili Transistörlerin Temel Çalışma Prensibi**

Genel olarak organik alan etkili transistörlerin karakterizasyon işlemlerinde, kaynak elektrotu topraklanarak kapı ve savak elektrotlarına voltaj uygulanır. Kapı elektrotuna uygulanan voltaj ile kaynaktan savaka doğru akan akım kontrol edilir. Kapı elektrotuna hiçbir voltaj uygulanmadığı zaman, kaynaktan savak elektrotuna çok az bir akım akmaktadır. Bu akıma sızıntı akımı denir. Bu akımın değeri savak voltajının ( $V_d$ ) kanal direncine ( $R_s$ ) oranı olarak tespit edilir [38].



Kapı elektrotuna hiçbir voltaj değeri uygulanmadığı zaman ( $V_g=0$ ), yapı içerisindeki organik yarıiletken katmanında hiçbir katkılandırma olayı görünmeyecek yani yapıda hiçbir yük taşıyıcısı oluşamayacaktır (Şekil 3.8.a.).



Şekil 3.8. OFET 'in çalışma prensibini anlatan enerji düzeyi diagramı [15]

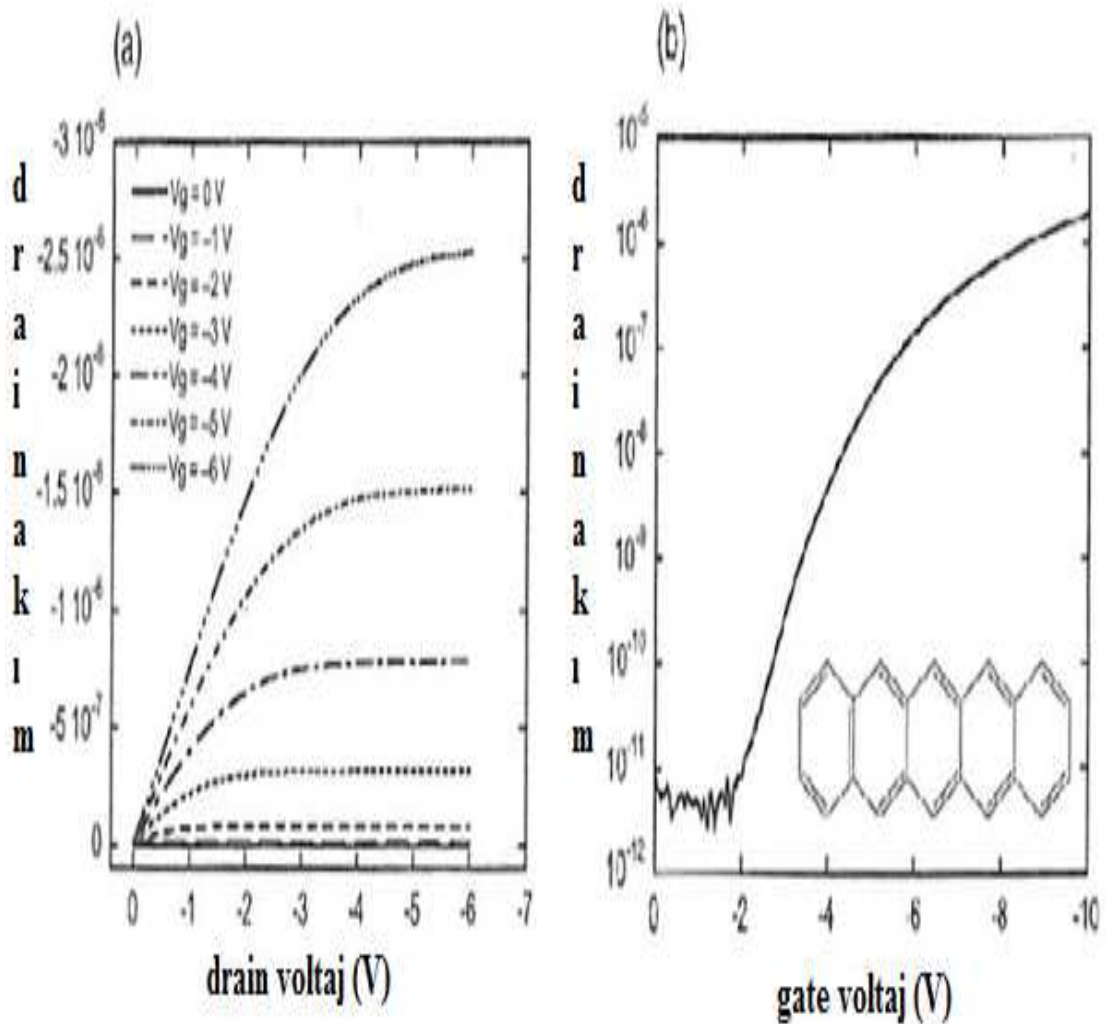
Kapı elektrotuna negatif voltaj değeri uygulandığı zaman ( $V_g<0$ ), organik yarıiletken/yalıtkan yüzeyinde pozitif yükler indüklenmektedir (p tipi iletken kanal oluşumu) (Şekil 3.8.b.). Eğer, kaynak ve savak elektrotlarının fermi seviyesi organik yarıiletken materyalinin HOMO seviyesi ile uyumlu ise, kaynak ve savak arasında, uygulanan voltaj sayesinde pozitif yüklerden bir iletken kanal oluşumu sağlanır.

Kapı elektrotuna pozitif voltaj değeri uygulandığı zaman ( $V_g>0$ ), organik yarıiletken/yalıtkan yüzeyinde negatif yükler indüklenmektedir (n tipi iletken kanal oluşumu) (Şekil 3.8.c.). Eğer kaynak ve savak elektrotlarının fermi seviyesi organik yarıiletken materyalinin LUMO seviyesi ile uyumlu ise, kaynak ve savak arasında, uygulanan voltaj sayesinde negatif yüklerden bir iletken kanal oluşumu sağlanır.

Organik yarıiletken materyaller bu davranış özelliklerinden dolayı pozitif ya da negatif yük taşıyıcıları p tipi ya da n tipi yarıiletken olarak adlandırılırlar. Bazı organik

yariletken materyaller hem elektron hem de boşluk taşıma özelliğine sahip olabilirler. Bu tip materyallerden oluşturulan transistörler ambipolar transistör olarak adlandırılır [15].

OTFT'lerin çalışma prensibini açıklamak için Şekil 3.9.'da tipik akım voltaj karakteristikleri gösterilmiştir. Bu eğriler pentasen ile yapılan bir cihazın ölçüm sonuçlarından elde edilmiştir. Cihaz yapımında kullanılan elektrotlar altındır [78]. Şekil 3.9.a.'da lineer bölgeden doyum bölgesine aşamalı geçiş açık şekilde gösterilmiştir. Şekil 3.9.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 3.9. OTFT'nin tipik çıktı (a) ve iletim (b) karakteristikleri [78]

Burada 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 akım voltaj grafiğimizde mobilite ( $\mu$ ) sabittir.

$$I_{DS_{doy}} = \frac{W}{2L} \mu C_i (V_{GS} - V_T)^2$$

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

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

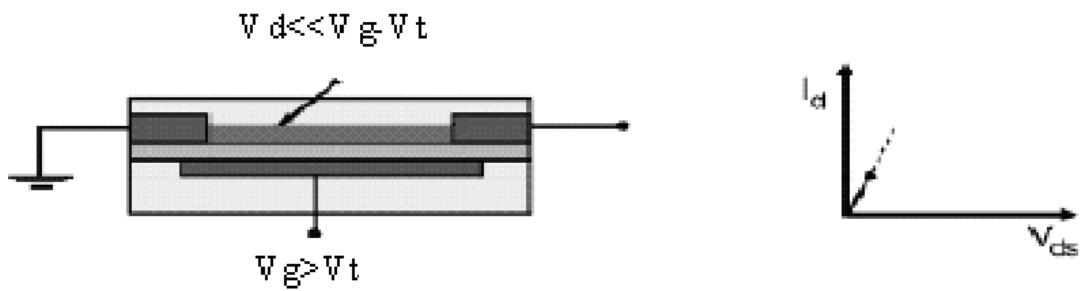
OTFT'ler belirli bir kapı voltajı değerinden sonra açık konuma gelirler; bu voltaj değerinden düşük kapı voltajlarında ise kapalı durumda olurlar. Bu voltaj değerine ise  $V_T$  eşik voltajı denir.  $V_T$  değeri  $I_{DS}$ 'nin karekökünün  $V_G$  ile değişimini gösteren iletim karakteristiğinden elde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

OTFT'lerde önemli olan bir diğer parametre ise açık/kapalı akım oranıdır ( $I_{on}/I_{off}$ ). Teoride, transistör kapalı durumdayken akım geçmez, ancak pratikte belirli bir akım vardır. Bu akım  $I_{off}$  değeridir.  $I_{on}/I_{off}$  parametresi cihazın sinyali ne boyutlarda yükselttiğini belirler ve bu değer ne kadar yüksekse cihaz performansı da o kadar iyidir.  $I_{on}/I_{off}$  değeri Şekil 3.9.'daki akımın en yüksek ve en düşük değerleri oranlanarak elde edilir.

Alan etkili transistörlerin başlıca 3 çalışma durumu mevcuttur:

### 3.5.1. Doğrusal (linear) rejim bölgesi

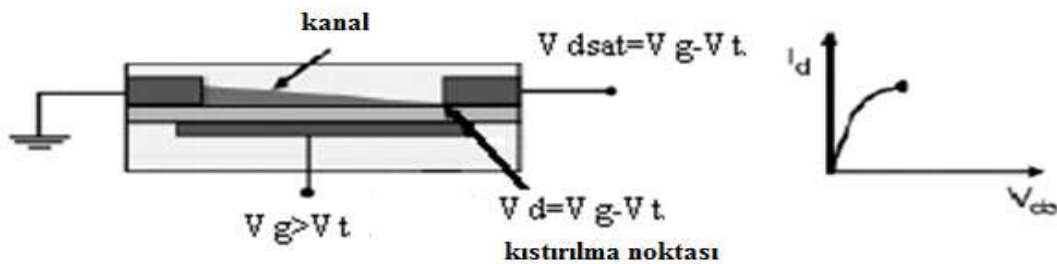
Savak voltaj değerinin ( $V_d$ ), kapı voltajı ile eşik değer (threshold) voltajı arasındaki potansiyel farktan ( $V_G - V_T$ ) küçük olduğu durumda meydana gelir. Kanal yoğunluğu (channel density) düzenli (uniform) şeklindedir. Oluşturulan iletken kanal direnç özelliği gösterir. Bu durumda iletken kanala doğru akan akım savak voltajının değeri ile doğru orantılı olarak değişim gösterir. Şekil 3.10.'da alan etkili transistörün doğrusal (linear) rejim bölgesi gösterilmiştir [78].



Şekil 3.10.  $I_{ds}$  akımının doğrusal (linear) bölge rejimi

### 3.5.2. Kısırlıma (pinch off) noktasındaki doyum (saturation) rejimin başlaması

Savak voltaj değeri  $V_G - V_T$  voltaj değerine eşit olduğu durumda, oluşturulan iletken kanal yoğunluğu (conductive channel density) düzenli olmayan (nonuniform) bir yapıya dönüşür. Oluşturulan kanal kısırlıdır (pinched) (savak ile kapı elektrot arasında hiçbir potansiyel fark bulunmamaktadır). Bu bölgede artan kaynak savak voltajına rağmen akım artmamaktadır, fakat tükenme (depletion) bölgesinin genişlemesi ve akımın sınırlanması sağlanmaktadır. Bu durum Şekil 3.11.'de gösterilmiştir [79].

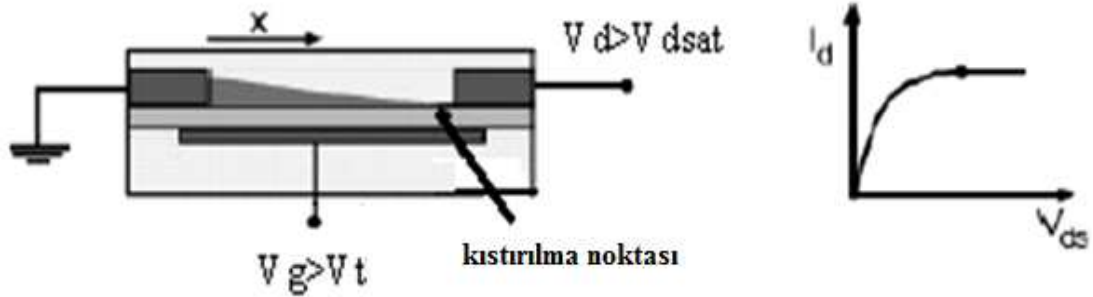


Şekil 3.11. Kısırlıma (pinch off) noktasındaki doyum (saturation) rejimi başlangıcı

### 3.5.3. Doyum (saturation) bölgesi

Savak voltaj değeri  $V_G - V_T$  voltaj değerinden büyük olduğu durumda transistör doyum bölgesinde çalışmaktadır. Oluşturulan iletken kanal yoğunluğu düzenli olmayan yapıya dönüşür.

Çıkış akımı, sabit bir değer alır ve savak voltaj değerinden bağımsızdır. Doyum rejiminde kanala doğru sabit bir akım gözlenir. Kısıtılma noktası source elektrotuna doğru kayar. Bu sayede tükenme bölgesinde genişleme meydana gelmektedir. Şekil 3.12.'de transistörün doyum bölgesindeki karakteristiği gösterilmiştir [79].



Şekil 3.12. Transistörün doyum (saturation) bölgesi

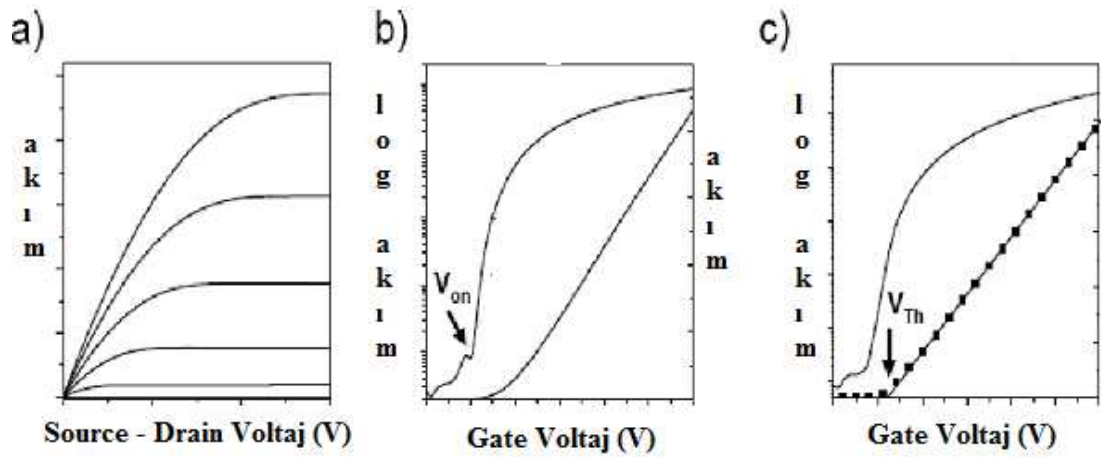
### 3.6. Alan Etkili Transistörün Performans Karakteristikleri

Organik alan etkili transistör performans karakteristikleri, birçok parametre yardımı ile tanımlanır. Bu parametreler:

- Alan etkili mobilite değeri
- Alt eşik değer eğrisi (subthreshold slope)
- Açma/kapama (on/off) oranı
- Geçiş iletkenlik (transconductance) değeri

Transistörden elde edilen bu parametreler yardımıyla, tasarlanan transistörün performans ve karakteristikleri belirlenerek elde edilen transistör hakkında fikir sahibi olunmaktadır [38].

Aşağıdaki şekilde n kanallı organik alan etkili transistörün akım voltaj karakteristikleri gösterilmektedir. (Şekil 3.13.) Doğrusal ve doyum bölgesindeki transistör çıkış karakteristiği Şekil 3.13.a.'da, savak akımının ansızın yükseldiği andaki başlangıç voltajının ( $V_{GS}$ ) gösterildiği doğrusal rejimdeki transfer karakteristik eğrisi Şekil 3.13.b.'de ve eşik değer voltajının gösterildiği doyum bölgesindeki transfer karakteristik eğrisi Şekil 3.13.c.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.13. N kanal organik alan etkili transistörün akım gerilim eğrileri[38]

### 3.6.1. Mobilite Değerinin Hesaplanması

Alan etkili mobilite değeri, uygulanan elektrik alan başına ortalama yük taşıyıcı hızı olarak tarif edilmektedir. Düşük savak voltajının, savak akımıyla doğrusal olarak değiştiği doğrusal rejim bölgesinde aşağıdaki denklem yardımıyla mobilite değeri tespit edilir. Doğrusal rejimin hesaplanması;

$$I_{d,linear} = \frac{W}{L} \mu_{linear} C_i (V_g - V_{th}) V_d$$

W...kanal genişliği,  $C_i$  =kapasitans,  $V_G$  = kapı voltajı

L...kanal uzunluğu,  $I_d$  =drain akım,  $V_T$  =eşik voltajı

Eğer savak voltajı ( $V_d$ ) kapı voltajından ( $V_G$ ) daha negatif bir değerde olursa, biriktirme (accumulation) tabakasındaki kısırılma olayından dolayı transistör doyum

rejimine girmektedir. Transistörün doyum rejiminde iken aşağıdaki akım-gerilim denklemi elde edilir. Doyum rejimin hesaplanması;

$$I_{d,saturasyon} = \frac{W}{L} \mu_{saturesyon} C_i (V_g - V_{th})^2$$

Transistör doyum (saturation) bölgesinde çalışırken, mobilite değeri  $\sqrt{I_{ds}}$  değerine karşı  $V_G$  değerinin eğiminden hesaplanır. Mobilite değerinin hesaplanması;

$$\mu = \frac{d\sqrt{I_d}}{dV_g} \frac{2L}{wC_i}$$

denklemiyle yapılır. Doğrusal ve doyum bölgelerindeki mobilite değerlerinden, yüksek yük taşıyıcı yoğunluğuna sahip doyum rejimindeki mobilite değeri, hesaplanan mobilite değeri olarak seçilmektedir [15].

### 3.6.2. Alt eşik değer (subthreshold) eğrisinin hesaplanması

Alan etkili transistörlerde alt eşik değeri eğrisi, transistöre uygulanan  $V_G$  voltajının,  $I_d$  çıkış akımının logaritmik değişimine bağlı olarak aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır. Alt eşik değer eğrisi denklemi;

$$S = \left( \frac{\Delta \log(I_{ds})}{\Delta V_{gs}} \right)^{-1}$$

şeklindedir. Yukarıdaki denklem yardımıyla alt eşik değer eğrisi (subthreshold slope), tasarlanmış olan transistörün anahtarlama oranı (on-off ratio) logaritmik olarak artan çıkış akımının on durumundan off durumuna bağlı olarak tespit edilir. Hesaplanan bu değer sayesinde, farklı yalıtkanlar üzerine kaplanan organik yarıiletken maddenin transistör karakteristiği üzerine etkisi incelenir. Bu denklem aracılığıyla transistörün nasıl bir transistör olduğu (kaliteli veya kalitesiz) anlaşılır [38].

Ayrıca oluşturulan transistörlerin, normalize alt eşik değer eğrisi denklemi yardımıyla kapı voltajı ile indüklenen yük taşıyıcı etkisinin, farklı yalıtkanlardaki organik yarıiletken ile yalıtkan madde ve yarıiletken ara yüzeyinin çıkış akımına etkisi incelenebilir. Aşağıda alan etkili transistörlerin normalize alt eşik değer eğrisi denklemi verilmektedir [38].

$$S_n = C_x \left( \frac{\Delta \log(I_{ds})}{\Delta V_{gs}} \right)^{-1} V_n F_c m^2$$

Alt eşik değer eğrisi değeri, genel olarak yarıiletken ile yalıtkan arasındaki ara yüzey tuzaklarına, transistörü oluşturan maddeler içerisindeki tuzaklara (yalıtkan-yarıiletken vb.), yarıiletken ve yalıtkanın yüzey morfolojisine, oluşturulan transistörün yapısal özelliklerine, üretim koşullarına, ölçüm koşullarına bağlıdır. Bu değer inceleme sayesinde, aynı koşullarda üretilen transistörlerin performans özellikleri karşılaştırılabilir. Kaliteli bir transistör üretimi için alt eşik değerinin olabildiğince düşük olması istenir. Organik yarıiletken yalıtkan yüzeyden kaynaklanan yüksek alt eşik değeri, akım-gerilim karakteristiklerinin ölçümü esnasında ileri ve geri ölçüm değerlerinin taranması sırasında istenmeyen eğri kaymaları yani histerisiz eğrileri şeklinde bozulmalara sebep olabilir [79].

### 3.6.3. Açma kapama (on/off) oranı

Alan etkili transistörlerdeki diğer önemli bir parametrede transistörün transfer karakteristiğinden elde edilen açma/kapama (on/off) değeridir. Alan etkili transistörün açık durumdaki (on state) savak akımının kapalı durumdaki (off state) savak akımına oranı kullanılarak tespit edilir ( $I_{on}/I_{off}$ ). Bu değer transistör iyi bir anahtarlama karakteristiğine sahip olması gerektiğinden dolayı yüksek bir değerde olması istenmektedir.

Kaynak savak elektrotlarındaki kontak direnci etkisi ihmal edilirse bu değer genel olarak, transistörün mobilite değerine, gate yalıtkanın kapasitansına ve organik yarıiletken malzemenin iletkenliğine bağlı olarak değişmektedir [38].



### 3.6.4. Geçiş iletkenlik (transconductance) değeri

Geçiş iletkenlik değeri ( $g$ ), sabit bir  $V_d$  voltajındaki  $I_{ds}$ - $V_{gs}$  eğrisinin değişim oranı olarak hesaplanır ve bu değer transistörün mobilite değerine bağlı olarak değişim gösterir.

Aşağıdaki denklem yardımıyla geçiş iletkenlik değeri hesaplanır. Geçiş iletkenlik değeri;

$$g = \frac{\Delta I_{ds}}{\Delta V_{gs}}$$

Bu parametre alan etkili transistörün kazanç katsayısı olarak tanımlanır. Organik alan etkili transistörlerde kullanılan yüksek mobilite değerine sahip organik yarıiletkenlerde bu değer artmaktadır. Kaliteli bir alan etkili transistörde bu değer yüksek olması istenir [49].

### 3.7. Organik Alan Etkili Transistörlerde Kullanılan Üretim Teknikleri

Son zamanlarda, organik alan etkili transistörlerde kullanılan materyallerde ve üretim teknikleri teknolojilerinde büyük ilerleme kaydedilmiştir. Rubren tek kristal yapısı ve pentasen çok kristal yapılı ince film için yüksek mobilite değerleri bildirilmiştir. Kullanılan organik yarıiletkenlerin performansları üretim tekniklerindeki gelişim sayesinde büyük ölçüde artmaktadır. Genel olarak kullanılan teknikler (fotolitografi, buharlaştırma), maliyetlerinin çokluğu ve cihaz kullanımlarının zorluklarından dolayı halen geliştirilmektedir. Bu tekniklere alternatif üretim teknikleri olarak, düşük maliyete sahip döndürme kaplama ve baskılama tekniği ortaya çıkmıştır. Kullanılan bu teknikler, organik alan etkili transistör teknolojisinin gelişimini ilerletmiş ve organik optik teknolojisinde ve elektronik devre mimarisinde umut verici gelişmeler doğurmuştur [80].

Farklı ince film tabakalarından meydana gelen organik transistörlerdeki tabakalar arasındaki ara yüzeyler, transistör parametrelerini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Oluşturulan katmanlar arasındaki uyum, sadece moleküllerin düzenini arttırarak yüzey hatalarını azaltmaz ayrıca yüklerin enjeksiyonunu ve iletken kanaldaki yük transferini kolaylaştırır [80]. Organik transistörlerde kullanılan başlıca üretim teknikleri; Vakum buharlaştırma tekniği, Langmuir-Blodgett tekniği ve çözelti prosesli döndürerek kaplama yöntemi olarak bilinir.

### 3.7.1. Vakum buharlaştırma tekniği

Vakum buharlaştırma tekniği, günümüzde en çok kullanılan tekniklerden biridir. Organik yarıiletken ince filmler, yüksek vakum altında özel kapalı bir bölme içerisinde kaplanacak materyal süblimleştirilerek oluşturulur. Yüzey sıcaklığının ve buharlaştırma oranının kontrolü ile farklı kalınlıklarda istenilen yapıda ince film yüzeyler elde edilebilmektedir. Yapı içerisinde kullanılan organik materyalin safsızlık düzeyi önemli bir parametredir. Vakum buharlaştırma tekniği kullanılarak meydana getirilen organik transistörlerin mobilite değeri, çözelti biriktirme yöntemi kullanılarak oluşturulan organik transistörlerinkinden yaklaşık 10 kat daha büyük değerlerdedir. Aşağıdaki Şekil 3.14.'de tipik bir vakum buharlaştırma sistemi görülmektedir.



Şekil 3.14. Gebze Üniversitesi'nde kullanılan vakum buharlaştırma cihazı

Pentasen, ftalosiyanin (phthalocyanine), oligotiyofen, gibi organik küçük moleküllerle oluşturulan ince film yüzeyler bu teknik kullanılarak meydana getirilir. Bununla birlikte, vakum buharlaştırma tekniğinin başlıca dezavantajları, karmaşık cihazlardan meydana gelmesi ve polimer yapılı materyallere uygun olmamasıdır [80].

### 3.7.2. Langmuir-Blodgett tekniği

Langmuir-Blodgett (LB) ince film, bir tür çok ince kalınlıklı ve düzenli yapılı ince film olarak bilinir. Langmuir-Blodgett tekniği ise moleküler düzeyde oluşturulan filmin yapısını ve kalınlığını iyi bir şekilde kontrol edebilen bir tekniktir [81].

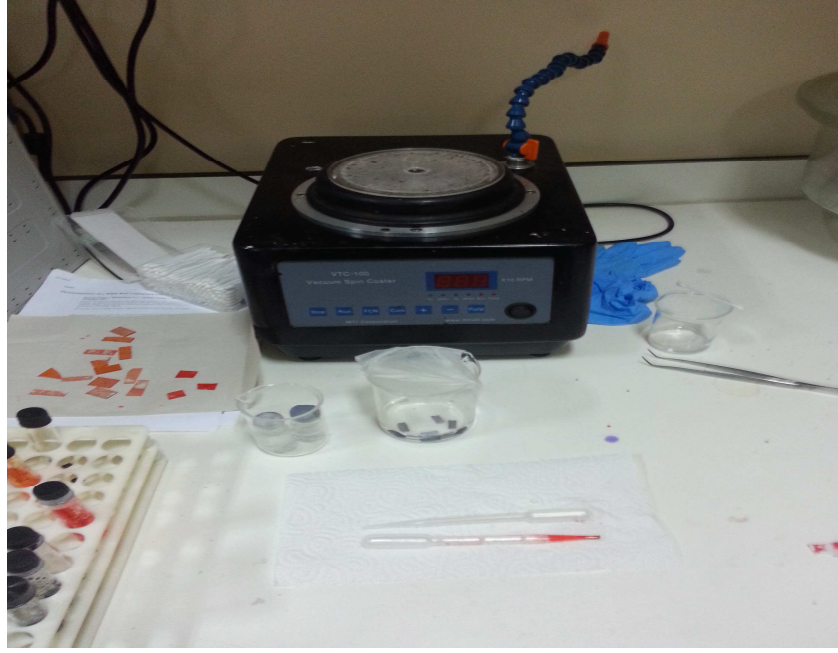
Langmuir-Blodgett tekniği, bilinen dikey daldırma tekniklerinden biridir. Bu teknik kullanılarak, neredeyse hiç hatasız tek moleküler tabaka (monolayer) elde edilebilir. Fakat bu teknik, hidrofobik zincir ve hidrofobik baş grup içeren sınırlı sayıdaki moleküllerde organik alan etkili transistör materyali olarak kullanılabilir [80].

### 3.7.3. Çözelti prosesli döndürerek kaplama yöntemi

Döndürerek kaplama yöntemi polimer özellikli materyaller için kullanılan en yaygın yöntemdir. Seçilen çözelti damlatılarak veya numunenin bir kısmına dökülerek, kullanılan çözücünün kontrollü olarak buharlaşması sağlanır. İşlem sonunda, ince film tabaka elde edilir.

Bu teknikte kullanılan organik maddenin, iyi çözünebilme özelliğine sahip olması gerekir. Elde edilen ince film tabakanın kalınlığı, kullanılan çözeltinin konsantrasyonuna ve döndürme kaplama cihazının (spin coating) döndürme hızına bağlıdır [80].

Şekil 3.15.'de döndürerek kaplama cihazı ile hazırlanan birkaç numune gösterilmektedir.



Şekil 3.15. Döndürme kaplama yöntemi ile oluşturulan ince film tabaka numuneleri

Organik yarıiletkenler erime noktaları, çözünebilirlikleri 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 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 kullanılanlardır.

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 zayıatı gaz fazda kaplama tekniklerin önemli sorunlarındanndır.

OTFT fabrikasyonunda ilk kullanılan teknik ekran baskı (screen printing) tekniğidir. Cihazın önemli elementleri bir paslanmaz çelik maske yardımı ile çözelti fazında kaplanırdı [82,83]. Bu basit teknik ile kaplanan cihazların performansları konvansiyonel teknikler ile üretilen cihazların performansları ile kıyaslanabilir olmasına rağmen, çözünürlüğü 35-100  $\mu\text{m}$  arasındaydı ve realisttik uygulamalar için gerekli kritik değerden yüksekti. Bu problemin üstesinden gelebilmek için Bell laboratuvarlarındaki bir araştırma grubu çözünürlüğü 2  $\mu\text{m}$  boyutlarına indirebilen bir yüksek çözünürlüklü baskı tekniği geliştirmiştir [84].

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 assemble monolayer)) oluşturmak için elestomerik damgalar kullanılmıştır [85]. Uygun bir alt katman üzerine altın tabakasının kaplanması ile üreilmeye başlanan transistör üst kapı geometrisine sahiptir. Özel olarak dizayn edilmiş damga, altın tabakasının üzerinde SAM deseni elde etmek için kullanılmıştır. Sonra, kaynak ve savak 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.

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 (20-5  $\mu\text{m}$ ). Cambridge Üniversitesi'nde bir çalışma grubu bu sorunun üstesinden gelebilmek için damlacık saçılımlarını bir püskürtme deseni şeklinde, cihazın boyutlarını belirleyen hidrofobik bölgelere hapsedmiştir [86]. 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'da termal görüntüleme bazlı bir kuru yöntem geliştirilmiştir. Bu teknik ile organik malzemelerin yüksek hızda ve mikron boyutlu çözünürlüklerde kaplanabildiği iddia edilmektedir. Bu teknik esnek bir filmde ince bir katı tabakanın başka bir esnek filme transfer edilmesi prensibi ile çalışır. İki esnek film birlikte vakumda tutulur.

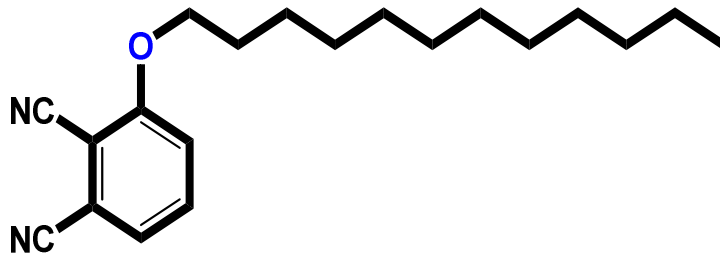
Lazer ışını tarafında üretilen ısı, verici özelliği olan ince filme odaklanır. Işığın ısıya dönüşümünün sonucunda verici özellikli ince filmin en üst katmanı gaz fazına dönüşür ve alıcı özellikli diğer ince filme kaplanır. Ancak bütün iletken polimerler üretilen ısıya karşı böyle tepki göstermezler.

## BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 4.1. CoPc'nin Yapısı

#### 3-(Undesiloksi)ftalonitril (1)

1-Dodecanol (1.07 g, fazla) kuru DMF (10 cm<sup>3</sup>) içinde çözüldü ve daha sonra susuz K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (~2.0 g) eklendi. N<sub>2</sub> atmosferinde 40 °C'de DMF'ye (10 cm<sup>3</sup>) damla damla 3-nitrophthalonitrile (2.0 g) ilave edildi. Bu reaksiyon karışımı etkili bir şekilde karıştırıldı ve 2 gün süre ile 40 – 45 °C'de ince tabaka kromatografisi ile inert atmosfer altında izlendi. Sonra reaksiyon karışımının içerisine oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra 300 cm<sup>3</sup> buzlu su döküldü. Krem çözelti süzülme ve nötr hale gelinceye kadar su ile yıkandı. Ham ürün kloroform içinde çözülmüş ve reaksiyona girmemiş alkolün fazlası başlangıç bileşiklerini çıkarmak için % 5 NaHCO<sub>3</sub> ile yıkandı. Krem çözelti daha sonra susuz Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> üzerinde kurutuldu ve süzülme. Solvent, kremi bir pudra verecek şekilde düşük basınç altında tutuldu. Böylece 3-(undesiloksi)ftalonitril üretilmiş oldu.

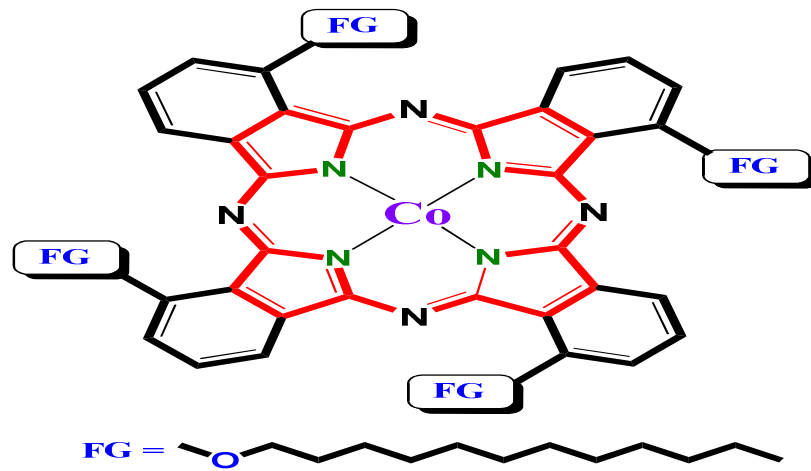


Şekil 4.1. 3-(undesiloksi)ftalonitril'in kimyasal yapısı

#### [Co] 2(3), 9(10), 16(17), 23(24)-tetrakis undesiloksi ftalosiyenin (2)

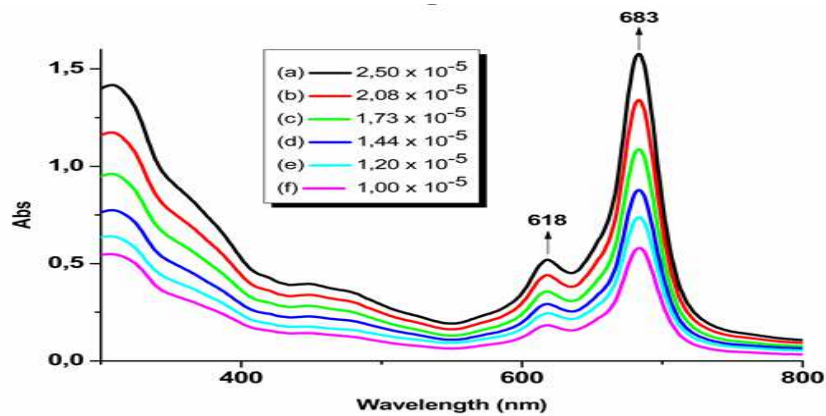
Sızdırmaz tüp içindeki DBU (0,05 cm<sup>3</sup>) ve *n*-hexanol (~1,0 cm<sup>3</sup>) inert N<sub>2</sub> atmosferi altında 30 dakika süre ile 150 °C altında bu karışım toz haline getirilmiştir. Daha

sonra susuz  $\text{CoCl}_2$  (0.04 g) Co tuzu ilave edildi. Isıtıldıktan ve 6 saat karıştırıldıktan sonra, koyu yeşil mavi bir ürün oda sıcaklığına kadar soğutuldu ve süzülen katı madde berrak hale gelene kadar yabancı maddeleri uzaklaştırmak için soğuk asetonitril, izopropanol ve su,  $\text{CH}_3\text{CN}$  ve sıcak metanol madde ile yıkandı. Yeşil – mavi ürün THF-MeOH (50/1 v/v) silika jel kromatografisiyle izole edildi. Karışım vakumda kurutuldu. Daha sonra ikinci sütun sephadex üstünde kromatografi (5%  $\text{CH}_3\text{OH}/\text{CHCl}_3$ , yıkayıcı) ile yeniden saflaştırıldı.



Şekil 4.2. CoPc'nin kimyasal yapısı

Bu çalışmada CoPc'nin soğurma spektrumları THF içinde farklı konsantrasyonlarda incelenmiştir. Şekil 4.3.'de görüldüğü gibi, CoPc konsantrasyonu artmasıyla Q bandı yoğunluğu artmış ve yeni bir toplu gruplaşma gözlenmiştir. Beer-Lambert Kanunu aralığına CoPc'nin de uyduğu gözlenmiştir. ( $1,0\text{-}2,5 \times 10^{-5} \text{ mol dm}^{-3}$ )



Şekil 4.3. CoPc'nin farklı konsantrasyonlarda soğurma spektrumu

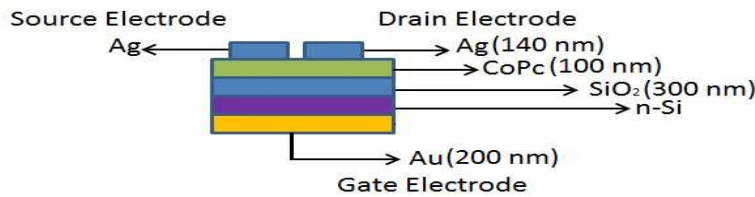


#### 4.2. CoPc Tabanlı OFET'in Hazırlanışı

İlk olarak ticari yollarla alınan ve üzerinde 300 nm oksit tabakası bulunan n tipi silisyum wafer uygun ölçülerde kesilmiş, teknik solventler kullanılarak ultrasonik titreştirici yardımıyla temizlenmiş ve üzerine argon gazı tutulmuştur. Böylelikle OFET üretimi için inert bir yüzey oluşturulmuştur. Temizlenen waferın altından kapı kontağı alınabilmesi için fiziksel buharlaştırma metodu (PVD) kullanılarak  $7,6 \times 10^{-6}$  torr basınçta Au elektrotu kaplanmıştır. Daha sonra özel olarak sentezlenen CoPc kloroform ile 5mg/ml olacak şekilde çözülmüştür.

Silisyum üzerinde bulunan ve OFET'de yalıtıcı olarak kullanılacak olan oksit tabakasının üzerine CoPc spin coater yardımıyla yaklaşık 1800 rpm de 30 saniye boyunca döndürülerek kaplanmıştır. Son olarak CoPc üzerine yani yarıiletken tabaka üzerine yine PVD metodu kullanılarak Ag metali kaynak ve savak elektrodu olarak  $8,1 \times 10^{-6}$  torr basınçta kaplanmış ve OFET üretilmiştir. Üretilen OFET üst kontak alt kapı tasarımı ile Şekil 4.4.'deki gibi elde edilmiştir. Burada kaynak ve savak elektrotları arası mesafe 30 mikron ve her birinin genişliği 4 mm olacak şekilde bir shadow maske kullanılmıştır. Yani  $L=30\mu\text{m}$  ve  $W=4\text{ mm}$ 'dir. Silisyum wafer üzerindeki oksit tabakasının kapasitansı  $C=10\text{ nF/cm}^2$ 'dir ve kullandığımız ölçülerde yüzeyimiz  $2\text{ cm}^2$  olduğu için kapasitansımız 20 nF'dir.

CoPc kompozit malzemesinin yeni sentezlenmiş olması, bizi bu malzemenin UV karakteristiğini incelemeye ve band gap değerini bulmaya götürmüştür. Bunun için; tıpkı OFET üretmek için  $\text{SiO}_2$  waferın temizlendiği gibi bir cam yüzey temizlenmiş ve yine hazırlanan çözelti, tıpkı  $\text{SiO}_2$  üzerine kapladığımız gibi tamamen aynı şartlarda bu cam yüzeyin üzerine spin coater ile 1800 rpm de 30 saniye süreyle kaplanmıştır.



Şekil 4.4. SiO<sub>2</sub>/CoPc tabanlı OFET için ortak geometrik üst kontak şeması

### 4.3. Karakterizasyon

Bizim numunemizin akım – voltaj karakteristiği Keithley 2612A cihazı kullanılarak incelenmiştir.  $V_{DS} - I_{DS}$  eğrileri için altı farklı kapı voltajı kullanılmıştır. Numunenin ıkış ve transfer değerleri Keithley 2612A ile ölçüldü.

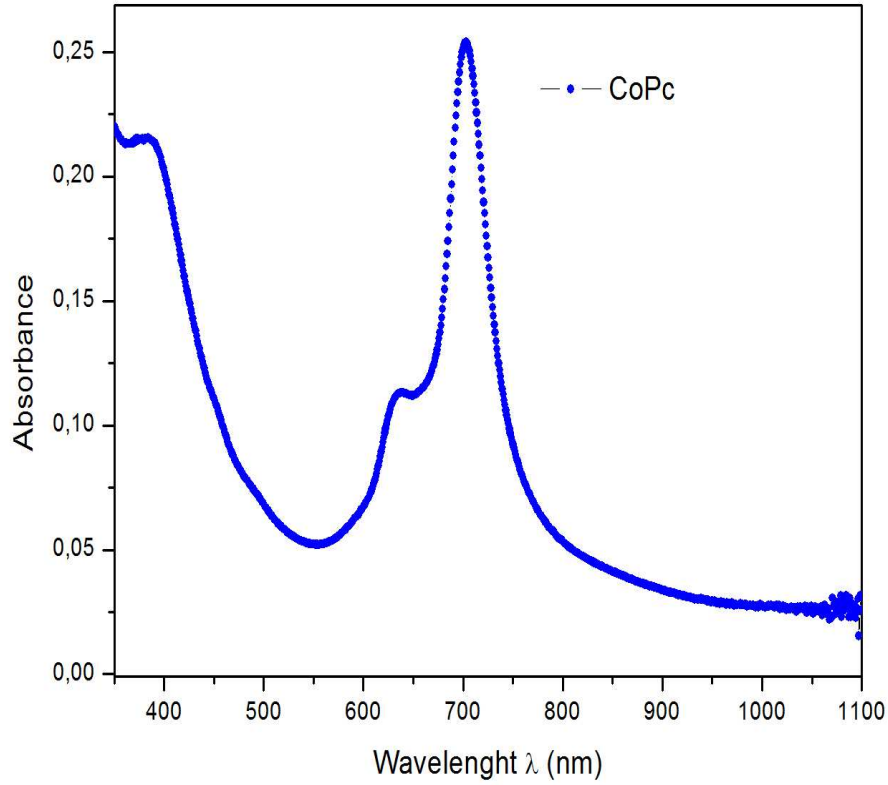


şekil 4.5. Keithley 2612A cihazı

## BÖLÜM 5. BULGULAR

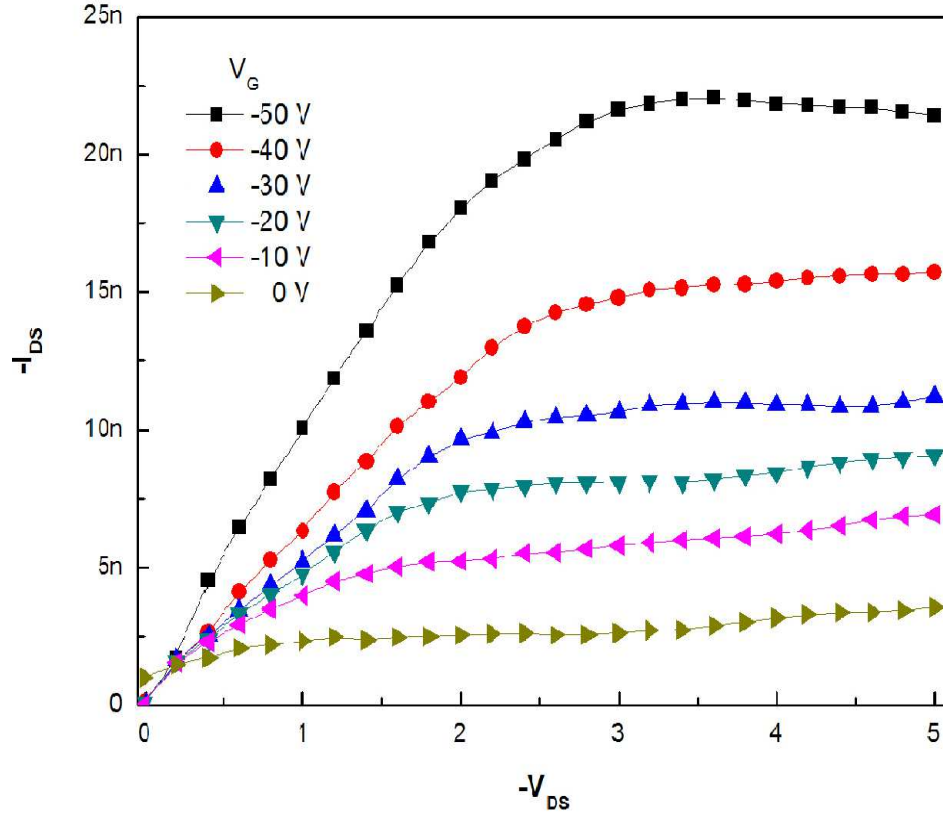
### 5.1. CoPc'nin Enerji Aralığı ve UV Karakteristiğinin İncelenmesi

Cam üzerine kaplanarak hazırlanan CoPc'nin UV karakteristiği soğurma spektrumu ile Şekil 5.1.'deki gibi elde edilmiştir. Bu eğri dalga boyuna karşı soğurma grafiğidir. Grafiğe göre, hazırlanan numune 700 nm civarında soğurma piki vermektedir. Bu grafik yardımıyla yeni özel sentez CoPc'nin enerji aralığı değeri yaklaşık olarak 1,63 eV olarak bulunmuştur. Bu değer organik elektronik cihazların üretimi için kullanılan organik yarıiletkenlerin enerji aralığı değerleriyle oldukça uyumludur.



Şekil 5.1. CoPc'nin UV spektrofotometresi, dalgaboyuna karşılık soğurma grafiği

## 5.2. CoPc/SiO<sub>2</sub> Tabanlı OFET'in Akım-Voltaj Karakteristiğinin İncelenmesi

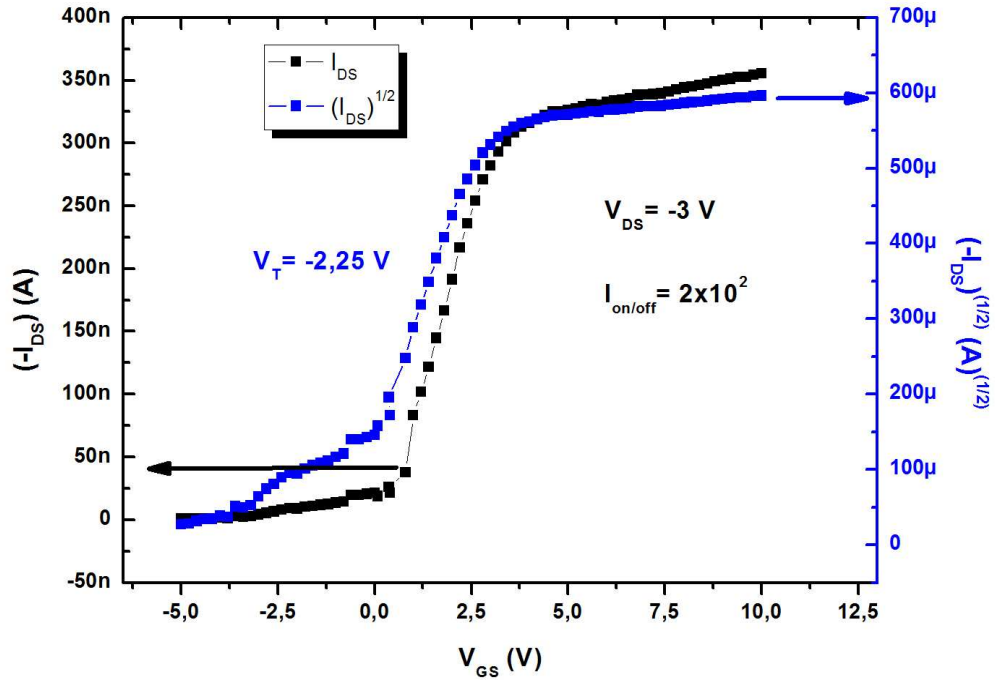


Şekil 5.2.  $I_{DS}$  -  $V_{DS}$  negatif çıkış eğrilerine bağlı SiO<sub>2</sub> /CoPc tabanlı OFET'in farklı  $V_{GS}$  potansiyelleri

Öncelikle hazırlanan OFET üzerindeki CoPc'nin kalınlığı bir SEM cihazı kullanılarak ölçülmüştür. SiO<sub>2</sub>'in tabakasının kalınlığı daha öncede belirtildiği gibi 300 nm'dir. CoPc/SiO<sub>2</sub> tabanlı OFET'in transfer karakteristiği ve verimi şu şekildedir; W/L sırasıyla 4000µm/30µm'dir. Bu cihaz -3 V çalışma gerilimi altında çok iyi sonuçlar verir ( $V_{GS} = 0, -50V$ ). CoPc/SiO<sub>2</sub> tabanlı OFET için, alan etkili mobilite  $2,01 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$  olarak elde edilmiştir. Şekil 5.2.'de  $V_{DS}$ - $I_{DS}$  grafiğinde altı farklı kapı voltajı görülmektedir.

Aynı OFET için Şekil 5.3.'de görüldüğü gibi  $V_{DS} = -3 \text{ V}$  alınarak  $I_{DS}$  eğrisine karşı  $V_{GS}$  değerleri de elde edilmiştir.  $I_{on}/I_{off}$  değerlerine ulaşmak için akım değerlerinin logaritması alınmıştır. Bu grafikte de görüldüğü gibi CoPc/SiO<sub>2</sub> tabanlı OFET için  $I_{on}/I_{off}$  değerleri  $2 \times 10^2$  olarak bulunmuştur.

Şekil 5.3.'de görülen mavi eğri kullanılarak, alan etkili mobilite  $\mu_{FET}$   $V_{GS}$  çıkış eğrisine karşı  $|I_{DS}|^{0,5}$  eğrisinin arasındaki kısmın eğiminden hesaplanabilir. Ayrıca, bu grafikte x eksenine kesişen nokta bize eşik voltajını verir.

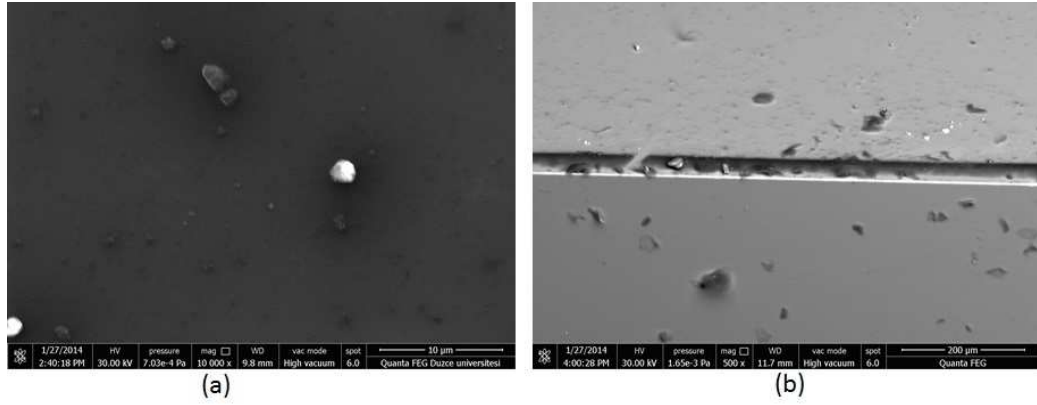


Şekil 5.3. SiO<sub>2</sub>/CoPc tabanlı OFET'in  $I_{DS}$ - $V_{GS}$  ve  $(I_{DS})^{(1/2)}$ - $V_{GS}$  karakteristik eğimi ( $V_{DS} = -3$ )

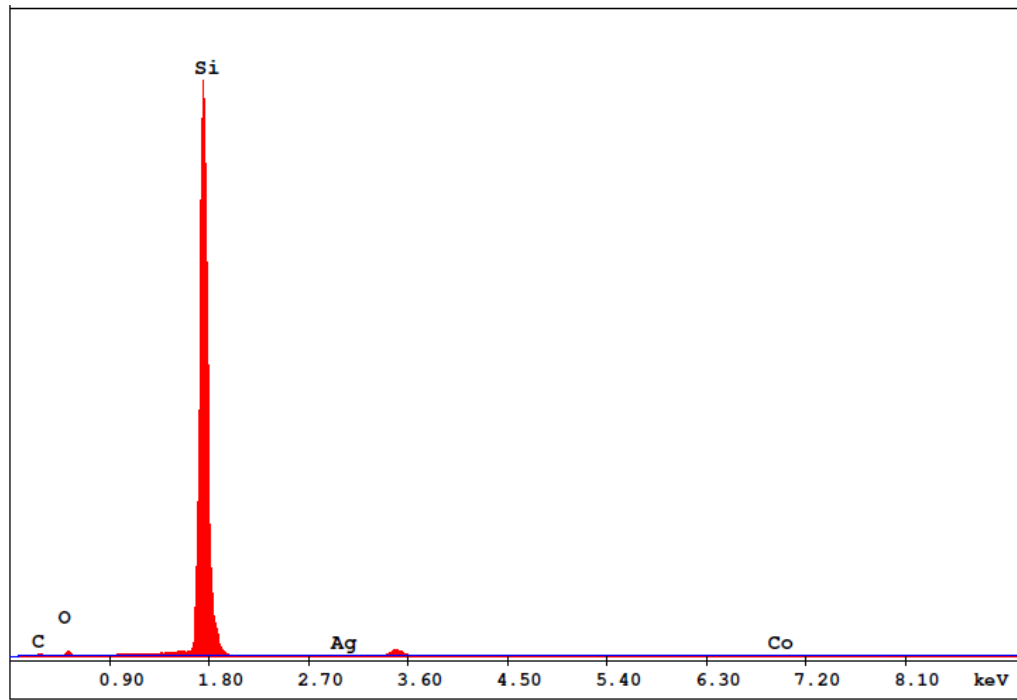
$$\mu_{FET} = \frac{2L}{WC_i V_{DS}} \left( \frac{\partial \sqrt{I_{DS}}}{\partial V_{GS}} \right)^2$$

Yukarıda verilen eşitlikte gösterilen formülü uygulayarak elde edilen en iyi eğriyi kullanarak CoPc/SiO<sub>2</sub> tabanlı OFET'in mobilitesi hesaplanmıştır.

Hazırlanan CoPc OFET'in SEM görüntüleri alınarak EDAX analizi yapılmıştır. Analiz sonucu cihaz yüzeyinde Co atomu var olduğu tespit edilmiştir. Bu analiz sayesinde kaplamanın yüzey üzerinde gerçekleştiği de söylenebilir. Elde edilen SEM görüntüleri ve EDAX analizi Şekil 5.4. ve Şekil 5.5.'de verilmiştir.



Şekil 5.4. CoPc OFET cihazının (a)Yüzeyden (b) Kesitden alınan SEM görüntüleri



Şekil 5.5. CoPc OFET'in yüzeyden alınan EDAX analizi

Şekil 5.5.'de cihazımızın yüzeyinden EDAX analizi yapılmıştır. Bu analize göre silisyum en çok bulunan element olarak görünmektedir. Bunun yanı sıra karbon ve oksijen de bulunmaktadır. Oksijenin varlığı ise silisyum üzerinde bulunan oksit tabakasından kaynaklanmaktadır. Karbonun varlığı ise CoPc'nin yapısındaki karbonlardan kaynaklanmaktadır. CoPc'nin yapısına bakıldığında molekülün her tarafında karbonların olması ve sadece merkezde kobalt olması kobalt miktarının oldukça az olduğunu göstermektedir. EDAX analizine göre bu az oranda bile yüzeyde kobalt bulunmuştur.

## BÖLÜM 6. SONUÇ

Kobalt ftalosiyenin (phthalocyanine) gibi kompozit bir molekülün OFET karakteristiği vermesi oldukça ilgi çekicidir. Bu durum OFET uygulamalarında sadece polimerik malzemelerden değil aynı zamanda tek kristal ve metal katkılı ftalosiyenin (mettalphthalocyanine) gibi malzemelerin de organik elektronik cihaz üretiminde bizlere ümit vermesini sağlamaktadır. Organik tek kristal malzemeler veya mettalphthalocyanine gibi malzemeler kolay ve ucuz üretimleri sayesinde organik elektronik cihazların performansının iyileştirilmesi ile ilgili çalışmaları daha ilgi çekici hale getirecektir. Diğer taraftan SiO<sub>2</sub> gibi bir yalıtkan malzeme seçimi bu tür cihazlarda arayüzey durumlarında meydana gelen bozulma ve uyumsuzluk nedeniyle her zaman iyi sonuç vermemektedir. Yine de ftalosiyenin türevi malzemenin yeni bir yöntemle özel olarak sentezlenmiş olması ve OFET'lerde aktif katman olarak çalışması literatüre gözle görülür derecede katkı sağlamaktadır.

Bu çalışma kapsamında üretilen OFET cihazında inorganik/organik ara yüz uyumsuzluğu nedeniyle SiO<sub>2</sub> dielektrik tabaka CoPc tabaka ile iyi bir ara yüz özelliği göstermemiştir. Diğer taraftan, bizim numunemizin mobilitesi ve onun performansı polimerik tabanlı transistörlere kıyasla oldukça yüksek bulunmuştur. Buna ek olarak cihazın performansında ftalosiyenin gibi organik bir yarıiletkenin etkili olduğu da göz önünde bulundurulmalıdır.

## KAYNAKLAR

- [1] Chiang, C. K., Fincher, C. R., Park, Y. W., Heeger, A. J., Shirakawa, H., Louis, E. J., Gau, S. C., Macdiarmi, A. G., Electrical Conductivity in Doped Polyacetylene, 39, 1098, 1977.
- [2] Tang, C.W., Two Layer Organic Photovoltaic Cell, 48, 183, 1986.
- [3] Tang, C.W., Organic Electroluminescent Diodes, 23, 913, 1987.
- [4] Tsumura, K., Koezuka, T., Macromolecular Electronic Device: Field-Effect Transistor with a Polythiophene Thin Film, 49, 1210, 1986.
- [5] Lilienfeld, J. E., Transparent Oxide Electronics, 1, 745, 175, 1930.
- [6] Kahng, D., Atalla M. M., Silicon-Silicon Dioxide Field Induced Surface Devices, IRE Solid-State Devices Research Conference, Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh, 1960.
- [7] Heeger, J., Kivelson, Schrieffer, J.R., Su, W. P., Solution in Conducting Polimers, Rev Mod. Phys. 60, 781-850, 1988.
- [8] Koezuka, H., Tsumura, A., Ando, T., Field Effect Transistor with Polythiophene Thin Film, Proceedings of the International Conference of Science and Technology of Synthetic Metals, 1987.
- [9] Dimitrakopoulos, C. D., Malenfant, P. R. L., N-type Organic Thin-Film Transistor With High Field-Effect Mobility Based On A N,N 8-dialkyl-3,4,9,10-perylene Tetracarboxylic Diimide Derivative, Adv. Mater, 14, 99, 2002.
- [10] Horowitz, G., Organic Thin Film Transistors: From Theory to Real Devices, J. Mater. Res. 19, 1946.
- [11] Yanagi, H., Araki, Y., Ohara, T., Hotta, S., Ichikawa, M., Taniguchi, Y., Comparative Carrier Transport Characteristics in Organic Field-Effect Transistors with Vapour-Deposited Thin Films and Epitaxially Grown Crystals of Biphenyl-Capped Thiophene Oligomers. 13, 767, 2003.
- [12] Yıldırım, F. A., Schlieve, R. R., Bauhofer, W., Meixner, R. M., Goebel, H., Krautschneider, W., Organic Electronics, 9, 70, 2008.



- [13] Torrent, M. M., Masirek, S., Hadley, P., Crivillers, N., Oxboty, N. S., *Organic Electronics* 9, 143, 2008.
- [14] Han, H., Kim, Y. H., Lee, S. H., Choi, M. H., Jang, J., Choo, D. J., *Organic Electronics*, 9, 1040, 2008.
- [15] Singh, T. B., Sarıçiftçi, N. S., *Progress in Plastic Electronics Device*, *Annu. Rev. Mater. Res.* 36, 199-230, 2006.
- [16] Koeningsberger, J., Weiss, J., *Ann. Phys.* 35, 1-46, 1911.
- [17] Stahl, F. A., *An Enlightening History of the Emergence of Semiconductors Can Be Found in: Am. J Phys.* 71, 1170-1173, 2003.
- [18] <http://en.wikipedia.org/Semiconductor>, Erişim Tarihi: 22.11.2014.
- [19] Hage, K., *Organic Electronics, Materials, Manufacturing Applications*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 3-527-31264-1.
- [20] Bilgin, V., *ZnO Filmlerinin Elektrik, Optik, Yapısal ve Yüzeysel Özellikleri Üzerine Kalay Katkısının Etkisi*, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, 2003.
- [21] Eckertova, L., *Physics of Thin Films*, Plenum Press, 340, 1986.
- [22] Hass, G., Thun, R. E., *Physics of Thin Films Advances in Research and Development*, Academic Press, USA 5(3), 341-342, 1969.
- [23] Pejova, B., Grozdanov, I., *Structural and Optical Properties of Chemically Deposited Thin Films of Quantum-Sized Bismuth (III) Sulfide*, *Materials Chemistry and Physics* 99, 39-49, 2006.
- [24] Ebisawa, F., Kurokawa, T., Nara, S., *Bipolar Transistors*, *Journal of Applied Physics*, 54(2), 3255-3256, 1983.
- [25] Sze, S. M., *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons USA, 37, 868-869, 1981.
- [26] Devter, D. H., Seitz, H., *Field Effects of Dislocations on Mobilities in Semiconductors*, *Phys. Rev.* 86, 964, 1952.
- [27] Carswell, D. J., Ferguson, J., *Photo and Semi-conductance in Molecular Single Crystals*, *Nature*, 173, 736, 1954.
- [28] Fox, D., *Conducting States in Organic Molecular Crystals*, *J. Phys. Chem. Solids*, 8, 439, 1959.
- [29] Volmer, M., *Versuche zum Stromleitungsmechanismus in Flüssigkeiten niedriger*, *Annalen der Physik*, 40, 775, 1913.

- [30] Karl, N., Organic Semiconductors, Page 106. Springer, Berlin, 1985.
- [31] Bassler, H., phys. stat. sol. (b) 107, 9, 1981.
- [32] Silinsh, E. A., Organic Molecular Crystals. Springer, Berlin, 1980.
- [33] Pope, M., Swenberg, C. E., Electronic Processes in Organic Crystals. Clarendon Press, Oxford, 1982.
- [34] Skotheim, T. A., Handbook of Conducting Polymers. M. Dekker, New York, 1986.
- [35] Sahingöz, R., Soykan, C., Yakuphanoglu, F., Voigt, M., The Determination of the Conduction Mechanism and Extraction of Diode Parameters of ITO/PEDOT-PSS/POLYMER/Al Heterojunction Diode, 28, 962, 2006.
- [36] Yakuphanoglu, F., Electrical Characterization and Interface State Density Properties of the ITO/C70/Au Schottky Diode, J. Phys. Chem. C, 111, 1505, 2007.
- [37] Gündüz, B., Organik Yarıiletken Fotodiyotların Hazırlanması ve Optoelektronik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2007.
- [38] Horowitz, G., Organic Field-Effect Transistors, Adv. Mater., 10, No. 5. 267, 1998.
- [39] Leuw, D. M., Simenon, J. M. M., Brown, A. R., Einerhand, R. E. F., Stability of N type Doped Conducting Polymers and Consequences for Polymeric Microelectronic Devices, Synth. Met. 87, 53,1997.
- [40] Paloheimo, J., Stubb, H., Lahti, P. Y., Kuivalainen, P., Field- Effect Conduction in Polyalkylthiophenes, 41-43, 563, 1991.
- [41] Sirringhaus, H., Tessler, N., Friend, R. H., Integrated Optoelectronic Devices Based on Conjugated Polymers Science, 280, 5370, 1741, 1998.
- [42] Park, J., Park, S. Y., Shim, S., Kang, H., Lee, H. H., A Polymer Gate Dielectric for High-Mobility Polymer Thin-Film Transistors and Solvent Effects, Appl. Phys, Lett, 85, 3283, 2004.
- [43] Heeney, M., Stable Polythiophene Semiconductors Incorporating Thieno[2,3-b]thiophene, J. Am, Chem, Soc. 127, 1078, 2005.
- [44] Street, R. A., Salleo, A., Contact Effects in Polymer Transistors, Apply. Phys. Lett. 81, 2887, 2002.

- [45] Salleo, A., Chabinyc, M. L., Yang, M. S., Street, R. A., Polymer Thin Film Transistors with Chemically Modified Dielectric Interfaces, *Appl. Phys. Lett.* 81, 4383, 2002.
- [46] Kelley, T. W., Muires, D. V., Baude, P. F., Smith, T. P., Jones, T. D., High Performance Organic Thin Film Transistors *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 771, L6.5.1, 2001.
- [47] Eder, F., Klauk, H., Halik, M., Zschieschag, U., Schmid, G., Dehm, C., Organic Electronics on Paper, *Appl. Phys. Lett.* 84, 2673, 2004.
- [48] Stutzmann, N., Bunk, O., Nielsenn, M. M., Watson, M., Friend, R. H., Meso-Epitaxial Solution-Growth of Self- Organizing Discotic Liquid-Crystalline Semiconductors, *Adv. Mater.* 15, 495, 2003.
- [49] Singh, T., Marjanovic, N., Matt, G., Guenes, S., Sariçiftçi, N. S., High-Mobility N-Channel Organic Field-Effect Transistors Based on Epitaxially Grown C60 Films, *Organic Electronics*, 6, 105-110, 2005.
- [50] Hotta, S., Waragai, K., Alkyl-Substituted Oligothiophenes: Crystallographic and Spectroscopic Studies of Neutral and Doped Forms, *J. Mater. Chem*, 1, 835, 1991.
- [51] Horowitz, G., Hajloui, M. E., Mobility in Polycrystalline Oligothiophene Field-Effect Transistors Dependent on Grain size, *Adv. Mater.* 12, 1046-1050, 2000.
- [52] Halik, M., Klauk, H., Schmid, G., Kirchmeyer, S., Weber, W., Relationship Between Molecular Structure and Electrical Performance of Oligothiophene Organic Thin Film Transistors, *Adv. Mater.* 15, 917, 2003.
- [53] Bao Z., Lovinger, A. J., Dodabalapur, A., Soluble and Processable Regioregular poly(3-hexylthiophene) for Thin Film Field-Effect Transistor Applications with High Mobility, *Appl. Phys. Lett.* 69, 4108, 1996.
- [54] Zang, J., Wang, J., Wang, H., Yan, D., Organic Thin-Film Transistors in Sandwich Configuration *Appl. Phys. Lett.* 84, 142, 2004.
- [55] Lin, Y. Y., Gundlach, Y. Y., Nelson, S. F., Jackson, T. N., Pentasen Layer Organic Thin-Film Transistors with Improve Characteristics, *IEEE, Electron, Devices, Lett.* 18, 606, 1997.
- [56] Kelley, T. W., Muires, D. V., Baude, P. F., Smith, T. P., Jones, T. D., Organic Transistors, *Symposium, Process*, 169-179, Melbourne, Avustralya, 11 May, 2003.
- [57] Eder, F., Klauk, H., Halik, M., Zscheischang, U., Schmid, G., Dehm, C., Organic Electronics on Paper, *Appl. Phys. Lett.* 84, 2673, 2004.

- [58] Kastner, J., Paloheimo, J., Kuzmany, H., *Electron Properties of High-Tc Superconductors*, Springer series in solid state sciences, Springer, New York, 2002.
- [59] Haddon, R. C., Perel, A. S., Morris, R. C., Palstra, T. T. M., Hebard, A. F., *C60 Thin Film Transistors*, 67, 121, 1995.
- [60] Kobayashi, S., Takenobu, T., Mori, S., Fujiwara, S., Iwasa Y., *Fabrication and Characterization of C60 Thin-Film Transistors with High Field Effect Mobility*, 82, 4581, 2003.
- [61] Singh, Th. B., Erten, S., Güneş S., Zafer, C., Türkmen, G., Kuban, B., Teoman, Y., Sarıçiftçi, N. S., İçli, S., *Soluble Derivatives of Perylene and Naphthalene Dimide for N-Channel Organic Field-Effect Transistors*, 7, 480-489, 2006.
- [62] Singh, B., Senkarabacak, P., Sarıçiftçi, N. S., Tanda, A., Lackner, C., Hagelauer, R., Horowitz, G., *Organic Inverter Circuits Employing Ambipolar Pentacene Field-Effect Transistors*, *Appl. Phys. Lett.* 89, 033512-1, 2006.
- [63] Singh, B., Marjanovic, N., Matt, G. J., Sarıçiftçi, N. S., Schwodiauer, R., Bauer, S., *Nonvolatile Organic Field-Effect Transistor Memory Element with A Polymeric Gate Electrode*, *Appl. Phys. Lett.*, 85, 5409, 2004.
- [64] Matt, G. J., Singh, B., Sarıçiftçi, N. S., Montaigne, D., Ramil, A., Sitter, H., *Switching in C60-Fullerene Based Field Effect Transistors*, *Appl. Phys. Lett.* 88, 263516, 2006.
- [65] Vollhardt, K. P. C., *Organische Chemie*, VHC-Verlag, Weinheim, 1990.
- [66] Karl, N., Marktanner, J., *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 355, 149, 2001.
- [67] Karl, N., *Charge Carrier Mobility in Organic Crystals*, *Organic Electronic Materials*, Springer, 2001.
- [68] Bassler, H., *phys. stat. sol. (b)* 107, 9, 1981.
- [69] Klauk H., Halik, M., Szchieschang, U., Schmind, G, Dehm, C., *Appl. Phys. Lett.* 84, 2673, 2004.
- [70] Kahng, D., Atalla, M. M., *IRE Solid-State Devices Research Conference*, Pittsburg, PA, US Patent 3,102, 230, 1963.
- [71] Weimer, P. K., *Fabrication of A Planar Water Gated Organic Field Effect Transistor Using A Hydrophilic Polythiophene for Improved Digital Inverter Performance*, *Applied Physics*, 50, 1462-1469, 1962.

- [72] Spear, W. E., Effective Mobility in Amorphous Organic Transistors: Influence of the Width of the Density of States, *Non-Crystall Solids*, 8(10), 727-738, 1972.
- [73] Neudeck, G. W., Malhotra, A. K., Characterization of Partially Dissipated Solitons in A Traveling-Wave Field-Effect Transistor, *Solid State Electron.*, 19(5), 721-729, 1976.
- [74] Ryu, K., Kymissis, I., Bulovic, V., Sodini, C. G., Direct Extraction of Mobility in Pentacene OFETs Using C–V and I–V Measurements, *IEEE Electron Device Letters*, 10, 2005.
- [75] Yoon, M. H., Facchetti, A., Marks, T. J.,  $\sigma$ - $\pi$  Molecular Dielectric Multilayers for Low-Voltage Organic Thin-Film Transistors. *PNAS* 102, 4678-4682, 2005.
- [76] Kawase, T., Shimoda, T., Newsome, C., Sirringhaus, H., Friend, R. H., *Thin Solid Films*, 438, 279, 2003.
- [77] Sze, S. M., *Semiconductor Devices, Physics Technology*, 2, 220, 2001.
- [78] Nalwa, H. S., High Performance Top-Gate Field-Effect Transistors, *Handbook of Organic Electronics and Photonics*, 3(4), 153-176, 2003.
- [79] Stadler, P., Hysteresis in Bio-Organic Field-Effect Transistors, Diploma Thesis at Linz Institute of Organic Solar Cells, 2006.
- [80] Sun, Y., Lin, Y., Zhu, D., *Advances in Organic Field-Effect Transistors*, *J. Mater. Chem*, 15, 53-65, 2005.
- [81] Roberts, G., *Langmuir-Blodgett Films*, Plenum Press, New York, 15, 53-65, 2005.
- [82] Garnier F., Hajloui, R., Yassar, A., Srivastava, P., New Method for the Extraction of Bulk Channel Mobility and Flat-Band Voltage in Junctionless Transistors, *Science*, 265, 1684-1686, 1994.
- [83] Bao, Z. N., Feng, Y., Dodabalapur, A., Raju, V. R. A., Lovinger, J., Flexible Thin-Film Transistors Using Multistep UV Nanoimprint Lithography”, *Chemical Materials*, 9, 1299-1300, 1997.
- [84] Rogers, J. A., Bao, Z. N., Makhija, A., Braun, P., Characteristics of Thin-Film Transistors, *Advance Materials*, 11, 741-745, 1999.
- [85] Xia, Y., Whitesides, G. M., Angrew, S., In-situ Study of pn-Heterojunction Interface States in Organic Thin Film Transistors”, *Chemical Education*, 37, 550-575, 1998.

- [86] Sirringhaus, H., Kawase, T., Friend, R. H., Shimoda, T., Inbasekaran, M., Wu, W., Woo, E. P., Enhancing the Performance of Organic Thin-Film Transistors Using An Organic-Doped Inorganic Buffer Layer, *Science*, 290(1), 2123-2126, 2000.

## **ÖZGEÇMİŞ**

Cihat İlık, 1989 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2007 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nde başladığı lisans eğitiminden 2011 yılında mezun oldu. Ayrıca lisans eğitimi sırasında 2008–2009 öğretim yılında Fen Edebiyat Fakültesi Öğrenci Konseyi Başkanlığı yaptı. 2012 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümü'nde başladığı yüksek lisans eğitimine halen devam etmektedir.