

**FARKLI KAPI YALITKANLARI ÜZERİNE ÜRETİLEN PENTASEN  
TABANLI ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLERİN ELEKTRİKSEL  
KARAKTERİZASYONU**

**Şerif RÜZGAR**

**DOKTORA TEZİ**

**Katıhal Fiziği Bilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Müjdat ÇAĞLAR**

**Eskişehir**

**Anadolu Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Ekim, 2017**

*Bu tez çalışması BAP Komisyonunca kabul edilen 1501F030 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.*

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Şerif RÜZGAR'ın "Farklı Kapı Yalıtkanları Üzerine Üretilen Pentasen Tabanlı Organik Alan Etkili Transistörlerin Elektriksel Karakterizasyonu" başlıklı tezi 06/10/2017 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca, Fizik Anabilim dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

	<u>Unvanı - Adı Soyadı</u>	<u>İmza</u>
Üye (Tez Danışmanı)	:Prof. Dr. Müjdat ÇAĞLAR	.....
Üye	:Prof. Dr. Saliha ILICAN	.....
Üye	:Prof. Dr. Deniz HÜR	.....
Üye	:Doç. Dr. Hakan USTA	.....
Üye	:Doç. Dr. Esra ALVEROĞLU	.....

.....  
Enstitü Müdürü

## ÖZET

# FARKLI KAPI YALITKANLARI ÜZERİNE ÜRETİLEN PENTASEN TABANLI ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLERİN ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU

Şerif RÜZGAR

Fizik Anabilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ekim, 2017

Danışman: Prof. Dr. Müjdat ÇAĞLAR

Bu tez çalışmasında, termal buharlaştırma yöntemi ile pentasen aktif tabakası farklı kapı yalıtkanları üzerine büyütülerek alt geçit ve üst kontak geometrisine sahip organik alan etkili transistörler (OFET) üretilmiştir. Üretilen OFET'lerin elektriksel performansları üzerinde kapı yalıtkanının etkisini incelemek amacıyla, ticari olarak satın alınan polimetilmetakrilat (PMMA), polivinil alkol (PVA), poli (4-Vinilfenol) (PVP), polistren (PS), poli (4-Metilstren) (P4MS) ve poli (4-vinilfenol-ko-metil metakrilat) (PVP\_co\_PMMA) organik yalıtkanları kullanılmış ve bu malzemeler sol jel spin kaplama yöntemi ile hazırlanmıştır. Bu malzemeler kapı yalıtkanı olarak tek başlarına kullanılmakla birlikte, aynı zamanda ikili organik/inorganik kapı yalıtkanlarının organik kısmında da kullanılmıştır. Bu ikili yapılarda inorganik kısım olarak sol jel spin kaplama yöntemi ile oluşturulan  $TiO_2$  ve anodizasyon yöntemi ile oluşturulan  $Al_2O_3$  yalıtkanları kullanılmıştır. Hazırlanan Pentasen tabanlı OFET'lerin elektriksel ölçümleri karanlık ortamda gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bu transistörlerden tek tabaka polimer yalıtkan temelli transistörlerin elektriksel karakterizasyonları farklı beyaz ışık şiddetleri altında gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan OFET'lerin, mobilite, eşik voltajı, açma/kapama oranı, alt-eşik salınım değeri, arayüzey tuzak yoğunluğu, fotoduyarlılık ve fototepki gibi elektriksel parametreleri hesaplanmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Organik alan etkili transistör, pentasen, kapı yalıtkanları, foto-OFET.

## **ABSTRACT**

# **ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF THE PENTACENE BASED ORGANIC FIELD EFFECT TRANSISTORS DEPOSITED ON VARIOUS GATE INSULATORS**

**Şerif RÜZGAR**

**Department of Physics**

**Anadolu University, Graduate School of Sciences, October, 2017**

**Supervisor: Prof. Dr. Müjdat ÇAĞLAR**

In this thesis, thermal evaporated pentacene active layer was deposited on various gate insulators to fabricate organic field effect transistors (OFETs) at bottom-gate top-contact geometry. Commercially purchased polymethyl methacrylate (PMMA), polyvinyl alcohol (PVA), poly(4-vinylphenol) (PVP), polystyrene (PS), poly(4-methyl styrene) (P4MS) and poly(4-vinylphenol-co-methyl methacrylate) (PVP\_co\_PMMA) gate dielectrics were used to investigate the influence of gate insulator on the OFETs performance and they were prepared by sol gel spin coating method. These materials were used as gate insulators both alone and in the organic part of bilayer organic/inorganic gate insulators. As inorganic gate dielectric parts, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> insulators formed by the anodization method and TiO<sub>2</sub> formed by the spin coating method were used in these bilayer structures. Electrical measurements of the pentacene based OFETs were performed under dark conditions. Then, the electrical characteristics of the monolayer polymer insulator based transistors were investigated under different white illumination intensities. The electrical parameters such as mobility, threshold voltage, on/off ratio, subthreshold voltage, interface trap density, photosensitivity and photoresponsivity of the fabricated OFETs were calculated.

**Keywords:** Organic field effect transistor, pentacene, gate insulators, photo-OFET.

## TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca araştırma imkanı sağlayan, bilgi ve birikimlerini esirgemeyen, yol gösteren, manevi destek ve ilgisini hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Müjdat ÇAĞLAR'a sonsuz saygı ve teşekkürleri bir borç bilirim.

Çalışmalarım sırasında önerileriyle beni yönlendiren, bilimsel bilgi ve tecrübelerine sık sık başvurduğum, yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Prof. Dr. Yasemin ÇAĞLAR'a şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım esnasında yardımlarını esirgemeyen tez izleme jürimde bulunan Prof. Dr. Saliha ILICAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme jürimde bulunan Prof. Dr. Deniz HÜR'e desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım esnasında bilgi ve tecrübesinden faydalandığım Arş. Gör. Dr. Seval AKSOY'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın gerçekleşmesine imkân sağlayan Anadolu Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü'nün değerli öğretim üyelerine ve Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün değerli yöneticilerine teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca hep yanımda olan, dualarını ve desteklerini benden hiç esirgemeyen tüm aileme, hoşgörüsü, sevgisi, fedakârlığı ve desteğiyle hep yanımda olan sevgili eşim Muhbet RÜZGAR'a, gönülden teşekkür ederim.

*Saygılarımla*  
*Şerif RÜZGAR*  
*Ekim, 2017*

## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

.....  
Şerif RÜZGAR

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI .....	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET .....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR .....	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BELGESİ .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
1. GİRİŞ VE AMAÇ .....	1
2. ORGANİK YARIİLETKENLER .....	7
2.1. Organik Yarıiletkenlerde Enerji Bantlarının Oluşumu .....	8
2.2. Organik Yarıiletkenlerde Taşıyıcı Transferi .....	10
2.2.1. Bant iletim modeli .....	11
2.2.2. Tünelleme iletim modeli .....	12
2.2.3. Sıçrama iletim modeli .....	12
2.2.4. Çoklu tuzaklama ve bırakma (MTR) modeli .....	14
2.3. Organik Yarıiletken Çeşitleri .....	15
2.3.1. Polimerler .....	15
2.3.2. Küçük moleküller .....	16
2.3.2.1. Pentasen .....	17
3. DİELEKTRİK MALZEMELER .....	20
3.1. İnorganik Dielektrik Malzemeler.....	22
3.1.1. Alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) .....	23
3.1.2. Titanyum dioksit ( $TiO_2$ ) .....	24
3.2. Organik dielektrik malzemeler .....	25
3.2.1. Polistren (PS).....	27
3.2.2. Polimetilmetakrilat (PMMA).....	28

	<u>Sayfa</u>
3.2.3. Poli (4-metilstren) (P4MS) .....	29
3.2.4. Polivinil Alkol (PVA) .....	30
3.2.5. Poli-4vinilfenol (PVP) .....	30
3.2.6. Polivinilfenol_ko_Polimetilmetakrilat (PVP_ko_PMMA).....	31
4. İNCE FİLM ÜRETİM TEKNİKLERİ.....	32
4.1. Vakum İçinde Buharlaştırma Yöntemi .....	32
4.2. Anodizasyon .....	34
4.2.1. Anodizasyon çalışma prensipleri.....	36
4.3. Spin kaplama yöntemi.....	38
4.3.1. Spin kaplama yöntemini etkileyen parametreler.....	39
4.3.2. Spin kaplama yönteminin avantajları ve dezavantajları .....	40
5. YARIİLETKEN TABANLI DEVRE ELEMANLARI .....	41
5.1. İnorganik Yarıiletken Tabanlı Devre Elemanları .....	41
5.2. Organik Yarıiletken Tabanlı Devre Elemanları.....	42
5.3. Organik Alan Etkili Transistörler (OFET) ve Karakteristikleri.....	44
5.3.1. OFET'lerin çalışma prensipleri.....	44
5.3.2. OFET'lerin mimarisi .....	47
5.3.2.1. Alt katman kapı/üst yüzey kontak .....	47
5.3.2.2. Alt katman kapı/alt yüzey kontak.....	48
5.3.2.3. Üst yüzey kapı/alt yüzey kontak.....	48
5.3.2.4. Üst yüzey kapı/üst yüzey kontak.....	49
5.4. OFET'lerin Akım Voltaj Karakteristikleri.....	49
5.4.1. Eşik voltajı ve alan etkili mobilite .....	50
5.4.2. Açma/kapama oranı ve alt eşik salınım değeri .....	52
6. OFET'LERİN ÜRETİMİ.....	54
6.1. Tek Tabaka Polimer Yalıtkanı ile Hazırlanan OFET'ler.....	54
6.1.1. ITO/PS/Pentasen OFET'inin hazırlanması.....	55
6.1.2. ITO/PMMA/Pentasen OFET'inin hazırlanması.....	56
6.1.3. ITO/P4MS/Pentasen OFET'inin hazırlanması .....	57
6.1.4. ITO/PVP/Pentasen OFET'inin hazırlanması.....	58
6.1.5. ITO/PVA/Pentasen OFET'inin hazırlanması .....	58
6.1.6. ITO/PVP_ko_PMMA/Pentasen OFET'inin hazırlanması.....	59

<b>6.2. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Polimer Çift Tabakalı Yalıtkanı ile Hazırlanan OFET'ler.....</b>	<b>60</b>
<b>6.2.1. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PS/Pentasen OFET'inin hazırlanması .....</b>	<b>60</b>
<b>6.2.2. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/P4MS/Pentasen OFET'inin hazırlanması .....</b>	<b>62</b>
<b>6.2.3. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP/Pentasen OFET'inin hazırlanması .....</b>	<b>63</b>
<b>6.2.4. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PMMA/Pentasen OFET'inin hazırlanması .....</b>	<b>63</b>
<b>6.2.5. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP_ko_PMMA/Pentasen'nin hazırlanması .....</b>	<b>64</b>
<b>6.3. TiO<sub>2</sub>/Polimer Çift Tabakalı Yalıtkanı ile Hazırlanan OFET'ler .....</b>	<b>65</b>
<b>6.3.1. ITO/TiO<sub>2</sub>/PS/Pentasen OFET'inin hazırlanması .....</b>	<b>65</b>
<b>6.3.2. ITO/TiO<sub>2</sub>/PMMA/Pentasen OFET'inin hazırlanması .....</b>	<b>66</b>
<b>6.3.3. ITO/TiO<sub>2</sub>/PVP/Pentasen OFET'inin hazırlanması .....</b>	<b>67</b>
<b>6.3.4. ITO/TiO<sub>2</sub>/PVP_ko_PMMA/Pentasen'in hazırlanması.....</b>	<b>67</b>
<b>7. OFET'LERİN KARAKTERİZASYONU .....</b>	<b>69</b>
<b>7.1. Üretilen OFET'lerin Kapasitans-Frekans Ölçümleri .....</b>	<b>69</b>
<b>7.2. Tek Tabaka Polimer Yalıtkan Tabakasına Sahip OFET'lerin</b>	
<b>Elektriksel Ölçümleri .....</b>	<b>71</b>
<b>7.2.1. ITO/PS/Pentasen OFET'inin çıkış ve transfer</b>	
<b>karakteristikleri.....</b>	<b>73</b>
<b>7.2.2. ITO/PMMA/Pentasen OFET'inin çıkış ve transfer .....</b>	
<b>karakteristikleri.....</b>	<b>76</b>
<b>7.2.3. ITO/P4MS/Pentasen OFET'inin çıkış ve transfer</b>	
<b>karakteristikleri.....</b>	<b>77</b>
<b>7.2.4. ITO/PVP/Pentasen OFET'inin çıkış ve transfer</b>	
<b>karakteristikleri.....</b>	<b>79</b>
<b>7.2.5. ITO/PVA/Pentasen OFET'inin çıkış ve transfer</b>	
<b>karakteristikleri.....</b>	<b>80</b>
<b>7.2.6. ITO/PVP_ko_PMMA/Pentasen OFET'inin çıkış ve transfer</b>	
<b>karakteristikleri.....</b>	<b>82</b>
<b>7.2.7. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Polimer Çift Tabakalı Yalıtkanı ile Hazırlanan .....</b>	
<b>OFET'lerin Elektriksel Ölçümleri .....</b>	<b>84</b>
<b>7.2.8. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PS/Pentasen OFET'inin çıkış ve transfer</b>	
<b>karakteristikleri.....</b>	<b>85</b>

7.2.9. Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /P4MS/Pentasen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri.....	87
7.2.10. Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /PVP/Pentasen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri .....	88
7.2.11. Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /PMMA/Pentasen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri.....	90
7.2.12. Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /PVP_ko_PMMA/Pentasen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri .....	91
7.3. TiO <sub>2</sub> /Polimer Çift Tabakalı Yalıtkanına Sahip OFET'lerin Elektriksel Ölçümleri .....	94
7.3.1. ITO/TiO <sub>2</sub> /PS/Pentasen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri .....	95
7.3.2. ITO/TiO <sub>2</sub> /PMMA/Pentasen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri.....	97
7.3.3. ITO/TiO <sub>2</sub> /PVP/Pentasen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri.....	98
7.3.4. ITO/TiO <sub>2</sub> /PVP_ko_PMMA/Pentasen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri .....	100
7.4. Üretilen OFET'lerin Histeresis Mekanizmaları .....	102
7.4.1. Tek tabaka polimer yalıtkanına sahip OFET'lerin histeresis mekanizmaları .....	103
7.4.2. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Polimer çift tabakalı yalıtkanına sahip OFET'lerin histeresis mekanizmaları.....	105
7.4.3. TiO <sub>2</sub> /Polimer çift tabakalı yalıtkanına sahip OFET'lerin histeresis mekanizmaları.....	106
7.5. Işığa Duyarlı OFET Çalışmaları .....	107
7.5.1. Aydınlanmanın ITO/PS/Pentasen OFET'i üzerindeki etkisi.....	109
7.5.2. Aydınlanmanın ITO/PMMA/Pentasen OFET'i üzerindeki etkisi.....	111

<b>7.5.3. Aydınlanmanın ITO/P4MS/Pentasen OFET’i üzerindeki etkisi .....</b>	<b>112</b>
<b>7.5.4. Aydınlanmanın ITO/PVP/Pentasen OFET’i üzerindeki etkisi.....</b>	<b>114</b>
<b>7.5.5. Aydınlanmanın ITO/PVA/Pentasen OFET’i üzerindeki etkisi.....</b>	<b>115</b>
<b>7.5.6. Aydınlanmanın ITO/PVP_ko_PMMA/Pentasen OFET’i üzerindeki etkisi.....</b>	<b>117</b>
<b>8. TARTIŞMA VE SONUÇ .....</b>	<b>119</b>
<b>KAYNAKÇA.....</b>	<b>125</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

<b>Çizelge 4.1.</b>	Anodik Alüminyum oksitin iki türü.....	36
<b>Çizelge 4.2.</b>	Alüminyum Oksit yalıtkanına ait bazı sayısal değerler .....	38
<b>Çizelge 7.1.</b>	Tek Tabaka Yalıtkan Filmler ile Hazırlanan OFET'lerin Elektriksel Parametreleri .....	84
<b>Çizelge 7.2.</b>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Polimer İkili Tabaka Yalıtkan Filmler ile Hazırlanan OFET'lerin Elektriksel Parametreleri .....	94
<b>Çizelge 7.3.</b>	TiO <sub>2</sub> /Polimer İkili Tabaka Yalıtkan Filmler ile Hazırlanan OFET'lerin Elektriksel Parametreleri .....	101

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

<b>Şekil 1.1.</b>	Lilienfeld tarafından sunulan ilk alan etkili transistörler (a) MESFET (b) MISFET.....	3
<b>Şekil 1.2.</b>	TFT teknolojisinde temel sınır taşları .....	3
<b>Şekil 1.3.</b>	OFET'lerin kullanıldığı bazı elektronik cihaz uygulamaları .....	4
<b>Şekil 1.4.</b>	Organik ve inorganik alan etkili transistörlerden elde edilen yük taşıyıcı mobilite değerlerinin yıllara göre gelişimi .....	5
<b>Şekil 2.1.</b>	Artan yapısal karmaşıklığa göre organik maddelerin sınıflandırılması.....	7
<b>Şekil 2.2.</b>	(a) Bir karbon atomunun elektron konfigürasyonu (b) dört tetrahedral biçimli hibrid orbitalleri gösteren sp <sup>3</sup> hibridizasyonu (c) üç düzlemsel-üçgen şekilli kombine hibrid orbitalleri ve bir moleküldeki p-orbitalini gösteren ch <sub>4</sub> 'ün sp <sup>2</sup> hibridizasyonu (d) π orbitalleri arasındaki örtüşme nedeniyle HOMO ve LUMO durumlarının oluşumu .....	8
<b>Şekil 2.3.</b>	Bant aralığı içindeki tuzak durum dağılımı.....	14
<b>Şekil 2.4.</b>	(a) Pentasenin kimyasal yapısı (b) tek bir pentasen molekülünün atomik kuvvet mikroskobu görüntüsü (c) pentasen moleküllerinin iki boyutlu balıksırtı kristal yapısında istiflenmesi .....	18
<b>Şekil 3.1.</b>	Bazı yalıtkan polimerlerin kimyasal yapısı. (a) polistren, (b) poli(4) metilstren, (c) poli-4vinilfenol, (d) polimetilmetakrilat, (e) polivinilfenol_ko_polimetilmetakrilat, (f) polivinil alkol .....	26
<b>Şekil 4.1.</b>	Vakum termal buharlaştırma sistemi .....	33
<b>Şekil 4.2.</b>	Film büyüme modları: (a) tabaka üstüne tabaka büyüme modu (Frank-van der Merwe), (b) ada büyüme modu (Volmer-Weber), (c) tabaka üstü ada büyüme modu (Stranski-Krastanov). .....	34
<b>Şekil 4.3.</b>	Alüminyum çalışma elektrotu ve platin karşıt elektrotun gösterildiği anodizasyon sisteminin şematik yapısı .....	37
<b>Şekil 4.4.</b>	Spin kaplama metodu .....	39
<b>Şekil 4.5.</b>	Spin kaplama yönteminde film kalınlığı ve film yüzey homojenitesinin bazı cihaz ve çözelti parametrelerine bağlı değişimi .....	40
<b>Şekil 5.1.</b>	OFET'lerin çalışma prensipleri.....	45

<b>Şekil 5.2.</b>	OFET'lerin üretim mimarileri <b>(a)</b> alt katman kapı/üst yüzey kontak <b>(b)</b> alt katman kapı/altyüzey kontak <b>(c)</b> üst yüzeykapı/altyüzey Kontak <b>(d)</b> üst yüzey kapı/üst yüzey kontak.....	47
<b>Şekil 5.3.</b>	<b>(a)</b> OFET'in transfer karakteristiği <b>(b)</b> çıkış karakteristiği.....	50
<b>Şekil 5.4.</b>	<b>(a)</b> OFET' in lineer ve <b>(b)</b> doyum bölgesi transfer karakteristiği gösterimi.....	52
<b>Şekil 5.5.</b>	OFET'in açma/kapama oranı ve alt eşik salınım değerinin (SS) grafikte gösterimi .....	53
<b>Şekil 6.1.</b>	Pentasen-OFET'in kaynak-akaç kontağının şematik yapısı .....	55
<b>Şekil 6.2.</b>	<b>(a)</b> VAKSIS PVD Handy-MT/101T termal buharlaştırma cihazı spin kaplama sistemi <b>(b)</b> spin kaplama sistemi .....	56
<b>Şekil 6.3.</b>	ITO/PS/Pentasen OFET'inin <b>(a)</b> şematik yapısı, <b>(b)</b> prob istasyonu kontak görüntüsü, <b>(c)</b> gerçek görüntüsü.....	56
<b>Şekil 6.4.</b>	ITO/PMMA/Pentasen OFET'inin <b>(a)</b> şematik yapısı, <b>(b)</b> prob istasyonu kontak görüntüsü, <b>(c)</b> gerçek görüntüsü.....	57
<b>Şekil 6.5.</b>	ITO/P4MS/Pentasen OFET'inin <b>(a)</b> şematik yapısı, <b>(b)</b> prob istasyonu kontak görüntüsü, <b>(c)</b> gerçek görüntüsü.....	57
<b>Şekil 6.6.</b>	ITO/PVP/Pentasen OFET'inin <b>(a)</b> şematik yapısı, <b>(b)</b> prob istasyonu kontak görüntüsü, <b>(c)</b> gerçek görüntüsü.....	58
<b>Şekil 6.7.</b>	ITO/PVA/Pentasen OFET'inin <b>(a)</b> şematik yapısı, <b>(b)</b> prob istasyonu kontak görüntüsü, <b>(c)</b> gerçek görüntüsü.....	59
<b>Şekil 6.8.</b>	ITO/PVP_ko_PMMA/Pentasen OFET'inin <b>(a)</b> şematik yapısı, <b>(b)</b> prob istasyonu kontak görüntüsü, <b>(c)</b> gerçek görüntüsü .....	59
<b>Şekil 6.9.</b>	Anodizasyon sistemi .....	60
<b>Şekil 6.10.</b>	Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /PS/Pentasen OFET'inin <b>(a)</b> şematik yapısı, <b>(b)</b> prob istasyonu kontak görüntüsü, <b>(c)</b> gerçek görüntüsü.....	62
<b>Şekil 6.11.</b>	Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /P4MS/Pentasen OFET'inin <b>(a)</b> şematik yapısı, <b>(b)</b> prob istasyonu kontak görüntüsü, <b>(c)</b> gerçek görüntüsü.....	62
<b>Şekil 6.12.</b>	Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /PVP/Pentasen OFET'inin <b>(a)</b> şematik yapısı, <b>(b)</b> prob istasyonu kontak görüntüsü, <b>(c)</b> gerçek görüntüsü.....	63
<b>Şekil 6.13.</b>	Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /PMMA/Pentasen OFET'inin <b>(a)</b> şematik yapısı, <b>(b)</b> prob istasyonu kontak görüntüsü, <b>(c)</b> gerçek görüntüsü.....	64

<b>Şekil 6.14.</b>	Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /PVP_ko_PMMA/Pentasen OFET'inin (a) şematik yapısı, (b) prob istasyonu kontak görüntüsü, (c) gerçek görüntüsü.....	64
<b>Şekil 6.15.</b>	ITO/TiO <sub>2</sub> /PS/Pentasen OFET'inin (a) şematik yapısı, (b) prob istasyonu kontak görüntüsü, (c) gerçek görüntüsü.....	66
<b>Şekil 6.16.</b>	ITO/TiO <sub>2</sub> /PMMA/Pentasen OFET'inin (a) şematik yapısı, (b) prob istasyonu kontak görüntüsü, (c) gerçek görüntüsü.....	66
<b>Şekil 6.17.</b>	ITO/TiO <sub>2</sub> /PVP/Pentasen OFET'inin (a) şematik yapısı, (b) prob istasyonu kontak görüntüsü, (c) gerçek görüntüsü.....	67
<b>Şekil 6.18.</b>	ITO/TiO <sub>2</sub> /PVP_ko_PMMA/Pentasen OFET'inin (a) şematik yapısı, (b) prob istasyonu kontak görüntüsü, (c) gerçek görüntüsü .....	68
<b>Şekil 7.1.</b>	(a) OFET'lerin I-V karakteristik şeması (b) Keithley 4200 SCS sistemi ve bağlı prob istasyonu .....	69
<b>Şekil 7.2.</b>	OFET'ler için C-F karakteristiğinin şematik yapısı.....	70
<b>Şekil 7.3.</b>	Üretilen OFET'ler için C-F karakteristikleri, (a) ITO/polimer/Pentasen, (b) Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /polimer/Pentasen, (c) ITO/TiO <sub>2</sub> /polimer/Pentasen .....	70
<b>Şekil 7.4.</b>	p ve n kanallı OFET'in şematik çalışma gösterimi .....	73
<b>Şekil 7.5.</b>	ITO/PS/Pentasen OFET'inin çıkış karakteristiği .....	75
<b>Şekil 7.6.</b>	ITO/PS/Pentasen OFET'inin transfer karakteristiği .....	75
<b>Şekil 7.7.</b>	ITO/PMMA/Pentasen OFET'inin çıkış karakteristiği .....	76
<b>Şekil 7.8.</b>	ITO/PMMA/Pentasen OFET'inin transfer karakteristiği.....	77
<b>Şekil 7.9.</b>	ITO/P4MS/Pentasen OFET'inin çıkış karakteristiği .....	78
<b>Şekil 7.10.</b>	ITO/P4MS/Pentasen OFET'inin transfer karakteristiği.....	78
<b>Şekil 7.11.</b>	ITO/PVP/Pentasen OFET'inin çıkış karakteristiği .....	79
<b>Şekil 7.12.</b>	ITO/PVP/Pentasen OFET'inin transfer karakteristiği .....	80
<b>Şekil 7.13.</b>	ITO/PVA/Pentasen OFET'inin çıkış karakteristiği .....	81
<b>Şekil 7.14.</b>	ITO/PVA/Pentasen OFET'inin transfer karakteristiği.....	81
<b>Şekil 7.15.</b>	ITO/PVP_ko_PMMA/Pentasen OFET'inin çıkış karakteristiği.....	82
<b>Şekil 7.16.</b>	ITO/ PVP_ko_PMMA /Pentasen OFET'inin transfer karakteristiği .	83

<b>Şekil 7.17.</b>	Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /PS/Pentasen OFET'inin çıkış karakteristiği .....	86
<b>Şekil 7.18.</b>	Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /PS/Pentasen OFET'inin transfer karakteristiği .....	86
<b>Şekil 7.19.</b>	Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /P4MS/Pentasen OFET'inin çıkış karakteristiği .....	87
<b>Şekil 7.20.</b>	Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /P4MS/Pentasen OFET'inin transfer karakteristiği.....	88
<b>Şekil 7.21.</b>	Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /PVP/Pentasen OFET'inin çıkış karakteristiği .....	89
<b>Şekil 7.22.</b>	Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /PVP/Pentasen OFET'inin transfer karakteristiği .....	89
<b>Şekil 7.23.</b>	Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /PMMA/Pentasen OFET'inin çıkış karakteristiği .....	90
<b>Şekil 7.24.</b>	Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /PMMA/Pentasen OFET'inin transfer karakteristiği.....	91
<b>Şekil 7.25.</b>	Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /PVP_ko_PMMA/Pentasen OFET'inin çıkış karakteristiği	93
<b>Şekil 7.26.</b>	Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /PVP_ko_PMMA/Pentasen OFET'inin transfer karakteristiği.....	93
<b>Şekil 7.27.</b>	ITO/TiO <sub>2</sub> /PS/Pentasen OFET'inin çıkış karakteristiği .....	96
<b>Şekil 7.28.</b>	ITO/TiO <sub>2</sub> /PS/Pentasen OFET'inin transfer karakteristiği.....	96
<b>Şekil 7.29.</b>	ITO/TiO <sub>2</sub> /PMMA/Pentasen OFET'inin çıkış karakteristiği .....	97
<b>Şekil 7.30.</b>	ITO/TiO <sub>2</sub> /PMMA/Pentasen OFET'inin transfer karakteristiği.....	98
<b>Şekil 7.31.</b>	ITO/TiO <sub>2</sub> /PVP/Pentasen OFET'inin çıkış karakteristiği .....	99
<b>Şekil 7.32.</b>	ITO/TiO <sub>2</sub> /PVP/Pentasen OFET'inin transfer karakteristiği.....	99
<b>Şekil 7.33.</b>	ITO/TiO <sub>2</sub> /PVP_ko_PMMA/Pentasen OFET'inin çıkış karakteristiği.....	100
<b>Şekil 7.34.</b>	ITO/TiO <sub>2</sub> /PVP_ko_PMMA/Pentasen OFET'inin transfer karakteristiği.....	101
<b>Şekil 7.35.</b>	Tek tabaka polimer yalıtkanına sahip OFET'lerin histeresis grafikleri .....	104
<b>Şekil 7.36.</b>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /polimer çift tabakalı yalıtkanına sahip OFET'lerin histeresis grafikleri .....	106
<b>Şekil 7.37.</b>	TiO <sub>2</sub> /polimer çift tabakalı yalıtkanına sahip OFET'lerin histeresis grafikleri .....	107

<b>Şekil 7.38.</b>	ITO/PS/Pentasen OFET'in farklı aydınlatma şiddetleri altında çıkış karakteristiği .....	110
<b>Şekil 7.39.</b>	ITO/PS/Pentasen OFET'in farklı aydınlatma şiddetleri altında fototepki ve fotoduyarlılık değerleri .....	110
<b>Şekil 7.40.</b>	ITO/PMMA/Pentasen OFET'in farklı aydınlatma şiddetleri altında çıkış karakteristiği .....	111
<b>Şekil 7.41.</b>	ITO/PMMA/Pentasen OFET'in farklı aydınlatma şiddetleri altında fototepki ve fotoduyarlılık değerleri .....	112
<b>Şekil 7.42.</b>	ITO/P4MS/Pentasen OFET'in farklı aydınlatma şiddetleri altında çıkış karakteristiği .....	113
<b>Şekil 7.43.</b>	ITO/P4MS/Pentasen OFET'in farklı aydınlatma şiddetleri altında fototepki ve fotoduyarlılık değerleri .....	113
<b>Şekil 7.44.</b>	ITO/PVP/Pentasen OFET'in farklı aydınlatma şiddetleri altında çıkış karakteristiği .....	114
<b>Şekil 7.45.</b>	ITO/PVP/Pentasen OFET'in farklı aydınlatma şiddetleri altında fototepki ve fotoduyarlılık değerleri .....	115
<b>Şekil 7.46.</b>	ITO/PVA/Pentasen OFET'in farklı aydınlatma şiddetleri altında çıkış karakteristiği .....	116
<b>Şekil 7.47.</b>	ITO/PVA/Pentasen OFET'in farklı aydınlatma şiddetleri altında fototepki ve fotoduyarlılık değerleri .....	116
<b>Şekil 7.48.</b>	ITO/PVP_ko_PMMA/Pentasen OFET'in farklı aydınlatma şiddetleri altında çıkış karakteristiği .....	117
<b>Şekil 7.49.</b>	ITO/PVP_ko_PMMA/Pentasen OFET'in farklı aydınlatma şiddetleri altında fototepki ve fotoduyarlılık değerleri.....	118

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$A$	: Birim alan
$\alpha$	: İki lokalize durum arasında üst üste gelen etkin dalga fonksiyonu
$B$	: Aydınlatma şiddeti
$C$	: Kapasitans
$C_i$	: Birim alan başına düşen kapasitans
$d$	: Kalınlık
$E$	: Elektrik alan
$E_{ij}$	: İki lokalize durum arasındaki enerji farkı
$\epsilon_0$	: Vakum yalıtkanlık sabiti
$F$	: Faraday sabiti
$G_m$	: Geçiş iletkenliği
$h$	: Plank sabiti
$I_{d,ill}$	: Aydınlatma altında akaç akımı
$I_{d,dark}$	: Karanlık altındaki akım
$I_{ph}$	: Fotoakım
$I_{ds}$	: Kaynak-akaç akımı
$J$	: Akım yoğunluğu
$k_B$	: Boltzmann sabiti
$L$	: Kanal uzunluğu
$m_e^*$	: Elektronun etkin kütlesi
$N_{max}^{SS}$	: Tuzakların maksimum arayüzey yoğunluğu
$N_{e-}$	: Elektron mol sayısı
$P_{opt}$	: Gelen ışık gücü
$P$	: Fotoduyarlılık

$p$	: Hol yoğunluğu
$R_{ij}$	: İki lokalize durum arasındaki mesafe
$R_{phr}$	: Fototepki
$SS$	: Alt eşik salınım değeri
$T$	: Kelvin cinsinden ortam sıcaklığı
$t$	: Zaman
$V_{ds}$	: Kaynak-akaç gerilimi
$V_{gs}$	: Kapı gerilimi
$V_{th}$	: Eşik Voltajı
$\mu_D$	: Sürüklenme mobilitesi
$Q$	: Toplam yük
$W$	: Kanal genişliği
$\gamma_f$	: Filmin serbest yüzey enerjisi
$\gamma_i$	: Alttaş film arayüzeyi enerjisi
$\gamma_s$	: Alttaşın serbest yüzey enerjisi
$\eta$	: Gelen foton başına yaratılan yük taşıyıcı sayısı
$\rho$	: Yoğunluk
$\omega$	: Dönüş açısal frekansı
$k$	: Dielektrik sabiti
$q$	: Elementel yük
$\Delta$	: Anahtarlama voltajları arasındaki gerilim farkı
$\Delta V_{th}$	: Eşik gerilimi kayması
$A$	: İletken kanalın etkin alanı
$\Upsilon$	: Doğrulama parametresi
$\zeta$	: İki çarpışma arası ortalama serbest yol

- $\delta$  : Çözeltinin viskozite sabiti
- $\lambda$  : Dalgaboyu
- $\mu$  : Taşıyıcı mobilitesi
- $\mu_e$  : Taşıyıcı elektron mobilitesi
- $\vartheta_{ij}$  : Bir yük taşıyıcısının  $i$  durumundan  $j$  durumuna sıçrama olasılığı

## 1. GİRİŞ VE AMAÇ

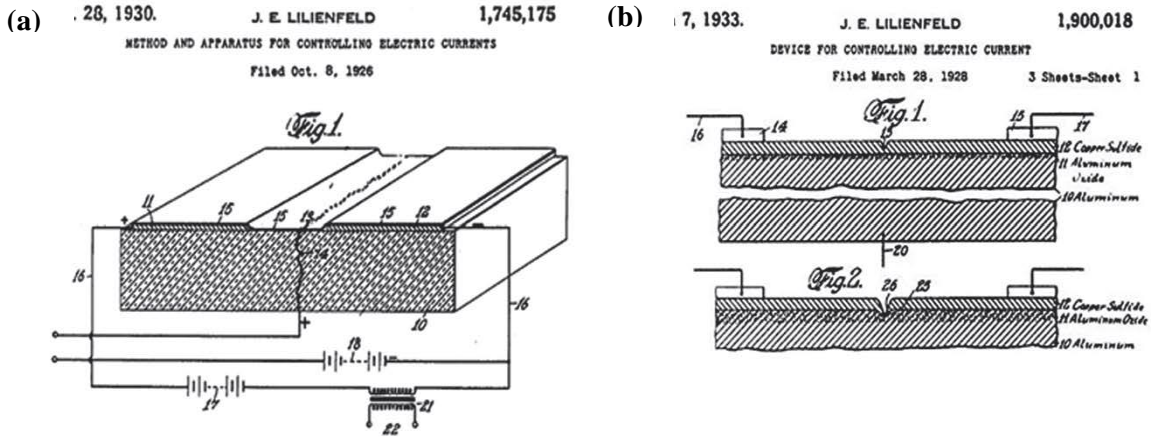
Yarıiletken malzemeler, günümüzdeki teknolojiye ulaşılmada önemli derecede paya sahiptir. Bu malzemelerin, üstün optik ve elektriksel özelliklerinden dolayı iletken ve yalıtkan malzemelerden ayrılan birçok yönü bulunmaktadır. Önemli bir çalışma alanına sahip olan yarıiletkenler, günümüzde kullandığımız birçok teknolojik aygıtın temelini oluşturur. Modern toplumlarda elektronik teknolojisinin yokluğunda bir hayat düşünülemezdir. Eğer elektronik teknolojisi gelişmeseydi, arkadaşlarımızla iletişim kurabilmek için mektup yazmamız gerekecek ve ailemize acil bir mesaj gönderebilmemiz için uzun zaman beklememiz gerekecekti. Daha kaliteli fotoğraflar elde edebilmek için analog kameralarla çekilen filmleri geliştirmek zorunda kalacaktık. Hayatımız, evlerimizde bulunan çeşitli gaz dedektörleri olmadan daha güvensiz olacaktı. Bilgisayarlar, cep telefonları, dijital kameralar gibi modern elektronik aygıtlar olmadan hayatımız, pratiklikten, bilgiden ve de keyiften yoksun olacaktı. Günümüzde kitlesel olarak üretilen elektronik cihazlar hayatımızın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Öyle ki onlar olmadan geçirdiğimiz tek bir gün dahi yoktur. Her gün bilgi edinmek için internet üzerinden araştırma yapar ve iletişime geçebilmek için ailemize, arkadaşlarımıza veya meslektaşlarımıza e-mail göndeririz. Cep telefonlarımız bize her an ve her yerde istediğimiz kişilerle iletişime geçebilme imkânı vermektedir. Dijital kameralarımız ile çektiğimiz fotoğrafları istediğimiz zaman görebilmekte ve internet yardımıyla istediğimiz kişilerle anında paylaşabilmekteyiz. Bilgisayarlar, cep telefonları, tıbbi cihazlar, duman dedektörleri ve dijital kameralar gibi tüm elektronik cihazların içinde çok küçük ve şaşırtıcı özelliklere sahip İnce Film Transistörler (TFT) bulunmaktadır [1]. Farklı malzemeler ve farklı yöntemlerle üretilen TFT'ler gelecekte düşük maliyetli elektronik uygulamalar açısından ilgi çekmektedir. Elektronik teknolojisinde organik tabanlı ince film transistör (OFET) uygulamalarından Radyo Frekanslı ile Tanımlama teknolojileri (RFID), sensörler, ışık yayan diyotlar, piksel sürücüleri ve anahtarlama elemanları, Si/GaAs-inorganik tabanlı üretilen aynı devre elemanları ile karşılaştırıldığında benzersiz özellikleri ile dikkat çekmektedirler [2-4].

Çözelti temelli aygıt üretim kolaylığı, esnek plastikler gibi farklı alttaşlar üzerine büyütülebilme uyumlulukları ve yapısal ayarlamaya olanak sağlamaları organik yarıiletken ve yalıtkan malzemelerin avantajlı özellikleri arasında sayılabilir. Ucuz

maliyetleri, büyük alanda büyütülebilmeleri, geleneksel Silisyum tabanlı cihazlardan çok daha düşük taban sıcaklıklarında esnek cihazlar olarak üretilebilmeleri organik yarıiletken tabanlı cihaz üretimlerine yoğunlaşmanın ana motivasyonunu oluşturmaktadır [5-7].

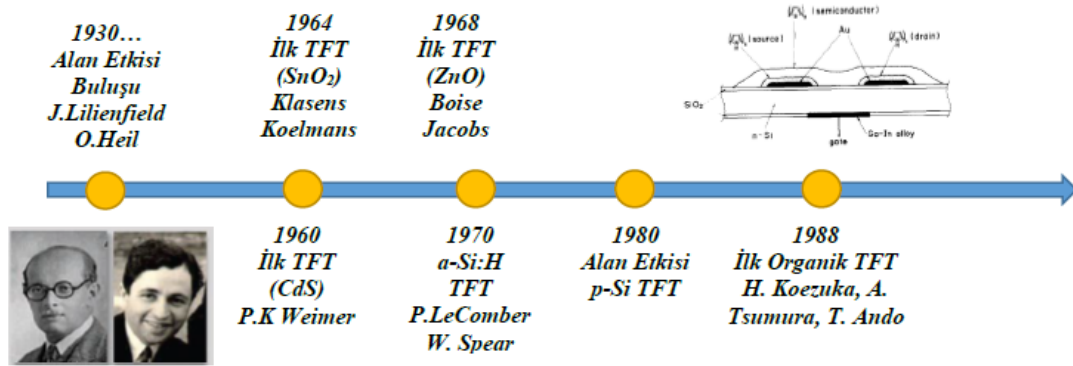
Transistörler akım düzenleyici ve anahtarlama olarak kullanılabilme özellikleri ile tüm modern elektronik cihazların ayrılmaz bir parçasıdır. 20. yüzyılın en önemli buluşlarından biri, 1947 yılında Nobel ödülü kazanan John Bardeen ve Walter Brattain tarafından Bell laboratuvarlarında üretilen dünyanın ilk transistörüdür [8]. Bu buluş, daha sonra elektronikte vakum tüpleri yerine kullanılacak olan transistör çağının başlamasına yol açmış ve günlük hayatımızı derinden etkileyen sayısız elektronik icatların keşfini de beraberinde getirmiştir.

TFT'ler ise 90 yıldan fazla geçmişi ile elektronik cihazlar içinde en eski tarihe sahip devre elemanlarından biridir [9]. TFT'ler 1925 yılında bulunmuş ve 1930 yılında Lilienfeld ve O. Heil bu buluşun patentini almıştır [10,11]. Fakat bu tarihlerde yarıiletken malzemeler ve vakum teknikleri hakkında çok fazla bilgi bulunmuyordu. Yine de çapraz bir elektrik alanının etkisi altında bir malzemedeki akım kontrolünün sağlanabileceği fikri bu patent çalışmalarında bulunmaktaydı. Lilienfeld'in 1930 yılındaki ilk patentinde, günümüzde Metal-Yarıiletken Alan Etkili Transistor (MESFET) olarak bilinen devre elemanlarının temel prensipleri anlatılmaktadır. Bu çalışmadan üç yıl sonra Lilienfeld yayınladığı bir çalışmada [12], yalıtkan bir malzemenin (alüminyum oksit) yarıiletken (bakır-sülfid) ve kapı elektrotunun (alüminyum) arasına yerleştirilmesi ile Metal-Yalıtkan-Yarıiletken Alan Etkili Transistor (MISFET) olarak adlandırılan yeni bir transistör patentini de almıştır. Aynı zamanda MISFET patentinde kullanılan yalıtkan tabakanın kalınlığı 100 nm olup, nerdeyse bugün TFT'lerde kullanılan yalıtkanlarla benzer kalınlığa sahipti [13]. Günümüzde silisyum yarıiletkeni ve üzerinde doğal olarak oluşan silisyumoksit yalıtkanının mükemmel birlikteliği sayesinde MISFET'lerde en çok tek-kristal yapıdaki silisyum yarıiletkeni kullanılmaktadır [14]. Şekil 1.1.'de Lilienfeld tarafından sunulan ilk alan etkili transistörlerin tasarımı gösterilmiştir.



**Şekil 1.1.** Liliensfeld tarafından sunulan ilk alan etkili transistörler (a) MESFET (b) MISFET ([10,12])

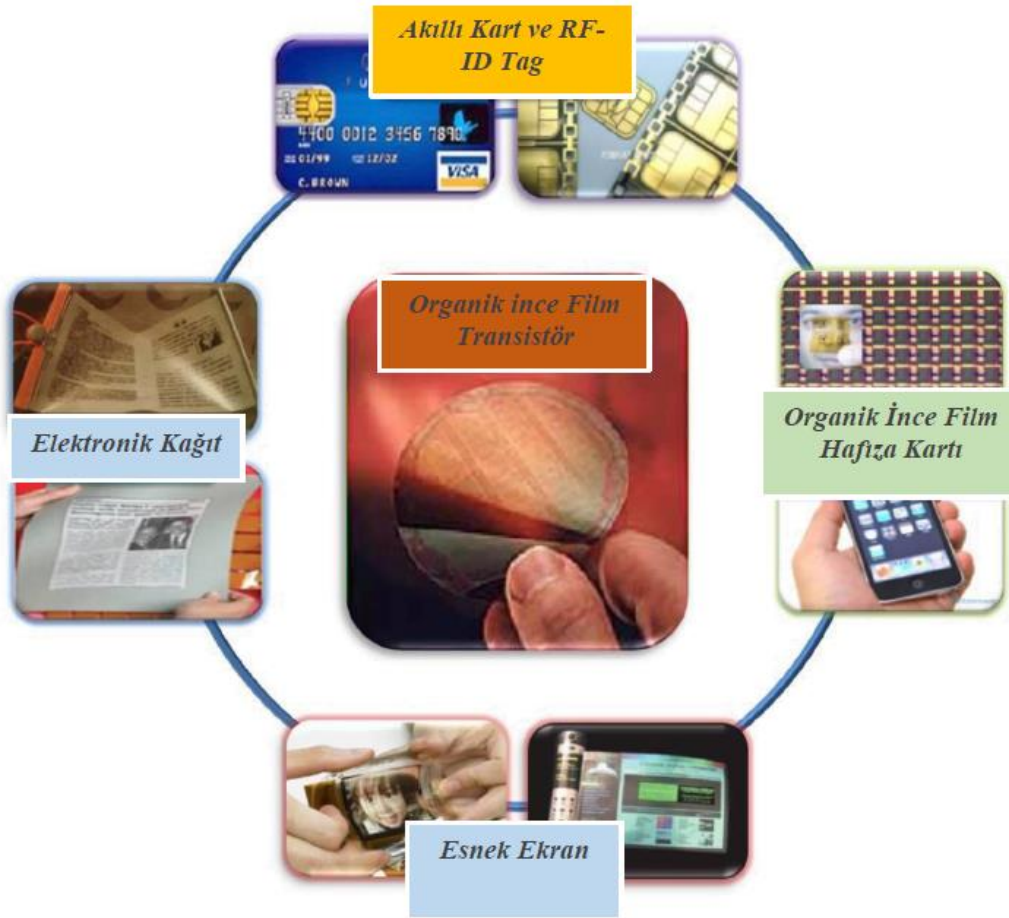
Organik yarıiletken tabanlı transistörlerde alan etkisinin ilk açıklamaları 1970'lere kadar uzanmasına rağmen [15,16], OFET'ler potansiyel elektronik devre elemanı olarak Kozuka ve çalışma arkadaşlarının 1987 yılında elektrokimyasal polimerize politiyofene dayalı bir yapının rapor edilmesi ile tespit edilmiştir [17,18]. Şekil 1.2'de TFT teknolojisinde temel sınır taşları gösterilmektedir.



**Şekil 1.2.** TFT teknolojisinde temel sınır taşları

OFET'lerin kolay üretim süreçleri göz önüne alındığında geleneksel Silisyum tabanlı transistör teknolojisine göre çok daha avantajlı durumda bulunduğu görülmektedir. Geleneksel silisyum tabanlı transistörler yüksek sıcaklık, yüksek vakum ve karmaşık fotolitografik maskeleme koşullarından geçerek üretilmektedir [19]. Genel olarak düşük sıcaklıkta büyütme ve çözelti bazlı işlemler çok daha karmaşık üretim işlemleri gerektiren silisyum teknolojisinin yerini alabilir. Buna ek olarak, organik malzemelerin mekanik esnekliğe sahip olmaları ve plastik gibi esnek alttaşlar üzerine büyütülebilmeleri, hafif ve katlanabilir elektronik ürünlerin geliştirilmesine olanak

sağlamaktadır. İlk OFET'in rapor edilmesinden sonra hem yeni üretim tekniklerinde hem de malzeme performansında büyük gelişmeler gerçekleşmiştir. OFET'ler; elektronik kâğıt, sensörler, radyo-frekans kimlik tanımlama (RFID), katlanabilir ekranlar ve hafıza kartları gibi birçok elektronik uygulamasında kullanılmaktadır [20-24]. Şekil 1.3'te OFET'lerin kullanıldığı bazı elektronik cihaz uygulamaları gösterilmiştir.

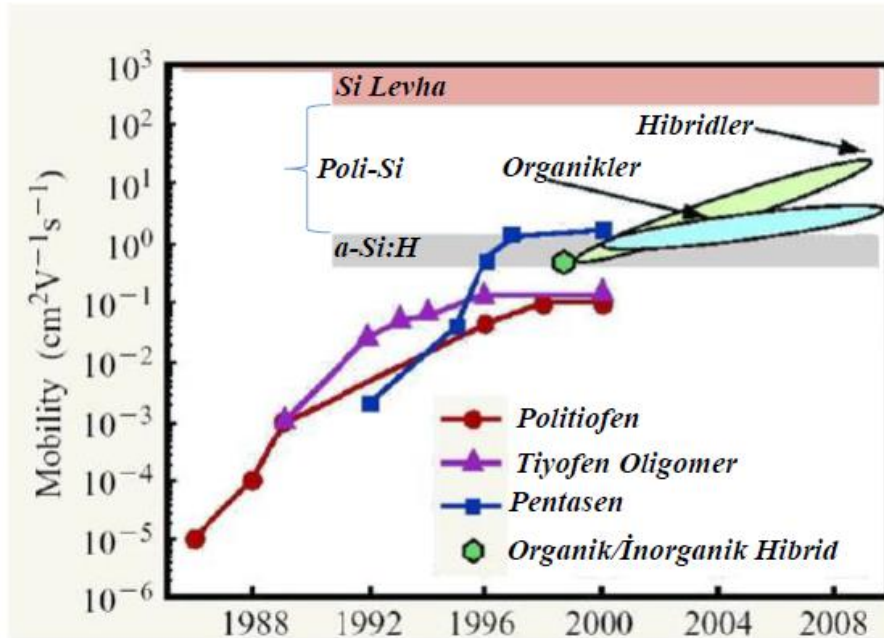


**Şekil 1.3.** OFET'lerin kullanıldığı bazı elektronik cihaz uygulamaları ([25])

Son yirmi yılda düşük maliyetli entegre devrelerin potansiyel TFT uygulamalarında, organik yarıiletkenlerin aktif tabaka olarak kullanılması yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Bu alandaki ilk çalışmaların çoğu mevcut malzemelerin geliştirilmesi, yeni malzemelerin sentezlenmesi, yenilikçi kimya denemeleri, işleme yöntemleri, kendiliğinden düzenlenen tabakaların ve kapı yalıtkanlarının geliştirilmesi ile

özellikle transistörlerin mobilite ve açma/kapama oranlarının artırılması üzerine yoğunlaşmaktadır.

Şekil 1.4 çeşitli yarıiletkenlerin zamanla mobilitelerindeki değişimleri özetlemektedir. Yapılan ilk OFET çalışmasında, politiyofen aktif tabakasına sahip OFET'in mobilitesi yaklaşık  $10^{-5} \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  olarak bulunmuştur. OFET'lerin performansı bu çalışmadan sonra sürekli olarak artmaktadır. Özellikle politiyofenin mobilitesi yaklaşık olarak  $10^5$  kez artmıştır [26]. Bazı OFET'lerin performansları günümüzde elektronik dünyasında geleneksel tek kristal silisyum TFT'ler yerine tercih edilen amorf silisyum TFT'ler ile rekabet edebilecek düzeye gelmiştir [14]. Organik yarıiletkenlerden pentasen'in transistörlerde aktif tabaka olarak kullanılması ile elde edilen alan etkili mobilite değeri, amorf silisyuma (a-Si:H) ait olan değeri ( $\mu \sim 1 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) geçmiş durumdadır [27]. a-Si:H TFT'ler genellikle düz ekran piksel sürücüleri, aktif matris sıvı kristal ekranlar (AMLCD) ve aktif - matris organik ışık yayan diyot ekranlarda (AMOLED) kullanılmaktadır [28-29]. Organik yarıiletkenlerin mobilitelerinin artarak a-Si:H mobilitesine yaklaşması ile birlikte özellikle esnek plastik altaşlar üzerine ekranlar oluşturulup elektronik teknolojisinde büyük bir pazar hedeflenmektedir [30].



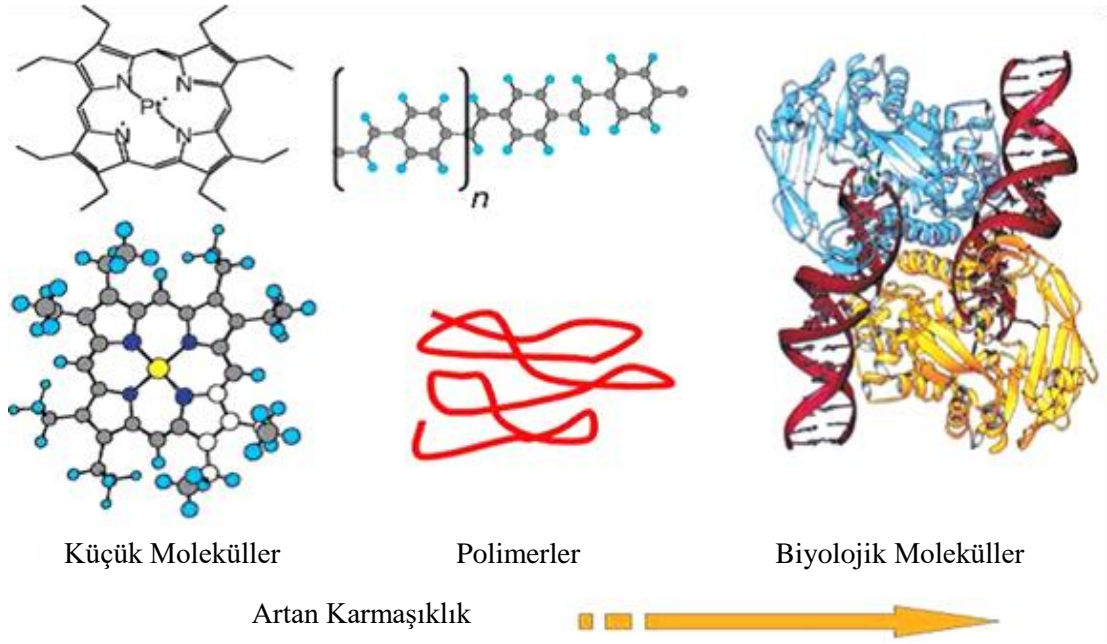
Şekil 1.4. Organik ve inorganik alan etkili transistörlerden elde edilen yük taşıyıcı mobilite değerlerinin yıllara göre gelişimi ([25,31])

Buharlaştırma yöntemi ile büyütülen küçük molekülü organik yarıiletkenler polimer yarıiletkenlere göre daha yüksek moleküler hizalanma ve daha iyi düzenlenmiş film oluşumu göstermektedir. Bu özellikleri sayesinde genellikle polimer yarıiletkenlerden daha yüksek mobiliteye ve yarıiletken karakteristiklerine sahiptirler [31]. Kimyasal ve termal kararlılığının yanında yüksek mobilitesi sayesinde diğer benzer organik yarıiletkenlere göre en sık çalışılan p-tipi küçük molekülü organik yarıiletken pentasendir. Pentasen, mavi renkte olup organik çözücüler içerisinde çözünmesi çok zordur. Bununla birlikte pentasen, yüksek erime noktasına sahip ( $>300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) beş benzen halkalı poliasen ailesine ait organik bir yarıiletkendir [32,33].  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  alttaş üzerine büyütülen pentasen, çok yüksek mobilité değeri ( $0,1\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) gösteren ilk organik yarıiletken malzemedir [34]. Daha sonra  $\text{SiO}_2$ 'in kimyasal olarak modifikasyonu ile bu değér  $1,5\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  ve polimer kapı yalıtkanının kullanılması ile de  $3\text{--}6\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  arasında mobilité değérlerine kadar yükselmiştir [2,35-37].

Bu tez çalışmasında, termal buharlaştırma yöntemi ile pentasen aktif tabakası farklı kapı yalıtkanları üzerine büyütülerek, alt geçit ve üst kontak geometrisine sahip OFET'ler üretilmiştir. Üretilen OFET'lerin elektriksel performansları üzerinde kapı yalıtkanının etkisini incelemek amacıyla, ticari olarak satın alınan polimetilmetakrilat (PMMA), polivinil alkol (PVA), poli (4-Vinilfenol) (PVP), polistren (PS), Poli (4-Metilstren) (P4MS) ve poli (4-vinilfenol-co-metil metakrilat) (PVP\_co\_PMMA) organik yalıtkanları kullanılmış ve bu malzemeler sol jel spin kaplama yöntemi ile hazırlanmıştır. Bu malzemeler kapı yalıtkanı olarak tek başlarına kullanılmakla birlikte, aynı zamanda ikili organik/inorganik kapı yalıtkanlarının organik kısmında da kullanılmıştır. Bu ikili yapılarda inorganik kısım olarak sol jel spin kaplama yöntemi ile oluşturulan  $\text{TiO}_2$  ve anodizasyon yöntemi ile oluşturulan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yalıtkanları kullanılmıştır. Hazırlanan pentasen tabanlı OFET'lerin elektriksel ölçümleri karanlık ortamda gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bu transistörlerden tek tabaka polimer yalıtkan temelli transistörlerin elektriksel karakterizasyonları farklı beyaz ışık şiddetleri altında gerçekleştirilmiştir.

## 2. ORGANİK YARIİLETKENLER

Shirakawa, MacDiarmid ve Heeger adlı bilim insanları organik malzemelere katkı yaparak iletkenlik özelliği göstermelerini kanıtlayana kadar, organik malzemelerin yalıtkan olduğuna inanılırdı [38]. Bu buluştan sonra çok çeşitli organik yarıiletken malzemeler üretilmiş ve rapor edilmiştir [39]. Karbon bazlı omurgaları, hidrokarbon özellikleri ve bunların türevleri ile ilgili olmaları nedeniyle bu yarıiletkenler, organik yarıiletken olarak isimlendirildi. Organik malzemeler, zayıf moleküller arası Van der Waals kuvvetleri yardımıyla organik moleküllerin (karbon-tabanlı moleküller) bir araya gelmesi ile oluşur. Yapısal karmaşıklık ve moleküler ağırlığına göre organik malzemeler Küçük Moleküller, Polimerler ve Biyolojik Moleküller olmak üzere üç sınıfa ayrılabilir (Şekil 2.1).



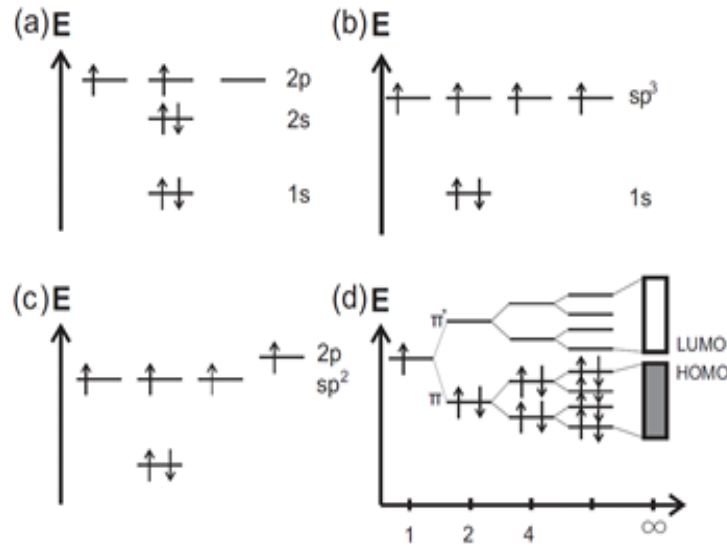
**Şekil 2. 1.** Artan yapısal karmaşıklığa göre organik maddelerin sınıflandırılması ([40])

DNA gibi biyolojik moleküller elektronik uygulama alanları arasında yer almamaktadır. Organik yarıiletken teknolojisi genel olarak aktif küçük moleküller ve polimer malzemeler üzerine yoğunlaşmaktadır. Organik malzemeler oda sıcaklığında ihmal edilebilir seviyede serbest yük taşıyıcısına sahip olup, bu malzemeler genel olarak 2 eV'un üzerinde bir optik bant enerji aralığına sahiptir [40]. Moleküller arası zayıf etkileşimden kaynaklı oluşan bu bant aralığı, organik malzemelerin düşük taşıyıcı

mobilitesine sahip olmasına da sebep olmaktadır. Bu organik malzemelerin Si ve Ge gibi bilinen yarıiletkenler ile elektriksel özellik bakımından mukayese edilmesi, onları yalıtkan sınıfına yaklaştırmaktadır. Çünkü elektriksel iletkenlik bakımından aralarında büyük fark bulunmaktadır [41].

## 2.1. Organik Yarıiletkenlerde Enerji Bantlarının Oluşumu

Organik moleküllerde iletkenlik karbon atomlarının konjugasyonu sayesinde meydana gelir. İki atom birbirine yaklaştığında değerlilik elektronları arasında etkileşim meydana gelir. Oluşan etkileşime bağlı olarak bu iki atom bağ oluşturabilir. Aynı şekilde bir karbon atomu diğer karbon atomuna yaklaşıncaya dış elektron orbitalleri etkileşime girerek bir bağ oluştururlar. Karbon atomunun elektron dizilimi  $1s^2 2s^2 2p^2$  şeklinde gösterilen 6 elektronu vardır. Pauli dışlama prensibine göre, bir atomda iki elektron aynı anda aynı enerji seviyesinde bulunamaz. Bu ilkeye göre, bir orbitale spini yukarı ( $\uparrow$ ) olan bir elektron yerleşmişse, aynı orbitale yerleşen ikinci elektronun spini ters yönde ( $\downarrow$ ) olmalıdır. Böylece birbirine ters yönde spinli iki elektronun yer aldığı orbital dolmuş olur [42].



**Şekil 2. 2.** (a) Bir karbon atomunun elektron konfigürasyonu (b) dört tetrahedral biçimli hibrid orbitalleri gösteren  $sp^3$  hibridizasyonu (c) üç düzlemsel-üçgen şekilli kombine hibrid orbitalleri ve bir moleküldeki  $p$ -orbitalini gösteren  $CH_4$ 'ün  $sp^2$  hibridizasyonu (d)  $\pi$  orbitalleri arasındaki örtüşme nedeniyle HOMO ve LUMO durumlarının oluşumu ([43])

Şekil 2.2 (a)'da gösterildiği gibi bu elektronlar sırasıyla 1s, 2s ve 2p yörüngelerini işgal ederler. Sadece dış yörüngedeki ( $2s^2 2p^2$ ) elektronlar diğer atomların elektronları ile etkileşime girer bir bağ veya yeni bir molekül oluştururlar. Diğer atomlarla etkileşimleri sırasında farklı hibritleşme durumlarına göre atomların elektronik yapıları değişir. Hibritleşme 2s ve 2p orbitallerinin birleşip farklı kombinasyonlarda yeni sp orbitali oluşma sürecidir. Örneğin bir karbon atomu dört hidrojen atomu ile etkileşime girdiğinde ( $\text{CH}_4$ ), karbon atomunun dört değerlik elektronu bir 2s ve üç 2p orbitalinin hibritleşmesi ile oluşan 4 yeni  $sp^3$  hibrit orbitalinde bulunur ve komşu hidrojen atomlarıyla dört kovalent bağ (C-H) oluşturur. Şekil 2.2 (b)'de görüldüğü gibi bu dört-elektron durumu dört eşdeğer hibrit orbitalini ( $sp^3$  hibrid orbitaller) tanımlar.  $sp^3$  hibritleşmesi orbitaller arası yaklaşık  $109^\circ$ 'lik bir açığa sahip tetrahedral bir yapıdır.  $sp^2$  hibritleşmesi iki p orbitali ve s orbitalinin birleşmesi ile meydana gelir. Örneğin  $\text{C}_2\text{H}_4$  içinde her bir karbon atomunun pertürbe olmayan 2p orbitalinde bir elektron, dış hibritleşmiş orbitallerinde ise üç elektronu bulunur. Şekil 2.2 (c)'de gösterildiği üzere, bu üç elektron üç eşdeğer  $sp^2$  hibritleşmiş orbitali işgal eder. Orbitaller bir 2s ve iki 2p orbitallerinin birleşiminden kaynaklanan düzlemsel üçgen bir geometriye ve bu düzlemden dışarıya doğru dik pertürbe olmayan 2p orbitalinin oluşturduğu yeni bir yapıya sahip olurlar. Aynı zamanda elektronlar farklı orbitallerde farklı bağlar oluştururlar. 2p orbitalindeki elektronlar  $\pi$  bağı oluştururken  $sp^2$  orbitalindeki elektronlar  $\sigma$  bağı oluştururlar. İki karbon atomu arasındaki bu iki bağ kimyasal notasyonda çift bağ ( $\text{C} = \text{C}$ ) olarak tanımlanır. Çift bağ, tek bağ ile karşılaştırıldığında daha kısadır.

Elektron konfigürasyonu bir dalga fonksiyonu olarak da tarif edilebilir. Bu şekilde dalganın tepesi elektronların bulunma olasılığını gösterir. Benzer şekilde iki atom birbirine bağlı olduğunda yapı yeni dalga fonksiyonları ile tanımlanır. Çünkü birleşmiş yeni sistemde değerlik elektronları bir çekirdek yerine her iki çekirdek tarafından eş zamanlı olarak çekilirler. Bu iki atomun oluşturduğu yeni kombine dalga fonksiyonu moleküler orbital olarak adlandırılır. Moleküler orbital atomik orbitallerin yapıcı ya da yıkıcı girişimlerinin sonucudur. Yapıcı girişimin bir örneği, pozitif çekirdekler arasına negatif yüklerin yerleşmesi sonucu bu iki atom arasında bir çekimin oluşmasıdır. Daha özel olarak elektronlar arasında yapıcı bir girişim, atomlar arasındaki bir elektronun sonlu bulunma olasılığı ve bir çekim ile sonuçlanır. Bu da atomlar arasında bir bağ oluştuğunu gösterir. Böylece, dalga fonksiyonu bir moleküler bağ orbitali olarak adlandırılır. Aynı şekilde, yıkıcı girişim için herhangi bir negatif yükün mevcut olmadığı ve iki pozitif

çekirdeğin bir arada olduğu durum örnek verilebilir. Diğer bir deyişle, elektronlar arasındaki yıkıcı girişim iki atom arasındaki bir elektronun son derece düşük olasılıkta bulunması ile sonuçlanır. Bu nedenle, dalga fonksiyonu anti bağ moleküler orbital olarak adlandırılır. Antibag moleküler orbital, moleküler bağ orbitalinden daha kararsız ve daha yüksek enerjiye sahiptir. Buna ek olarak, farklı enerjilerine göre bu iki tür orbital moleküler enerji seviyelerinde bir bölünme şeklinde görünür.

Valans elektronların dalga fonksiyonu da çevre atomları nedeniyle oluşturulan potansiyelden dolayı sapabilir. Konjuge polimerlerde, 2p orbitalleri birbirinden uzak elektronlarla etkileşime girebileceğinden dolayı  $sp^2$  orbitallerine göre daha hareketlidirler. Daha önce de belirtildiği gibi, iki elektron arasındaki bu etkileşim iki farklı moleküler orbitale yol açar. Şekil 2.2 (d)'de gösterildiği gibi bunlardan ilki  $\pi$  ile sembolize edilen moleküler bağ orbitali olan, diğeri ise  $\sigma$  ile sembolize edilen anti bağ moleküler orbitalidir. Ayrıca, çok daha fazla atom çiftleri daha fazla enerji seviyelerinin yarılmasına sebep olur ve bu orbitallerin sadece yarısı doludur.

En yüksek enerjili elektronlar tarafından işgal edilen moleküler orbital HOMO olarak adlandırılırken, HOMO'dan daha yüksek olan orbital ise en düşük işgal edilmemiş moleküler orbitalin İngilizce kısaltması olan LUMO olarak adlandırılır. HOMO ve LUMO arasındaki enerji farkına band aralığı denir. Band aralığı, elektronik ve optik uygulamalarda en önemli parametrelerden biridir. Metal ve yarıiletkenlerin aksine konjuge sistemlerde yük taşıyıcıları genellikle bir polarizasyon ve bozunmadan dolayı elektron ve deşik (hole) olarak görülürler. Çünkü örgü yük etkileşimi moleküllerarası bağ etkileşiminden daha büyüktür. Farklı koşullarda oluşan bu bozulmalar soliton, polaron veya bipolaron olarak tanımlanabilir [44]. İnorganik malzemelerde olduğu gibi organik yarıiletken malzemelerde de, çoğunluk taşıyıcının türüne göre yarıiletken p-tipi ve n-tipi olarak sınıflandırılabilir. Taşıyıcı mobilitesi  $\mu$ , organik yarıiletkenler için en önemli parametrelerden biri olup,  $10^{-7}$  ile  $1 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  arasında değerler alabilmektedir.

## 2.2. Organik Yarıiletkenlerde Taşıyıcı Transferi

Organik maddelerde yük taşınımı inorganik yarıiletkenlere benzer şekilde sürüklenme ve difüzyon yolu ile gerçekleşir. Bununla birlikte moleküler organik bir sistemde temel yük taşınım mekanizması tam olarak anlaşılammamaktadır. Organik

yarıiletken malzemelerde yük taşınımını tanımlamak için çeşitli teoriler ileri sürülmüştür. Ne var ki bu teorilerden hiç biri tüm deneysel sonuçları açıklayamamaktadır. Büyük bir olasılıkla, çeşitli mekanizmalar aynı anda meydana gelmekte ve belirli koşullara bağlı olarak da bu mekanizmalardan biri yük taşınımında baskın olmaktadır. Genellikle organik yarıiletkenlerde yük taşınımını açıklamak için dört teori öne sürülmektedir. Bunlar bant iletim modeli, sıçrama iletim modeli, tünelleme iletim modeli ve çoklu tuzaklama ve bırakma modelidir.

### 2.2.1. Bant iletim modeli

Bant teorisinde moleküller arası etkileşimler elektron ve hollerin serbestçe hareket edebileceği enerji bantlarının oluşmasına yol açar. Bu nedenle bant iletimi delokalize durumlarda oluşur ve örgü titreşim (fonon) saçılmaları ile de sınırlanır [45]. Düşük sıcaklıklarda bu örgü titreşimleri azalmakta ve taşıyıcı yük mobilitelerinin arttığı gözlemlenmektedir. Genellikle bant tipi iletkenlik düşük sıcaklıklarda, son derece düzenli kristal yapıya ve atomları arasında kuvvetli bağlanmaya sahip inorganik yarıiletkenlerde meydana gelmektedir. Delokalize durumlar için yük iletiminin en basit modeli Drude Modelidir. Bu modelde yük taşıyıcıları, uygulanan elektrik alanı altında serbestçe hareket eder; ancak, çarpışma saçılmalarına maruz kalırlar [46]. Örgü saçılmaları sıcaklığa da bağlı olarak fononlardan ve kirliliklerden kaynaklanmaktadır. Taşıyıcı mobilitesi temelde aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\mu_e = \frac{q\zeta}{m_e^* v_{th}} \quad (2.1)$$

Denklemden  $q$  elementel yük,  $\zeta$  ortalama serbest yol (iki çarpışma arası ortalama mesafe),  $m_e^*$  elektronun etkin kütlesi ve  $v_{th}$  ise termal hızdır ( $v_{th} = \sqrt{3k_B T / m_e^*}$ , oda sıcaklığında yaklaşık  $10^5$  m/s). Sıcaklığa bağlı mobilite saçılmanın doğasına bağlıdır. Ancak, tüm durumlarda mobilitenin sıcaklığa bağımlılığı aşağıdaki gibi bir orantıya sahiptir.

$$\mu_e \propto T^{-n} \quad (2.2)$$

Üstel  $n$  değeri çoğu pratik uygulamada pozitiftir. Bu yüzden mobilite artan sıcaklıkla azalmaktadır.

Birçok organik yarıiletken yüksek derecede yapısal bozukluğa ve moleküller arasında zayıf elektriksel bağlanmaya (Van der Waals ve dipol-dipol etkileşimleri) sahiptir. Bu yapısal özellikleri nedeniyle organik yarıiletkenlerde delokalize durumlar yerini lokalize durumlara bırakmaktadır. Sonuç olarak, bant iletim modeli tüm organik yarıiletkenlerin iletimini açıklamakta yetersiz kalmaktadır. Sadece naftalin [47], antresen [48], rubren [49], ve pentasen [50] gibi çok düzenli ve yüksek kristal yapıya sahip organik yarıiletkenlerde düşük sıcaklıklarda, bu iletim modeli gözlenebilmektedir.

### **2.2.2. Tünelleme iletim modeli**

Konjuge  $\pi$ -elektron sistemi organik yarıiletkenlerde yük taşınımının temelini oluşturmaktadır. Organik yarıiletkenlerdeki komşu moleküllerin elektronik sistemleri arasındaki kötü örtüşme daha fazla yük taşınımını sağlayacak olan bant oluşumuna engel olmakta ve aynı zamanda birbirinden ayrı moleküllerin üzerindeki taşıyıcı yüklerin lokalizasyonuna da yol açmaktadır [51]. Böylece lokalize durumları içeren bant benzeri enerji seviyeleri organik katılarda oluşmaktadır [52]. Sürekli olmayan enerji bantlarına sahip bir organik yarıiletkende lokalize durumlar arasında yük taşıyıcıların iletimi Tünelleme, Sıçrama veya Çoklu Tuzaklama ve Bırakma yolu ile gerçekleşir. Tünelleme durumunda, uyarılmış bir yük taşıyıcısı bir potansiyel engel üzerinden komşu molekülün işgal edilmemiş enerji durumuna nüfuz edebilir. Tünelleme olasılığı, kuvvetli bir şekilde enerji engel yüksekliğine ve elektrik alanına bağlı iken, sıcaklıktan bağımsızdır [7].

### **2.2.3. Sıçrama iletim modeli**

Lokalize durumlar arasında yük iletimini açıklayan diğer bir model sıçrama iletim modelidir. Organik malzemelerde zayıf elektronik etkileşimler ile birlikte kusurların fazla olması organik yapı içerisinde birbirinden ayrı ve lokalize olmuş durumların oluşmasına sebep olmaktadır. Bu durumda organik malzemedeki hareketli yükler farklı konumlarda bulunan iki lokalize durum arasında fonon destekli sıçrama (hopping) iletim modeline göre hareket ederler. Burada taşıyıcı bir enerji engeli üzerinden sıçrayarak bir sonraki mevcut lokalize enerji durumuna geçer. İki lokalize durum arasındaki enerji farkı bir fononun absorpsiyonu veya emisyonu ile aşılabılır. Bu teoride örgü titreşimleri ve yük mobiliteleri artan sıcaklıkla artmaktadır. Bu yüzden sıçrama iletkenlik modeli termal destekli tünelleme olarak da tanımlanabilir.

Tuzakların durum yoğunluğu dağılımı (DOS) yük taşıyıcı yoğunluğu ile karşılaştırılacak kadar büyük olduğunda, bir yük taşıyıcısı hem en yakın yüksek aktivasyon enerjili tuzak durumuna (NNH) atlayabilir hem de uzak mesafede bulunan düşük aktivasyon enerjili duruma (VRH) sıçrayabilir [53].

$i$  durumundan  $j$  durumuna sıçrama olasılığı aşağıdaki gibi verilmektedir [54];

$$v_{ij} = \begin{cases} v_0 \exp\left(-2aR_{ij} - \frac{E_{ij}}{2k_B T}\right), & E_{ij} > 0 \\ v_0 \exp(-2aR_{ij}), & E_{ij} < 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

Denklemden  $R_{ij}$  iki lokalize durum arasındaki mesafeyi,  $k_B$  Boltzman sabiti,  $E_{ij}$  enerji farkını,  $a$  iki lokalize durum arasında üst üste gelen etkin dalga fonksiyonunu göstermektedir. Denklem (2.3) uzaklıkla ilişkili tünellemeden ve enerji ile ilgili sıçramadan gelen katkıyla birleşir. Tuzakların durum yoğunluğu dağılımının iki değişkenli olduğu kabul edilirse, mobilite ve iletkenlik Arrhenius sıcaklık bağımlılıklarını sergiler.

$$\sigma \propto \exp\left(-E/k_B T\right) \quad (2.4)$$

$$\mu \propto \exp\left(-E/k_B T\right) \quad (2.5)$$

Denklemden  $E$  amorf organik yarıiletken filmler için yaklaşık 0,1 eV civarındadır. Sıçrama iletkenlik modeline göre mobilite sıcaklıkla artış göstermektedir. Diğer taraftan tuzakların durum yoğunluğu dağılımının sabit olduğu farz edilirse, iletkenlik ifadesi aşağıdaki formda verilmektedir [55].

$$\sigma \propto \exp\left[-\left(T_0/T\right)^{1/(n+1)}\right] \quad (2.6)$$

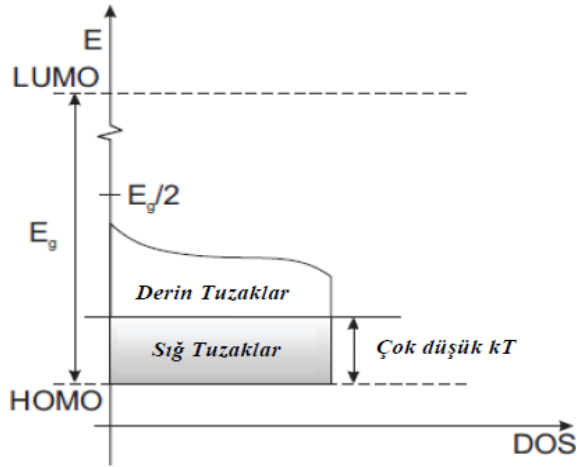
Denklemden  $n$  sistemin boyutluluğunu,  $T_0$  sıcaklığını göstermektedir. Düşük sıcaklıklarda Fermi seviyesine yakın bir Coulomb boşluğu olması durumunda iletkenliğin sıcaklığa bağımlılığı aşağıdaki şekilde ifade edilir [56].

$$\sigma \propto \exp\left[-\left(T_0/T\right)^{1/2}\right] \quad (2.7)$$

Amorf ve düzensiz yapılarda, polimer ve inorganik nanokristal katılardaki yük iletiminin anlaşılması için sıçramalı modeller modellenerek uygulanmıştır.

#### 2.2.4. Çoklu tuzaklama ve bırakma (MTR) modeli

Organik yarıiletkenlerin yük iletimini açıklayan diğer bir model de Çoklu Tuzaklama ve Bırakma (MTR) Modelidir. Bu modelde organik yarıiletkenin yapısındaki kusurların etkisi de dikkate alınır. Tek kristal OFET'lerin iletim kanallarındaki kusur yoğunluğu inorganik TFT'lere göre çok daha az olmasına rağmen yine de iletimi etkileyecek seviyede kusurların varlığı söz konusudur [57]. İlk olarak bu model Shur ve Hack tarafından hidrojenlenmiş amorf silisyumun (a-Si: H) mobilitesini açıklamak için geliştirilmiştir [58]. Daha sonra Horowitz ve arkadaşları bunu organik yarıiletkenlerin yük iletimini açıklamak için kullanmışlardır [59,60]. Bu model yük iletiminin lokalize olmayan durumlarda gerçekleştiğini varsayar. Ancak yarıiletken içine akan taşıyıcıların çoğu yasak aralıkta bulunan lokalize durumlarda tuzaklanmaktadır. Bu tuzaklar, eğer enerji seviyeleri bant aralığının ortasına yakın bir yerde ise derin tuzaklar olarak, iletim veya valans bandına yakın bir yerde ise sığ tuzaklar olarak adlandırılmaktadırlar. Bu durum aşağıdaki Şekil 2.3 gibi temsil edilmektedir.



**Şekil 2.3.** Bant aralığı içindeki tuzak durum dağılımı. p-tipi yarıiletkenler için sığ tuzak enerjileri çok küçük bir  $kT$  enerjisi kadar valans bandının üzerindedir (n-tipi için ise iletim bandının) ([60])

Bu model, taşıyıcıların mobilitesinin sıcaklığa bağlılığını ve aynı zamanda tuzakların enerji seviyesi ile birlikte taşıyıcı yoğunluğunu da göstermektedir. Bu modelde  $E_{tr}$  enerjisine sahip tek bir tuzak seviyesi için sürüklenme mobilitesi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\mu_D = \mu_0 \propto \exp\left(-E_{tr}/kT\right) \quad (2.8)$$

Yüksek sıcaklıklarda bu iletim termoiyonik emisyon yoluyla ve sıcaklığa bağlı meydana gelmektedir. Düşük sıcaklıklarda yükler tane sınırları boyunca tünelleme yolu ile iletilir ve mobilite sıcaklıktan bağımsız hale gelir. Orta derece sıcaklıklarda ise yük iletimi termal olarak aktive edilen tünelleme ile belirlenebilir [61]. Bir organik yarıiletkenin farklı sıcaklık bölgelerinde ve farklı tuzak konsantrasyonlarında yapılan deneysel gözlem sonuçlarını, yukarıda bahsedilen yük iletim modellerinden hiçbirisi tek başına yorumlayamamaktadır. Bu nedenle, konjuge organik malzemelerin yük iletim doğasının hala tartışmalı olduğu ve yük taşınımı, konsantrasyon, kasıtlı olmayan katkılama, sıcaklık, morfoloji ve tuzakların uzaysal, enerjik dağılımları gibi içsel ve dışsal faktörlere güçlü bir şekilde bağlı olduğu ortaya çıkmaktadır [51].

### **2.3. Organik Yarıiletken Çeşitleri**

Organik yarıiletken malzemeler arasında yer alan konjuge polimerler ve küçük moleküller organik elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Aşağıda bunlar hakkında kısa bilgiler yer almaktadır.

#### **2.3.1. Polimerler**

Polimerler çok sayıda tekrarlanabilir küçük birimlerin (monomer) bir araya gelmesi ile oluşan yüksek moleküler ağırlıklı organik yapılardır. Hem doğal hem de sentetik olmak üzere iki çeşit polimer vardır. Kauçuk, protein, yün, saç ve tırnak doğal polimerlere örnek gösterilebilir. Canlılarda ayrıca polimerik yapıda olan karbonhidratlar, deoksiribonükleik asit (DNA) ve ribonükleik asit (RNA) doğal polimerler olup biyopolimer olarak adlandırılmaktadırlar. Sentetik polimerler ise ticari olarak üretilirler ve çok çeşitli özellik ve uygulamalara sahiptirler. Polimer zincirleri çok sayıda monomerin kovalent kimyasal bağlar vasıtasıyla ardışık bir şekilde birleşmesine izin veren kimyasal tepkimeler ile oluşturulur. Bir polimer birden fazla monomerden türettiği zaman, bir kopolimer veya heteropolimer olarak adlandırılır. Polimerler onu oluşturan monomerlerin arasındaki kimyasal bağların yapısına ve doğasına göre konjuge ve konjuge olmayan polimerler olarak iki gruba ayrılır. Konjuge ve konjuge olmayan polimerlerin her ikisi de benzer mekanik özellikler göstermesine rağmen, elektrik özellikleri birbirinden çok farklıdır. Polimerler başlangıçta iyi yalıtkanlar olarak

düşünülmüş ve yarıiletken endüstrisinde fotorezist malzeme olarak kullanılmışlardır. Bununla birlikte, 1977 yılında poliasetilenin katkılanması ile nispeten yüksek iletkenlik kazanan polimerler için yeni bir çağ başlamıştır [62]. Çoğu monomerin temel elementleri karbon ve hidrojen elementleridir. Birbirinden farklı polimer tiplerinin elektriksel özellikleri kimyasal bağlarının yapısı üzerinden tanımlanır. Konjuge olmamış polimerler için, merkezi karbon atomları ve bağlı olduğu hidrojen atomlarının her biri arasındaki bağ 1s orbitali hidrojen atomları ve  $sp^3$  hibritleşmiş karbon atomlarının kovalent etkileşimi ile oluşmaktadır. Bu tür bağlanma mimarisinde elektronların bir bağ orbitalinden eşdeğer antibağ orbitaline geçebilmesi için büyük bir enerji gerekmektedir. Bir başka deyişle, konjuge olmayan polimerlerin dolu ve boş bantları arasındaki enerji aralığı çok yüksektir. Bu yapısal özellik konjuge olmayan polimerlerin yalıtkan malzeme gibi davranması ile sonuçlanır. Diğer taraftan, konjuge polimerlerin kimyasal bağ yapısı tekli ve çiftli karbon bağlarından meydana gelen omurga yapısına dayalıdır. Bu tür bir bağlanma, nispeten daha küçük enerji aralığına sahip olan bir " $\pi$ -konjuge bağ" ile sonuçlanır. Konjuge polimerlerde, kimyasal bağlanmanın bazı kısımları karbon atomlu  $sp^2$  hibridleri ve hidrojen atomlu 1s fonksiyonu ile oluşur. Kimyasal bağlanmanın diğer kısımları p fonksiyonu ile karbon atomları tarafından oluşturulmaktadır. Bu karbon atomları arasında  $\pi$  bağları bulunmaktadır [63]. Bu nedenle bir elektronun bir  $\pi$  bağından bir anti-bağa taşınması için daha az enerji gerektiğinden dolu ve boş bantlar arasındaki enerji aralığı konjuge olmayan polimerlere göre nispeten daha küçüktür [64]. Konjuge polimerlerde dönüşümlü tek ve çift karbon bağları elektron delokalizasyonuna yol açar. Delokalize elektronlar yarıiletken veya metalik özellikler sergileyen bir bant yapısı oluştururlar. Aynı zamanda bu elektronlar yük taşıyıcıları olarak görev yapmakta ve polimer zinciri boyunca hareket etmektedirler.

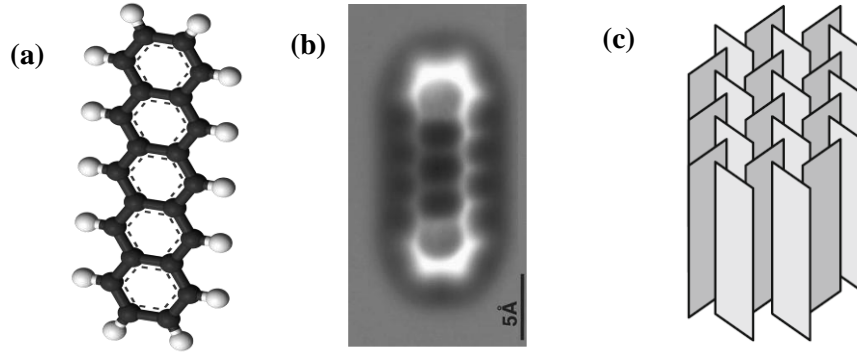
### 2.3.2. Küçük moleküller

Küçük moleküller yarıiletkenler, aromatik hidrokarbonları içeren düşük molekül ağırlıklı organik bileşiklerdir. Bu yarıiletkenler genellikle bir vakum sistemi içinde termal buharlaştırma yöntemiyle istenilen bir alttaş üzerine büyütülebilmektedirler. Buna karşın konjuge polimerler uygun çözücüler içerisinde çözülerek spin-kaplama veya mürekkep püskürtmeli baskı yöntemi ile büyütülebilmektedirler. Küçük moleküllerin buharlaştırma yöntemiyle istenilen kalınlıkta ve istenilen alttaşlar üzerine kaplanabilmesi polimerlere

kıyasla daha karmaşık ve çok katmanlı yapıların elde edilmesine imkan sağlamaktadır. Organik yarıiletkenlerdeki bant aralığı HOMO ve LUMO arasındaki enerji farkı ile belirlenir. Organik yarıiletkenlerin elektriksel ve optiksel özellikleri farklı büyüklükte moleküllerin sentezlenmesi, atomik düzenlemeler ve fonksiyonel grupların organik yapılara eklenmesi ile kolaylıkla ayarlanabilmektedir [5]. Pentasen, tetrasen ve rubren, polisiklik bir aromatik yapı içeren organik küçük moleküller arasında yer almaktadır. Nispeten yüksek taşıyıcı mobilitesine sahip olan pentasen ve bakır fitalosiyenin (CuPc) OFET’lerde ve güneş pillerinde aktif tabaka olarak yoğun bir şekilde kullanılmaktadırlar. Büyük molekül ağırlığına sahip polimer yarıiletkenler genellikle bir çözücüde çözünerek büyütülürken, pentasen ve CuPc gibi küçük molekül ağırlığına sahip organik yarıiletkenler vakum içinde buharlaştırma yöntemi ile büyütülmektedirler. Daha saf ve kalınlığı daha kesin organik yarıiletken filmler bu yöntem ile elde edilmektedir. Buna karşın bu yöntem malzeme kullanımı açısından verimsizdir.

### **2.3.2.1. Pentasen**

OFET’lerin performanslarının artırılmasında başlıca zorluklardan biri hava ortamında hem iyi çalışma kararlılığına hem de yüksek mobiliteye sahip konjuge yarıiletkenlerin geliştirilmesidir [65]. Örneğin küçük moleküllü hidrokarbon pentaseni ele alırsak, hem hava ortamında çalışabilmesi hem de nispeten büyük bir taşıyıcı mobilitesine ( $1 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) sahip olmasından ötürü OFET’lerin aktif tabakaları için popüler bir adaydır [66,67]. Kapalı formülü  $\text{C}_{22}\text{H}_{14}$  olan ve 278,36 g/mol moleküler ağırlığına sahip pentasen organik yarıiletkeni küçük bir moleküldür. Şekil 2.4 (a)’da görüldüğü gibi pentasen birbiri ile birleşmiş beş benzen halkasından oluşan polisiklik ve aromatik bir hidrokarbondur. Benzen halkaları doğrusal bir zincir içerisinde birleşerek delokalize olmuş elektronların serbestçe hareket edebileceği düzlemsel bir moleküler yapı oluştururlar. Pentasen molekülünün atomik kuvvet mikroskobu fotoğrafı Şekil 2.4 (b)’de gösterilmiştir. Pentasen tek kristalinin birim hücresi iki moleküllü triklinik yapıya sahip olup  $a = 0,592 \text{ nm}$ ,  $b = 0,754 \text{ nm}$ ,  $c = 1,563 \text{ nm}$ ,  $\alpha = 81,5^\circ$ ,  $\beta = 87,2^\circ$ ,  $\gamma = 89,9^\circ$  örgü parametrelerine sahiptir [68]. İnce film formunda, pentasen molekülünün karışık olmayan yapısı sıkı moleküler şekilde istiflenerek düzlemsel balıksırtı kristal yapısında büyümeyi sağlar [69]. Şekil 2.4 c’de pentasen moleküllerinin iki boyutlu balıksırtı kristal yapısında istiflenmesi görülmektedir [70,71].



**Şekil 2.4.** (a) *Pentasenin kimyasal yapısı* (b) *tek bir pentasen molekülünün atomik kuvvet mikroskobu görüntüsü* (c) *pentasen moleküllerinin iki boyutlu balıksırtı kristal yapısında istiflenmesi* ([69,72])

Pentasen filminin kalınlığı arttıkça yapısal olarak ortorombik fazdan ince film fazına, daha sonra da triklinik faza geçiş yaptığı düşünülmektedir. Küçük tane boyutuna yol açan yüksek çekirdeklenme yoğunluğundan dolayı düşük kalınlıktaki ince film formundaki pentasende tane sınırları sayısı vardır. Film kalınlığı arttıkça, tane sınırları büyür ve pentasen molekülleri de tane sınırları üzerinde büyür. Bu aşama pentasenin yapısal olarak ortorombik fazdan ince film fazına geçtiği evredir. Kalınlık biraz daha artarsa, pentasen ince film fazı daha büyük tane sınırları ile triklinik faza dönüşecektir [73-75]. Pentasen düşük moleküler ağırlığından dolayı yüksek vakum sistemlerinde kolaylıkla buharlaştırılabilmektedir. Bu da mükemmel büyüme özelliklerine ve kimyasal kararlılığa sahip yüksek saflıkta ince filmlerin oluşturulmasını sağlar. Pentasen gibi küçük moleküllü yarıiletkenlerin moleküler hizalanması ve tane morfolojisi üzerine büyütüldüğü malzemenin yüzey pürüzlülüğüne ve yüzey enerjisine kuvvetli bir şekilde bağlıdır. Dielektrik tabakanın düşük yüzey enerjisi pentasen moleküllerinin dikey büyümesini sağlar. Holler pentasen moleküllerin dikey hizalanması içinde kolayca hareket edebilirler. Pentasenin bu dikey hizalanması OFET’lerde mobilitayı arttırmaktadır [76]. Dielektrik-yarıiletken ara yüzeyinin yüksek yüzey enerjisini azaltmak için inorganik malzemeler üzerine polimerler kaplanarak dielektrik tabakalar oluşturulmaktadır. Polimerlerin kapı yalıtkanlarının düşük dielektrik sabitleri de düşük voltaj cihaz uygulamalarında kısıtlamalara sebep olmaktadır. Bu nedenle OFET’lerin elektriksel performansını arttırmak için yüksek dielektrik sabitli inorganik yalıtkanlar ile düşük yüzey enerjili polimer yalıtkanlar hibritleştirilerek yeni yalıtkan malzemeler üretilmektedir. Organik yarıiletkenlerde taşıyıcı mobilitesi ( $\mu$ ), transistörlerde en önemli özelliklerden biri olup, çok farklı değerlere sahip olan ve geniş bir yelpazede değişen

büyükliklere sahiptir. p-tipi küçük moleküllü organik yarıiletken olan pentasen, kimyasal ve termal kararlılığının yanı sıra diğer organik materyallere kıyasla yüksek mobiliteye sahiptir. Bu nedenle OFET'lerde çok sık çalışılmaktadır. Vakum altında buharlaştırma metodu ile büyütülen pentasen tabanlı OFET'lerin mobiliteleri tipik olarak  $0,5-1,5 \text{ cm}^2\text{V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  arasında değişmekte olup,  $5 \text{ cm}^2\text{V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  kadar yüksek mobiliteye sahip pentasen tabanlı OFET'ler rapor edilmiştir. Elde edilen bu mobilite değeri sayesinde pentasen, pratik elektronik uygulamalarında yoğun bir şekilde kullanılan a-Si:H inorganik yarıiletkeni ile karşılaştırılabilir konuma gelmiştir [77,78]. Pentasenin kimyasal bir çözücü yardımıyla çözünememesi işlenebilirlik açısından bir eksiklik olabilir. IBM'de görevli araştırmacılar çözünebilir pentasen geliştirmişler, fakat bu pentasen kullanılarak elde edilen OFET'lerin mobilitesi ( $0,02 \text{ cm}^2\text{V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) vakum altında büyütülmüş pentasen OFET'lere göre çok daha düşük seviyede kalmıştır [34]. Kawasaki ve ark. [79] mürekkep-püskürtme yöntemi ile elde ettikleri pentasen tabanlı OFET'in mobilitelerini  $0,15 \text{ cm}^2\text{V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  ve açma/kapama oranını ise  $10^5$  olarak rapor etmişlerdir. Mobilite, yarıiletken filmin yüzey morfolojisine oldukça bağlıdır. Filmin morfolojisi, çözelti konsantrasyonu, alttaş sıcaklığı, çözücünün bileşimi ve kaplama esnasındaki çevre şartları gibi işlem koşulları tarafından doğrudan etkilenmektedir [31]. Bu sonuçlar, iyi kalitede pentasen filminin oluşturulabilmesi için vakumla buharlaştırmanın gerekli olduğunu göstermektedir.

### 3. DİELEKTRİK MALZEMELER

Dielektrik malzemeler OFET’lerde önemli rol oynamaktadır. Bir alan etkili transistörde dielektrik filmi, kapı elektrotunu organik yarıiletkenle izole etmek için kullanılır ve yarıiletkenle temas halinde bulunur. Tarihsel olarak silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) kapı yalıtkanı silisyum yarıiletkeni ile olan mükemmel uyumundan dolayı elektronik teknolojisini egemenliği altına almıştır [80]. Ne var ki, silisyum dışında hem organik [81,82] hem de inorganik [83,84] yarıiletken malzemelerle oluşturulan transistörlerdeki performans artışları, beraberlerinde yeni kapı malzemelerinin gerekliliğini de ortaya çıkarmıştır. Bununla birlikte, son yıllarda elde edilen  $\text{SiO}_2$  yalıtkan tabakalı OFET’lerin etkileyici gelişiminin yanında, bu yapıların dezavantajlı yönleri de giderek artmaktadır. Termal olarak oksitlenmiş  $\text{SiO}_2$  imalatı yüksek sıcaklık gerektirmektedir. Bu işlem yüksek enerji tüketimine sebep olmakla beraber, esnek alttaşların üzerine büyütülmesini de imkânsız kılmaktadır. Öte yandan,  $\text{SiO}_2$ ’nin düşük dielektrik sabiti nedeniyle kapasitans yoğunluğu da genellikle çok küçüktür [85]. Bu durum OFET’lerin 30V’dan daha yüksek çalışma voltajlarına sahip olmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak, RF-ID kartlar, taşınabilir sensörler, elektronik kâğıtlar ve mobil cihazlar gibi düşük çalışma voltajı gerektiren uygulamalar için bu yüksek çalışma voltajları sorun oluşturmaktadır. OFET’ler için yeni dielektrik malzemeler yüksek dielektrik sabitine, düşük sızıntı akımına, yüksek termal kararlılığa ve yüksek kırılma gerilimine sahip olmalıdır [86]. OFET’lerde yüksek kapasitans, transistörlerin düşük çalışma voltajına ve daha yüksek mobiliteye sahip olmasını sağlamaktadır [87]. Aynı zamanda kaçak akımları olabildiğince düşük tutmak, cihazlarda güç tüketimini azaltabilir [88]. Dielektrik sabiti yüksek olan yalıtkan malzemeler, kanaldan geçen yüksek akım değerleri için transistörlerin çalışma gerilimini entegre devre uygulamalarında istenilen değerlere düşürmektedir. OFET’lerde kullanılacak dielektriklerin yüksek dielektrik sabitine sahip olmasının yanısıra, diğer özellikleri arasında çözelti formunda elde edilmesi ve herhangi bir yüzeye kolaylıkla (elbise, plastik, cam vs.) kaplanabilmesi sayılabilir. Çünkü elektronik teknolojisinde ticarileşmeyi planlarken dielektrik malzemelerin kolay işlenmesi teknik ve ekonomik açıdan önemlidir.

Dielektrik malzemelere elektrik alan uygulandığında yük konumlarında bir miktar kayma gerçekleşir ve malzeme içinde dielektrik kutuplaşma meydana gelir. Bu işlem

esnasında pozitif ve negatif yükler zıt elektrik alanlar yönünde hareket ederek malzemenin içinde bir iç elektrik alanını oluşmasına neden olur. Dielektrikler normal olarak ya kapasitörlerin ya da transistörlerin yalıtkan katmanı olarak çalışırlar. Bir kapasitörde dielektrik malzeme iki elektrot kontak arasında bulunmaktadır. Dielektrik malzemeler yüksek enerji bant aralığına sahiptir. Yalıtkan malzemede bulunan elektronlar yüksek bir enerji altında hareket edebilirler. Bu durumda dielektrik malzeme bozulur ve yalıtkanlık özelliklerini kaybeder. Gerçekte kapasitörler sızıntı akımı denilen az miktarda akımın akmasına izin verir. Sızıntı akımları off akımını arttırarak transistörler için önemli bir parametre olan anahtarlama oranı açma/kapama değerini düşürmektedir. Sızıntı akımları pratik cihaz uygulamalarında istenmeyen bir durum olan güç tüketimini de arttırmaktadır. Sızıntı akımlarının minimize edilmesi için yüksek dielektrik sabitine sahip yalıtkan malzemeler üzerine çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Moore yasasının sınırlılığı [89] göz önünde bulundurulduğunda, OFET'lerin sızıntı akımlarının azaltılabilmesi için yeni dielektrik malzemelerin üretiminin yanında cihazın da optimize edilmesi gerekmektedir. Dielektrik malzemelerin kalınlığının azalması ile birlikte sızıntı akımları eksponansiyel olarak artmakta, bununla beraber daha kalın yalıtkan tabakalarda ise kapasitans değeri düşmektedir. Bu olgu göz önünde bulundurulduğunda, ürettiğimiz cihazda maksimum verim elde edebilmemiz için yalıtkan tabakanın kalınlığının dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. Dielektrik malzemeler esas olarak yapıda yük iletiminin olmaması üzerine karakterize edilirler [90]. İki elektrodun  $d$  kalınlığında vakum ortamı ile ayrıldığını ve bu kontaklara elektrik alanının oluşturulması için bir gerilimin uygulandığını farz edersek, birim alan başına düşen yük aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$Q = \epsilon_0 E = \frac{\epsilon_0 V}{d} \quad (3.1)$$

Kapasitans da aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon_0}{d} \quad (3.2)$$

Elektrotlar arasına bir dielektrik malzeme yerleştirildiğinde ise kapasitans, malzemenin dielektrik sabiti olan  $k$  faktörü kadar artar ve birim alan başına düşen kapasitans miktarı aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir.

$$C_i = k \frac{\epsilon_0}{d} \quad (3.3)$$

OFET'lerde kullanılan dielektrik kapı malzemesinin yüksek dielektrik sabitine ve düşük kalınlığa sahip olması istenilen bir durumdur. Bu sayede birim alan başına yüksek kapasitans elde edilebilecek ve bu sayede OFET'in düşük çalışma voltajına sahip olması sağlanabilecektir.

### 3.1. İnorganik Dielektrik Malzemeler

Alan etkili transistör teknolojisinde en çok kullanılan kapı yalıtkanı 3,9 dielektrik sabitine sahip SiO<sub>2</sub> olmuştur [91]. Popülaritesinin bu kadar yüksek olmasının sebebi mevcut silikon teknolojisidir. Yüksek kalite ve pürüzsüz yüzeyi ile silikon dioksit termal oksidasyon yöntemi ile doğrudan silisyum üzerine elde edilebilmekte ve birçok transistör uygulaması için tekrarlanabilir sonuçlar sağlayabilmektedir [92]. Bununla birlikte SiO<sub>2</sub> yalıtkan malzemesi bir dielektrik malzeme olarak sınırlarına ulaşmıştır. SiO<sub>2</sub> yalıtkanının diğer bir dezavantajı da yarıiletken ve yalıtkan tabaka arasındaki birçok elektronun silanol denilen hidroksil grupları tarafından tuzaklanmasıdır [93]. Bu durum SiO<sub>2</sub> yerine kullanılacak yeni dielektrik malzemelerinin geliştirilmesi ihtiyacını ortaya koymaktadır. Düşük dielektrik sabitli SiO<sub>2</sub> yalıtkanının kapasitansını arttırmak için kalınlığın azaltmak gerekmektedir. Fakat böyle olunca sızıntı akımları artış göstermekte ve yüksek sızıntı akımları da OFET'lerde yüksek güç tüketimin yanında cihazın güvenilirliğini de düşürmektedir. 3 nm SiO<sub>2</sub> kalınlığına sahip bir kapasitöre 1V gerilim uygulandığında sızıntı akımı 10<sup>-5</sup> A/cm<sup>2</sup> iken, bu kalınlık 2 nm düşürüldüğünde sızıntı akımı değeri yaklaşık olarak 10<sup>6</sup> kat artarak 10 A/cm<sup>2</sup> değerine ulaşmaktadır [90]. Bu nedenle sızıntı akımını en aza indirmek için yüksek dielektrik sabitine sahip kapı yalıtkanları kullanılmalıdır. OFET'lerin performanslarının iyileştirilmesi için hem yalıtkanın dielektrik sabiti hem de kalınlığı göz önünde bulundurulmalıdır. Yeni dielektrik malzemelere olan ilgi öncelikle ucuz cihaz üretim işlemlerinin gerekliliğinden ve esnek/basılı elektronik teknolojileri için gerekli olan çalışma voltajlarının düşürülmesinden kaynaklanmıştır. Aslında OFET'lerin geliştirilmesindeki en büyük zorluklardan biri SiO<sub>2</sub> kapı dielektriğinin kullanılması ile oluşan yüksek çalışma voltajlarıdır. Düşük çalışma gerilimine sahip uygulamaların önemi eşik voltajı ve alt eşik salınım değerinin düşürülmesinde yatmaktadır. Her iki parametre temelde kapı yalıtkanı

tarafından kontrol edilmektedir. Bu nedenle yeni teknolojiler için ihtiyaç duyulan gereksinimleri karşılamak için ince ve yüksek  $k$  dielektrik sabitine sahip yeni kapı yalıtkan malzemelerinin aranması zorunluluk teşkil etmektedir. Bu gereksinimlerden biri de, yüksek kapasitanslı kapı yalıtkan kullanılarak elde edilebilen aygıt boyutunun düşürülmesidir. Bu bağlamda  $\text{SiO}_2$ 'nin cihaz uygulama sınırlarına ulaşması ile beraber birçok araştırmacı hafniyum oksit ( $\text{HfO}_2$ ), tantalyum pentaoksit ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ), alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), itriyum oksit ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) ve titanyum oksit ( $\text{TiO}_2$ ) gibi alternatif inorganik kapı yalıtkan malzemelerini incelemektedir.

Yüksek  $k$  değerli dielektrik malzemeler aşağıdaki özelliklere göre seçilmektedir [94].

- Yüksek geçirgenlik
- Yüksek bariyer yüksekliği
- Düşük kaçak akımı
- Düşük güç tüketimi
- Düşük doğrudan tünelleme etkisi
- Silisyum alttaşlar üzerinde yüksek kararlılık
- Kapı elektrodu ile uyumlu olması
- Ucuz büyütme işlemlerine sahip olması

Yüksek- $k$  dielektrik sabitli malzemenin zorlukları ise şunlardır:

- Mobilite bozulması
- Sabit yükler
- Elektron ve holler için enerji bariyerinin düşmesi nedeniyle sıcak taşıyıcı etkileri
- Silisyum alt katmanın üzerine oksijen ve katkı difüzyonu
- Yük tuzaklanmaları ve eşik voltajı kaymaları

### 3.1.1. Alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

Anodize Alüminyum oksit veya anodize alümina, litografi yardımı olmadan nano gözenekli yapılar oluşturabildiği için elli yıla yakın çalışılmaktadır [95]. Elektronik dünyasında  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'in kuantum noktalar [96], fotonik cihazlar [97], manyetik hafıza cihazları [98] ve transistörlerde kapı yalıtkanı [99] gibi birçok uygulaması bulunmaktadır.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'in OFET'lerde kapı dielektriği ( $k = 8$ ) olarak kullanılması ilk olarak 2002 yılında

Ha ve ark. [100] tarafından radyofrekans (rf) magnetron yöntemi kullanılarak rapor edilmiştir. Oda sıcaklığında elde edilen  $Al_2O_3$ 'in, termal yolla büyütülen  $SiO_2$ 'den daha yüksek kapasitansa, daha düşük sızıntı akımına ve daha az yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğunu rapor edilmiştir. Shin ve ark. [101] PMMA yüzey pürüzlülüğünün pentasen bazlı OFET performansı üzerindeki etkisini incelediler. Farklı 3 kalınlığa sahip (160nm, 140nm, 100nm) PMMA polimerinin anodik  $Al_2O_3$ 'in üzerine büyütülmesi ile farklı kapı yalıtkanları ile OFET'ler oluşturuldu. PMMA'nın kalınlığı azaldıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı görüldü. PMMA'nın yüzey pürüzlülüğünün alan etkili mobilite (sırasıyla  $0,30 \text{ cm}^2V^{-1}s^{-1}$ ,  $0,30 \text{ cm}^2V^{-1}s^{-1}$  ve  $0,28 \text{ cm}^2V^{-1}s^{-1}$ ) üzerine çok fazla etkisinin olmadığı gözlemlendi. Noh ve ark. [102] saf PVP yalıtkanın sızıntı akımlarını azaltmak ve kapasitans değerini arttırmak için  $Al_2O_3$  nanoparçacıklarının PVP çözeltisi içine nanokompozit kapı yalıtkanını geliştirdiler. Nanokompozit tabanlı esnek transistörün tekrarlanan dönüşümlü bükülme testleri altında sızıntı akımları değişmezken, saf PVP katmanının sızıntı akımlarının arttığı rapor edildi. Yeni kapı yalıtkanı nanokompozit tabaka sayesinde esnek transistörün hem elektriksel hem de mekanik kararlılığının arttığı gözlemlendi.

### 3.1.2. Titanyum dioksit ( $TiO_2$ )

Titanyum dioksit son zamanlarda olağanüstü optik ve elektriksel özelliklerinden dolayı kapsamlı bir şekilde çalışılmaktadır. Yapılan çalışmalarda  $TiO_2$ 'in dielektrik sabitinin 40-86 arasında değiştiğini rapor edilmektedir [103]. Bu değişkenliğin sebebi olarak düşük geçirgenliğe sahip ara yüzey tabakalarının varlığının ve geçirgenliğin kristal faz üzerindeki bağımlılığının olduğu düşünülmektedir.  $TiO_2$  optik bant aralığı, kristal fazına ve saflığına bağlı olarak 3,0 ve 3,5 arasında değerler almaktadır [104]. Oksit tabakasında bulunan safsızlıklar da ara yüzey tabakasının oluşumuna ve atomların tuzaklanmasına yol açabilmektedir.  $TiO_2$  ( $\kappa=41$ ) ilk kez G. Wang ve ark. [105] tarafından poli (3-hekzil) tiyofen tabanlı OFET'te kullanıldı. Elde edilen OFET'in mobilitesi yaklaşık olarak  $5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2V^{-1}s^{-1}$  ve eşik voltajı da 2V olarak bulundu. OFET'lerde iletken kanal, yarıiletken ve kapı yalıtkanı arayüzeyinde olduğundan dolayı dielektrik tabakanın yüzeyi, transistörün performansı için önemlidir. Kim ve ark. [106] pentasen tabanlı OFET'leri üretirken kapı yalıtkanı olarak 3,9 dielektrik sabitine sahip PVP polimeri ve 5,2 dielektrik sabitine sahip  $TiO_2(PVP)$  kompozitini kullandılar.  $TiO_2(PVP)$

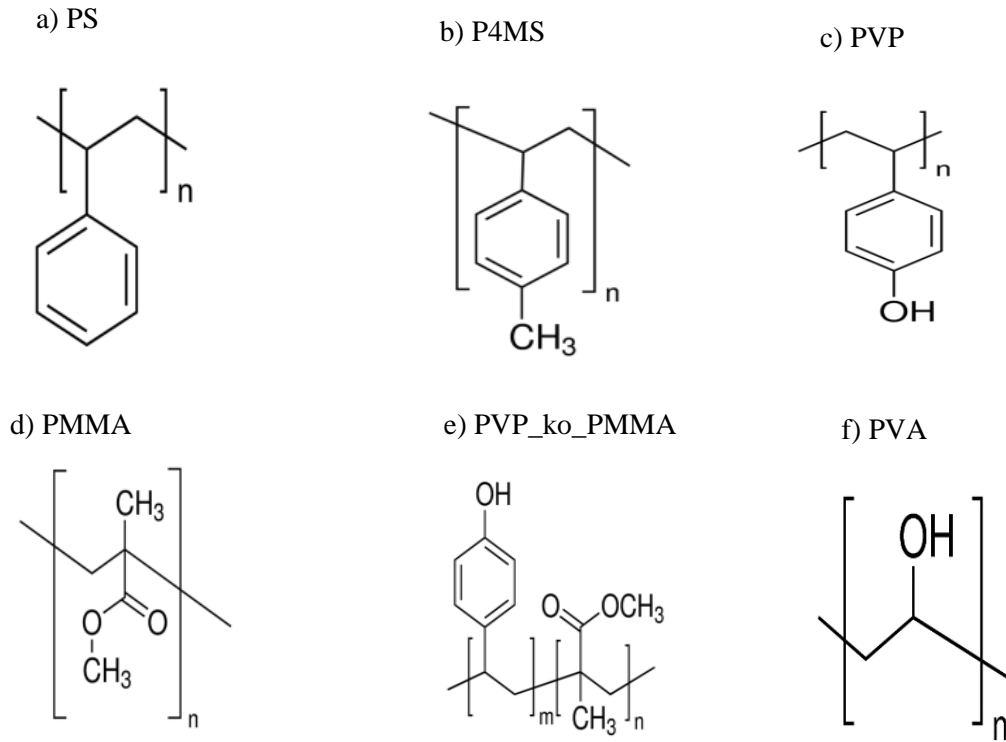
kompoziti ve PVP kapı yalıtkanları ile oluşturulan OFET'lerin mobiliteleri sırasıyla 0,105  $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  ve 0,036  $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  olarak elde edildi. Pentasen aktif tabakalı ve  $\text{TiO}_2(\text{PS})$  kompozitinin [107],  $\text{TiO}_2(\text{PS})+\text{PS}$  bilayer tabakasının [108] ve  $\text{TiO}_2$  (poli(metilmetakrilat-ko-metakrilik asit)) [109] kompozitinin kapı yalıtkanı olarak kullanıldığı OFET uygulamalarında mobilite sırasıyla 0,2  $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ , 1,3  $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  ve 0,53  $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  olarak bulundu.

### 3.2. Organik Dielektrik Malzemeler

Silisyum dioksitin istenmeyen özelliklerinden kaçınmak için diğer dielektrik materyallerin araştırılması OFET'ler için umut verici bir çözüm olmaktadır. Bu amaçla yeni kapı yalıtkanlarının geliştirilmesi için üç strateji bulunmaktadır.

Bunlardan birincisi inorganik elektronikte yaygın olarak kullanılan yüksek  $\kappa$  dielektrik sabitine sahip malzemelerin  $\text{SiO}_2$  yerine kullanılmasıdır. Yukarıda bahsedilen yüksek  $\kappa$  değerine sahip metal oksitlerin sahip oldukları avantajların yanı sıra bazı kaçınılmaz eksiklikleri de bulunmaktadır. Öncelikle bu malzemelerin yüksek tavlama sıcaklıkları, plastik alttaşlar üzerine büyütülebilmelerini zorlaştırmaktadır. Bununla beraber yüksek maliyetli işlem süreçleri de elektronik teknolojisinde maliyetleri arttırmaktadır. Aynı zamanda hidroksil (-OH) grupları genel olarak bu yüksek  $\kappa$  değerine sahip metal oksitler içinde bulunmakta ve bu hidroksil gruplar yarıiletken ve yalıtkan arasında istenmeyen ara yüzey durumlarına sebebiyet vererek cihazın mobilitelerini, kararlılığını ve sızıntı akımı gibi parametrelerini olumsuz yönde etkilemektedir [82,110]. İkincisi ise, polimer dielektrik malzemelerin kullanılmasıdır. Polimerler basit işlem süreçlerine, iyi mekanik özelliklere ve nispeten daha düşük dielektrik sabitlerine sahiptir. Yine de sızıntı akımının azaltılması için polimer kalınlığının artırılması, düşük dielektrik sabitleri nedeniyle yüksek çalışma voltajlarına sebep olmaları ve organik yarıiletken tabakası ile polimer ara yüzeyinde yüksek yoğunluklu kusurların bulunması gibi kısıtlamalar polimerleri geniş cihaz uygulamalarında sınırlandırmaktadır. Ayrıca yalıtkan polimerler yarıiletken morfolojisine zarar vermediklerinden dolayı hem üst hem de alt kapı kontak geometrisine sahip transistörlerde kullanılabilirler. Organik transistörlerde kullanılacak yalıtkan tabakanın düşük kalınlığa ve düşük çalışma voltajları için de yüksek dielektrik sabitine sahip olması arzu edilmektedir. Bununla beraber yalıtkanın yüzeyinde küçük

çıkıntı veya çukurların olması cihazın alan etkili mobilitesini negatif yönde etkileyebilmektedir [111]. Üçüncüsü ise, kapı dielektriği olarak hibrit inorganik-organik yalıtkanlar, polimerik nano parçacıklı kompozitler, inorganik-organik çift tabakalı filmlerin kullanılmasıdır. OFET’lerde polimerlerin kapı yalıtkanı olarak ilk başarılı uygulaması peng ve ark. [112] tarafından gerçekleştirilmiştir. Peng ve grubu farklı polimer yalıtkan tabakalar kullanarak a-sexithienil ( $\alpha 6T$ ) aktif tabakalı transistörler ürettikler. Ürettikleri polistren (PS;  $\kappa \approx 2,6$ ) ve polimetilmetakrilat (PMMA;  $\kappa \approx 3,5$ ) yalıtkan tabakalı transistörlerde alan etkili akım meydana gelmemiştir. Buna karşın polivinil alkol (PVA;  $\kappa \approx 7,8$ ) ve siyanoetil pullulan (CYEPL;  $\kappa \approx 18,5$ ) kapı polimerleri için iyi sonuçlar elde edilmiştir ve CYEPL tabanlı transistörden elde edilen mobilite değeri  $\text{SiO}_2$  tabanlı transistörden daha büyük bir değere sahiptir. Yaptıkları çalışma sonucunda alan etkili mobilite ve yalıtkanın dielektrik sabiti arasında güçlü bir ilişkinin olduğunu gösterdiler.



**Şekil 3.1.** Bazı yalıtkan polimerlerin kimyasal yapısı. (a) polistren, (b) poli(4) metilstren, (c) poli-(4)vinilfenol, (d) polimetilmetakrilat, (e) polivinilfenol\_ko\_polimetilmetakrilat, (f) polivinil alkol

### 3.2.1. Polistren (PS)

Polimer zincirinde benzen halkaları içeren polistrenin kimyasal yapısı Şekil 3.1’de gösterilmektedir. Yapıda hidroksil gruplarının (-OH) olmadığı açıkça görülmektedir. Bu nedenle çapraz bağlanmaya gerek duyulmamaktadır. Polistrenin bu kimyasal yapısı polimerin havada yüksek kararlılığa ve istenilen dielektrik özelliklere sahip olmasını sağlamaktadır. Halik ve ark. [113] ürettikleri transistörlerde kontak elektrotu olarak polistren katkılı poli (3,4-etilendioksitiyofen)’ni, yalıtkan tabaka olarak poly-4-vinilfenolü ve aktif tabaka olarak da pentasen yarıiletkenini kullanmışlardır. Ürettikleri pentasen tabanlı transistörün mobilite değeri ( $0,1 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ),  $\text{SiO}_2$  yalıtkanı kullanılarak oluşturulan pentasen tabanlı transistörün değerine yakın bulunmuştur. Fakat açma/kapama oranı daha küçük (polimerik- $10^3$ ,  $\text{SiO}_2$ - $10^6$ ), alt eşik salınım değeri (polimerik-5 V/decade,  $\text{SiO}_2$ -0,7 V/decade) ise daha büyük bulundu. Maliakal ve ark. [114] titanyum oksit-polistren nanoparçacıklarını değişik oranlarda saf polistren ile karıştırarak farklı dielektrik sabitlerine sahip (2,5-8) yalıtkan filmler elde ettiler. Pentasen aktif tabakalı transistörlerde kullanılan farklı dielektrik sabitlerine sahip yalıtkan filmlerin transistörün alan etkili mobilitesini arttırdığı rapor edildi. Organik yarıiletken-dielektrik ara yüzey özellikleri OFET’lerin performansını etkilemede kritik bir rol oynamaktadır. Diğer bir çalışmada yalıtkan tabaka olarak  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /polistren,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /divinyl tetra methylsiloxane-bis (benzocyclobutene) (BCB) ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /octadecyl-trichlorosilane (OTS) bilayer tabakalar kullanılarak pentasen aktif tabakalı OFET’ler elde edilmiştir. En iyi transistör performansı  $0,64 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  mobilitesi,  $7,2 \times 10^5$  açma/kapama oranı ve 0,2 alt eşik salınım değerine sahip olan  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /polistren bilayer yalıtkan tabakanın kullanıldığı OFET’ten elde edilmiştir. Cihaz performansının, pentasen filmlerinin yapısal hizalanması ve kapı yalıtkanlarının yüzey özellikleri ile ilişkili olduğu gözlemlendi.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  üzerine büyütülen hem PS hem de BCB’nin düşük yüzey enerjileri ve pürüzsüz yüzeyleri sayesinde büyük tane boyutlarına sahip pentasen aktif tabakalar oluşturularak yüksek mobilitelere sahip transistörler elde edilmiştir. Fakat sürekli dc kapı voltajı uygulanması ile gerçekleştirilen kararlılık testlerinde BCB yapılı transistörün parametrelerinin kötüleştiği görüldü [115]. Feng Ge ve ark. [116] homojen, tekdüze ve hidrofobik yalıtkan bir yüzey oluşturmak amacıyla 1,66 ila 7,35 nm arasında değişen zincir uzunluklarına sahip polistreni 300 nm kalınlığındaki  $\text{SiO}_2$  üzerine yüzeyde başlatılan atom transfer radikal polimerizasyonu yöntemi ile büyüttüler. Farklı zincir uzunluklarına sahip polistren üzerine aktif tabaka olarak kullanılan 6,13-bis(triisopropylsilylethynyl)

pentasenin (TIPS-pentasen) farklı kristal morfolojilerinde oluştuğu gözlemlendi. Kısa PS zincirleri SiO<sub>2</sub> üzerinde kendi kendine tek tabaka oluşumu (self-assembled monolayer) ve küçük kristallerin rastgele yönelimleri gibi davrandılar. Optimum cihaz performansı  $0,35 \pm 0,23 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 'lik ortalama mobilite ile 5.14 nm'lik PS zincir uzunluğuna sahip OFET'ten elde edildi. PS polimerin zincir uzunluğu arttıkça, TIPS-pentasen moleküllerinin daha büyük kristal oluşturduğu gözlemlendi. OFET'teki yüksek mobilite değeri, uzun polimer zincirine sahip tabakanın aktif yarıiletken mürekkebinin viskozitesine katkıda bulunmasına atfedilmiştir.

### 3.2.2. Polimetilmetakrilat (PMMA)

Polimetilmetakrilat (PMMA) termal ve mekanik kararlılığa, yüksek dirence, uygun dielektrik sabitine sahip polimerik organik bir malzemedir. Bu özelliklerinden dolayı PMMA elektronik dünyasında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. PMMA ilk olarak 1933'te Alman kimyager Otto Röhm tarafından kapı dielektriği olarak kullanılmıştır [117]. Buna ek olarak, PMMA'da bulunan hidrofobik metil radikal grubu havadaki neme karşı direncini de arttırmaktadır [118]. PMMA'nın kimyasal yapısı Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Yun ve ark. [119] PMMA yalıtkan film kalınlığının pentasen tabanlı OFET'in performansı üzerindeki etkisini inceledi ve transistör mobilitésinin kapı yalıtkan kalınlığının azalması ile arttığını gözlemledi. Optimum transistör performansı  $0,3 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  mobilitesi, -4 V eşik voltajı,  $10^6$  açma/kapama oranı ve 1,5 V/decade alt eşik salınım değeri ile 150 nm kalınlığındaki OFET'ten elde edildi. Transistör kararlılığı ticari uygulamalarda en az mobilite kadar önemlidir. Xiang ve ark. [120] ürettikleri transistörlerde yalıtkan tabaka olarak birinde saf PMMA, diğesinde ise PMMA/tetratetrakontan ikili yapısını kullandılar. İkili yapının kullanılması ile pentasen aktif tabakasının morfolojisinin iyileştiği ve pentasen/dielektrik ara yüzündeki tuzak yoğunluğunun azaldığı görüldü. Sadece PMMA'nın kullanıldığı transistörde  $\sim 0,18 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ , PMMA/tetratetrakontan ikili yapının kullanıldığı transistörde ise  $\sim 0,81 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  alan etkili mobilite değerleri elde edildi. Bu durum PMMA/tetratetracontane üzerine büyütülen aktif tabaka pentaseninin tane boyutunun büyümesine atfedildi. Ye ve ark. [121] farklı kalınlıklardaki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kapı yalıtkanları (35 nm-102 nm) ve pentasen aktif tabakaları (50 nm) ile oluşturdukları transistörlerde en yüksek mobiliteyi  $0,65 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  ile 35 nm kalınlığına sahip Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kapı yalıtkanlı transistörden elde ettiler. Daha sonra 10 nm kalınlığında PMMA polimer yalıtkanı spin kaplama yöntemi ile tek katmanlı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

yalıtkan filmleri üzerine büyüterek yeni transistörler ürettikler. Ürettikleri  $\text{Al}_2\text{O}_3(35\text{nm})/\text{PMMA}(10\text{nm})$  tabanlı transistörden ise  $0,84 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  mobilite değeri elde ettiler. Transistör performansındaki bu değişim yarıiletken yalıtkan ara yüzeyinin cihaz performansı üzerindeki etkisini de açıkça göstermektedir. OFET’lerde cihaz performansı kapı yalıtkan yüzeyinin hidrofobik ve hidrofilik doğasından etkilenmektedir. Bununla beraber OFET’lerde dielektrik tabaka hem polarizasyon etkisinden hem de elektriksel düzensizlikten doğrudan sorumludur. Deman ve ark. [122] inorganik  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  yalıtkanı ve  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{PMMA}$  inorganik/organik bilayer yalıtkanı kullanarak pentasen aktif tabakalı OFET’ler ürettikler. Yalıtkan polimer ara tabakasının kullanılması ile elektriksel parametrelerinin iyileştiği görüldü. Anodizasyon ve reaktif elektron ışınım buharlaştırılması yöntemi ile hazırlanan tek tabaka  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  yalıtkan tabanlı transistörlerin alan etkili mobilitesi sırasıyla  $0,8 \times 10^{-2} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  ve  $0,15 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  olarak elde edildi.  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{PMMA}$  bilayer yalıtkan tabanlı transistörün ise  $0,2 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  olarak hesaplandı. Bilayer tabaka kullanılarak üretilen transistörde mobilite artışı pentasen tane boyutlarının büyümesine ve PMMA’nın hidrofobik yüzeyine atfedildi.

### 3.2.3. Poli (4-metilstren) (P4MS)

Polimer zincirinde benzen halkaları içeren, molekül ağırlığı  $\sim 72,000 \text{ gmol}^{-1}$  olan ve hidrofobik özelliğe sahip P4MS polimerinin kimyasal yapısı Şekil 3.1’de gösterilmektedir. Hidrofobik polimer dielektrikler üstün şarj depolama özellikleri sayesinde bellek malzemesi olarak da yoğun bir şekilde çalışılmaktadır [123]. P4MS’nin kapı yalıtkanı olarak kullanıldığı OFET uygulamaları sınırlı sayıda rapor edilmiştir. Kim ve ark. [124] farklı kalınlıklarda ve farklı büyütme sıcaklıklarında ürettikleri pentasen tabanlı OFET’lerin karakterizasyonunu gerçekleştirdiler. Üretilen OFET’lerde kapı yalıtkanı olarak da tek tabaka 300nm inorganik  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{SiO}_2/\text{PVA}$ ,  $\text{SiO}_2/\text{PS}$ ,  $\text{SiO}_2/\text{PVP}$ ,  $\text{SiO}_2/\text{P4MS}$  ve  $\text{SiO}_2/\text{poly}(2\text{-vinyl naphthalene})(\text{PVN})$  bilayer tabakalar kullanıldı. En yüksek alan etkili mobilite  $0,55 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  ile 50nm kalınlıklı pentasen aktif tabakanın ve  $\text{SiO}_2/\text{PVP}$  bilayer kapı yalıtkanı kullanıldığı OFET’ten elde edildi.  $\text{SiO}_2/\text{P4MS}$  kapı yalıtkanı ile 50nm ve 130nm kalınlığında pentasen aktif tabakanın kullanıldığı OFET’lerden ise sırasıyla  $0,1 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  ve  $0,03 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  mobilite değeri elde edildi. Nunes ve ark. [125] pentasen aktif tabakalı ve her biri yaklaşık  $1 \mu\text{m}$  kalınlığında 5 farklı strein temelli polimer kapı yalıtkanının ( $\text{PS}$ ,  $\text{PVN}$ ,  $\text{P4MS}$ ,  $\text{poly}(4\text{-vinylpyridine})$ ,  $\text{poly}(4\text{-hydroxystyrene})$ ) kullanılmasıyla elde ettikleri OFET’lerin elektriksel performansını

incelediler. Polimer kapı yalıtkanlarının OFET performansını üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görüldü. Ölçülen alan etkili mobilitelerin ise 0,1 ila 1  $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  arasında değiştiği görüldü.

#### **3.2.4. Poli-4vinilfenol (PVP)**

PVP polimeri çeşitli viskozite derecelerinde toz veya sıvı olarak bulunur. Bu viskozite dereceleri (düşük veya yüksek molekül ağırlığına sahip) PVP'nin sulu ve organik çözücüler içerisinde kolaylıkla çözünmesini sağlayarak malzemeye büyük bir esneklik kazandırmaktadır [126]. PVP polimeri yüksek kapasitans, düşük sızıntı akımı ve düşük yüzey enerjisi gibi özellikleri sayesinde OFET'lerde kapı yalıtkanı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [127]. Örneğin pentasenin yüzey morfolojisi üzerine büyütüldüğü filmin yüzey enerjisiyle doğrudan bağlantılıdır [128]. Buna ek olarak, bu polimerin sağlamlığı hekzametilentetramin veya melamin-ko-formaldehit gibi kimyasal malzemeler kullanılarak çapraz bağlama yöntemi ile arttırılabilmektedir. PVP polimerinin kimyasal yapısı Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Kwon ve ark. [129] pentasen yarıiletkeni ve çapraz bağlı PVP kapı yalıtkanın kullanıldığı OFET'te alan etkili mobilitayı  $1,64 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  olarak rapor ettiler. Bu yüksek mobilite değeri PVP yalıtkanı üzerinde büyütülen pentasenin daha büyük tane boyutuna atfedilmiştir. Kapı yalıtkanı olarak kullanılan PVP'nin büyütme parametreleri de OFET'in performansını etkilemektedir. Örneğin Hwang ve ark. [130] yapmış oldukları çalışmada pentasen aktif tabakalı transistörde kapı yalıtkanı olarak kullanılacak PVP'yi  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  vakum altında ve argon gazı altında 2 saat boyunca tavladılar. Vakum ve argon gazı altında oluşturulan PVP tabanlı OFET'lerin mobiliteleri sırasıyla  $0,87 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  ve  $0,59 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  olarak elde edildi. Bu durum hem vakum altında tavlanan PVP'nin düşük yüzey enerjisine hem de üzerine büyütülen pentasenin daha iyi kristallenmesine atfedildi.

#### **3.2.5. Polivinil Alkol (PVA)**

Polivinil alkol toksik olmaması, suda çözünebilmesi, nispeten yüksek dielektrik sabitine sahip olması ve çok ucuz olması nedeniyle OFET uygulamalarında kapı yalıtkanı olarak yoğun bir şekilde çalışılmaktadır [131]. Ayrıca PVA organik çözücülere karşı dirençli olup esnek yüzeylerde büyütülmeye uygundur. Molekül ağırlığı  $\sim 89,000 \text{ gmol}^{-1}$  olan ve  $[-\text{CH}_2\text{CHOH}-]_n$  kimyasal formülasyona sahip PVA polimerinin kimyasal yapısı Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Wang ve ark. [132] pentasen aktif tabakalı ve PVA ile

blokaj tabakasının (P(MMA-GMA)) farklı mimarilerde kullanıldığı OFET'lerin histeriz mekanizmalarını incelediler. Blokaj tabakasının kontak-PVA ve PVA-pentasen arasındaki yerleşimine göre OFET'ler incelendiğinde, histeriz kaynağının kapı kantağından, tuzaklardan veya kanaldan pentasen/PVA ara yüzeyine akmasından kaynaklandığı görüldü. Blokaj tabakanın hem kontak-PVA hem de PVA-pentasen arasına yerleştirilmesi ile oluşturulan OFET'in en az histerize ve en yüksek mobiliteye ( $1,48 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) sahip olduğu görüldü. Diğer bir çalışmada, Feng ve ark. [133] ultraviyole çapraz bağlı PVA kapı yalıtkanı üzerine polistren katkılı 6,13-bis(triisopropylsilylethynyl)-pentasen aktif tabakalı yarıiletkeni büyüterek plastik alttaş üzerine düşük çalışma voltajına sahip OFET'i ürettiler. Üretilen OFET 0-3V çalışma voltajına,  $0,8 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  mobiliteye,  $10^4$  açma/kapama oranına ve 0,1 V/decade alt eşik salınım değerine sahip olduğu görüldü.

### 3.2.6. Polivinilfenol\_ko\_Polimetilmetakrilat (PVP\_ko\_PMMA)

Elektronik teknolojisinde geniş alan kaplamasına imkan veren metotlar, kullanılan malzemelerin yapısal esnekliğe, düşük maliyete ve plastik alttaşlar üzerine büyütülebilme özelliklerine sahip olabilmesi endüstriyel uygulamalar için önemlidir. PVP\_ko\_PMMA polimeri bu özelliklere sahip iyi bir kapı yalıtkanıdır [134]. Molekül ağırlığı  $8000-12000 \text{ g mol}^{-1}$  olan ve  $[\text{CH}_2\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_4\text{OH})]_x[\text{CH}_2\text{C}(\text{CH}_3)(\text{CO}_2\text{CH}_3)]_y$  kimyasal formülasyona sahip PVP\_ko\_PMMA polimerinin kimyasal yapısı Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Li ve ark. [135] ürettikleri pentasen bazlı OFET'lerde çalışma voltajını düşürmek için yüksek dielektrik sabitine sahip poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene-chlorofluoroethylene) (P(VDF-TrFE-CFE)) yalıtkanı ile bu yalıtkanın yüzeyini modifiye etme amaçlı farklı polimer malzemeler kullandılar. En yüksek alan etkili mobilite PS ile modifiye edilmiş P(VDF-TrFE-CFE) kapı yalıtkanına sahip OFET'ten ( $0,62 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) elde edilirken PVP\_ko\_PMMA ile modifiye edilmiş P(VDF-TrFE-CFE) OFET'inde ise  $0,14 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  olarak bulundu. Aynı grubun bir başka çalışmasında [136] tek tabaka PS (660nm), PMMA (630nm), P4VP (530nm), P4VP-coPMMA (420nm) ve PVA (810nm) kapı yalıtkanları kullanılarak n-tipi poly{[n,n9-bis(2-octyldodecyl)-naphthalene-1,4,5,8-bis(dicarboximide)-2,6-diyl]-alt-5,59-(2,29-bithiophene)} P(NDI2OD-T2) aktif tabakalı OFET'ler hazırlandı. Bu OFET'lerin doyum bölgesindeki alan etkili mobilitesi sırasıyla  $0,76 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ,  $0,4 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ,  $0,30 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ,  $0,15 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  ve  $0,08 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  olarak bulundu.

## 4. İNCE FİLM ÜRETİM TEKNİKLERİ

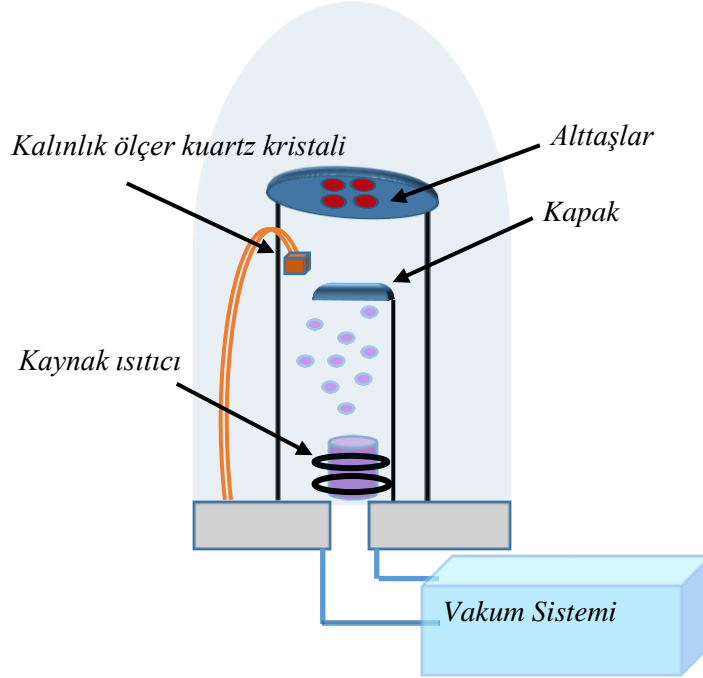
OFET'lerin performansı organik yarıiletken tabakanın, yalıtkan tabakanın ve kontakların oluşturulma yöntemine oldukça bağlıdır. Bunlar arasında, yarıiletken aktif tabakasının oluşumu cihaz performansında kritik bir rol oynar. Yarıiletken moleküllerden yüksek alan etkili mobilite elde etmek için  $\pi$  moleküler orbitaller arasında yeterli örtüşme olabilmesi için düzenli bir şekilde büyütülmeli [137] ve  $\pi$ - $\pi$  istifleme doğrultusu akımın iletimi ile aynı doğrultuda olacak şekilde ayarlanmalıdır. Ayrıca, uygun film morfolojisi ile organik yarıiletkenin büyük tane boyutlarına ve pürüzsüz tanelere sahip olması OFET'lerde yüksek alan etkili mobilite ile sonuçlanmaktadır [138]. Genel olarak, organik yarıiletken ince filmler yarıiletken malzemenin kimyasal yapısına bağlı olarak hem buhar hem de çözelti fazında oluşturulabilirler. Çeşitli büyütme koşulları organik malzemelerin farklı şekilde moleküler hizalanmasını ve farklı ince film morfolojilerinin oluşmasını sağlamaktadır.

### 4.1. Vakum İçinde Buharlaştırma Yöntemi

Organik yarıiletken ince filmler vakum termal buharlaştırma (VTE) [131], organik buhar faz biriktirme (OVPD) [139], organik moleküler demet biriktirme (OMBD) [140] ve lazer buharlaştırma [141] gibi süblimleşme metotları ile oluşturulabilirler. Vakum içinde en popüler ince film büyütme tekniği olan termal buharlaştırma tekniği, organik malzemenin ısıtılıp süblimleşmesi ile arzu edilen alttaş üzerine büyütülmesini sağlar. VTE tekniğinin birçok avantajı vardır. Bu yöntem kullanıldığında elde edilen filmler genellikle son derece düzgün ve pürüzsüz bir yapıya sahip olurlar. Büyütme işlemi sırasında sıralı veya eşzamanlı çok katmanlı filmlerin elde edilmesi bu yöntemle mümkündür. Ancak bu yöntemin yüksek malzeme tüketimine sebep olması ve pahalı donanımlara ihtiyaç duyması gibi bazı dezavantajları da vardır.

Şekil 4.1 tipik bir VTE sistemini göstermektedir. Büyütme işlemi esnasında sistemdeki basınç, büyütme hızı ve alttaş sıcaklığı gibi birçok parametre ince filmin oluşumunu büyük ölçüde etkileyebilir [142]. Sistemde düşük basınç kirlenmeyi en aza indirir ve süblimleşen organik yarıiletken moleküllerinin ortalama serbest yolu belirlenebilir [143]. Filmin büyütme hızı ve alttaş sıcaklığı organik yarıiletkenin

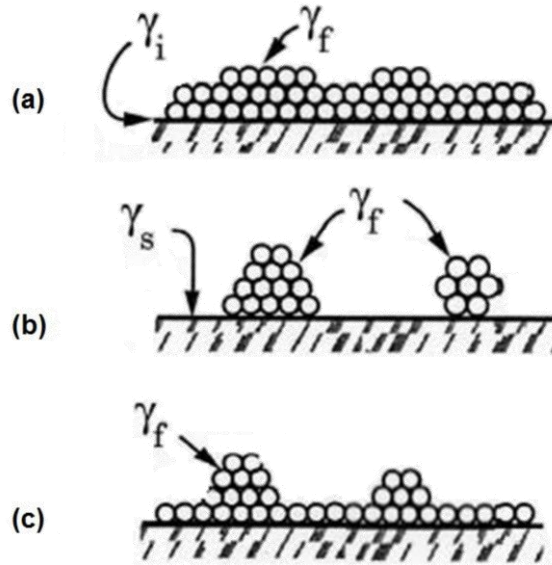
morfolojisini oldukça etkilemektedir [144,145]. Bununla birlikte, organik yarıiletken filmin üzerine büyütülecek yapının yüzey pürüzlülüğü ve yüzey enerjisi de filmin morfolojisini, dolayısıyla cihazın performansını etkilemektedir [146,147].



**Şekil 4.1.** Vakum termal buharlaştırma sistemi

Vakum altında numunenin büyütme şartları, yüzey özellikleri ve moleküler etkileşimler düşünüldüğünde ince film büyütme işlemlerini tanımlamak için üç mod bulunmaktadır. Bunlar tabaka üstüne tabaka büyüme modu (Frank-van der Merwe modu) [148], tabaka üstü ada büyüme modu (Stranski-Krastanov modu) [149] ve ada büyüme modudur (Volmer-Weber modu) [143]. Vakum depolama yöntemi ile organik bir yarıiletken farklı bir alttaşın üzerine büyütüldüğünde, filmin büyüme davranışı alttaşın yüzey enerjisinden kuvvetli bir şekilde etkilenir. Burada üç farklı yüzey enerjisi olduğu kabul edilir. Birincisi alttaşın serbest yüzey enerjisi ( $\gamma_s$ ), ikincisi alttaş film arayüzeyi enerjisi ( $\gamma_i$ ) ve üçüncüsü filmin serbest yüzey enerjisidir ( $\gamma_f$ ). Vakum altında buharlaştırılan ince filmlerin büyüme işleyişlerinin tartışılabilmesi için öncelikle yeterli yüzey difüzyonu olduğunu varsaymalıyız. Böylece tüm sistemin yüzey enerjisini en aza indirmek için büyütme malzemesi kendi kendini yeniden konumlandırabilir.  $\gamma_f$  ve  $\gamma_i$ ' nin yüzey enerjileri toplamı,  $\gamma_s$ ' nin yüzey enerjisine eşit ve büyük olduğunda tabaka üstüne tabaka modu etkin olur. Bu durumda, alttaş-film etkileşimi organik film içindeki

moleküller arasındaki etkileşimden daha kuvvetli olmalıdır. Aksi takdirde, güçlü moleküller arası etkileşimler veya yetersiz alttaş film etkileşimleri sonucunda film alttaşın üzerinde yeterince kaplanamaz ve düzgün homojen bir film yerine üç boyutlu (3D) adacıklar oluşur. Bu ise, ada büyüme modu olarak adlandırılır. Alttaş-film arayüzeyi enerjisinin ( $\gamma_i$ ) artan efektif değeri nedeniyle film kalınlaştıkça bir veya iki katmandan sonra büyüme tabakadan adaya doğru değişir ve bu büyüme tabaka üstü ada büyüme modu olarak adlandırılır. 3D çekirdeklenme (ada tarzı büyüme) OFET'ler için genellikle istenmeyen bir durumdur. Çünkü bu tarz büyümede keskin tane sınırlarına sahip, pürüzlü ve homojen olmayan filmler oluşur. Bu sınırlar tuzak merkezleri olarak davranıp OFET'te mobilitiyi oldukça düşürürler. Bunun aksine, tabaka üstüne tabaka büyüme modu OFET uygulamaları için istenen bir durumdur. Çünkü bu mod'da organik aktif yarıiletken tabaka birbirine düzgün bağlanmış büyük tanelerden meydana gelir. Bu durum taşıyıcı iletimini kolaylaştırarak yüksek mobiliteye sahip OFET'lerin üretimine olanak sağlar. Şekil 4.2'de film büyüme modları gösterilmektedir.



**Şekil 4.2.** Film büyüme modları: (a) tabaka üstüne tabaka büyüme modu (Frank-van der Merwe), (b) ada büyüme modu (Volmer-Weber), (c) tabaka üstü ada büyüme modu (Stranski-Krastanov) ([143])

## 4.2. Anodizasyon

Elektrokimyasal anodik oksidasyon, aynı zamanda Anodizasyon olarak da adlandırılır. Bu elektrokimyasal metot, metal yüzeyler üzerinde oksit katmanların

kontrollü oluşumunu sağlar. Anodizasyon yöntemi alüminyum yüzeyinde oluşturulacak oksit tabakasının kalınlığını kontrol etmek için kullanılabilir [150].

Organik yarıiletkenlerin doğasından kaynaklı (yük taşıma mobiliteleri vs.) bazı sınırlamalar nedeniyle, organik tabanlı transistörler de genellikle yüksek çalışma voltajlarına sahip olabilmektedir. Çalışma gerilimini aşağıya çekebilmek için kapı yalıtkanının kapasitansının artırılması bir çözüm olabilir. Bu nedenle yüksek dielektrik sabitine sahip yalıtkan malzemeler kullanılır. İdeal dielektrik tabakalar kararlı, düzgün, çatlaksız ve pürüzsüz yapıda olmalıdır [88,151,152]. Plastik gibi esnek yapılar üzerine yalıtkan metal oksit filmler elde etmek için düşük sıcaklıklarda çalışmak gerekir. Bu amaçla yüksek kalitede ve düşük sıcaklıklarda yalıtkan filmler elde etmek için bir çok metot kullanılmaktadır. Bunlardan anodizasyon yöntemi, bilimsel akademik araştırmalardan sanayi uygulamalarına kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Bu yöntem düşük maliyetli, plastik gibi alttaşlar üzerine uyumluluk ve ortam şartlarında sıvı çözelti içinde çalışılabilecek özelliklere sahiptir [43,153,154]. Alüminyum ucuz ve bol bulunan bir metal olduğundan anodizasyon işlemlerinde yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Alüminyum oksijenle çok yüksek kimyasal ilişkiye girecek bir elementtir. Bu nedenle çevre koşulları altında alüminyum hızlı bir şekilde oksijen ile reaksiyona girer ve yüzeyinde doğal bir oksit tabaka oluşturur [155]. Bu doğal oksit tabaka alüminyum metalinin daha fazla oksitlenmemesi için yeterli koruma sağlamasına rağmen, bu oksit kalınlığı (~5nm) elektronik cihazlarda kullanım için yeterli olmayıp çok fazla kusur ve delik içerebilmektedir [156]. Anodizasyon işlemi, doğal oksit tabakasını kalınlaştırmanın yanında deliklerin ve kusurların da sayısını azaltır [157]. Hazırlanma koşullarına bağlı olarak anodizasyon işlemi yüzeyin mikroskobik yapısını ve yüzeye yakın metal kısmın kristal yapısını değiştirebilir [158]. Bununla birlikte yalıtkan filmlerin bant aralığı azaldıkça dielektrik sabitleri artmaktadır [159]. Alüminyum oksit diğer yüksek dielektrik sabitine sahip yalıtkanlarla karşılaştırıldığında bant aralığı daha yüksektir [160]. Çizelge 4.1.'de listelendiği gibi anodizasyon yöntemi ile büyütülen alüminyum oksitlerin başlıca iki türü vardır [161-163]. Bunlar Bariyer tipi ve Gözenekli tiptir. Bu tipleri belirlemede önemli olan anodizasyon işlemi sırasında kullanılan elektrolit çözeltisinin türüdür. Nötr veya zayıf bir asit/baz çözeltisinde alüminyum oksit kolay çözünmez. Bu durumda oksit tabaka kompakt bariyer tipi büyüme eğilimindedir. Bunun aksine, kuvvetli asit/baz çözeltisinde oksit tabaka sadece oluşmaz aynı zamanda çözelti içinde erir. Bu durumda oksitlenmiş alüminyumun büyük bir bölümü film olarak korunmaz ve gözenekli bir

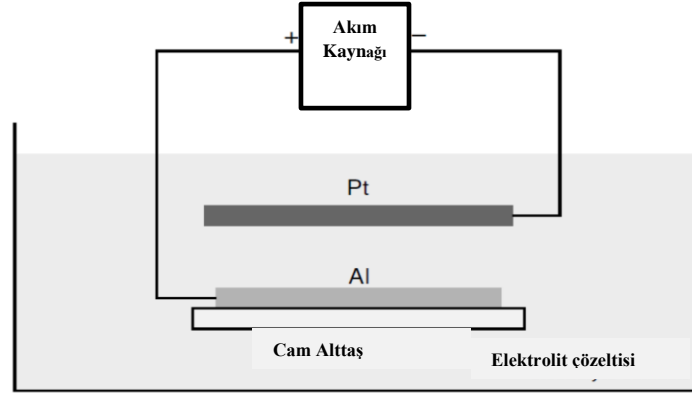
yapıya sahip olur. Bu tarz büyümeye gözenekli tip büyüme adı verilir [164]. Bariyer tipi film büyümesini uygulanan gerilimle kontrol etmek mümkündür. Bariyer tipi filmler için maksimum film kalınlığı oksit filmin kırılma voltajına göre sınırlandırılmıştır. Ancak çok daha kalın gözenekli-tip film, akıma ve uygulama süresine bağlı olarak oluşturulabilmektedir [165].

**Çizelge 4.1. Anodik Alüminyum oksitin iki türü**

	<b>Bariyer Tip</b>	<b>Gözenekli Tip</b>
<b>Yapı</b>	İnce, kompakt, gözeneksiz	İç katman: İnce bariyer tipi Dış Katman: kalın gözenekli tip
<b>Kristal yapısı</b>	Amorf	$\gamma$ - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , $\gamma'$ - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Kalınlık</b>	Gerilime bağlı (~14A°/V) (Yüksek sıcaklık ► Daha ince)	İç katman: Gerilime bağlı Dış katman: akım yoğunluğu, zaman ve sıcaklığa bağlı. 100 µm kolayca elde edilebilir
<b>Elektrolit</b>	Borik Asit Sitrik Asit Amonyum Tartarat	Sülfirik Asit Fosforik Asit Oksalik Asit Sulu Kromik Asit Çözeltileri
<b>Uygulama</b>	Elektrolitik kapasitörler Dielektrikler Yalıtkanlar	Korozyona Direnç Dekoratif Yapılar Boyalar için Taban

#### 4.2.1. Anodizasyon çalışma prensipleri

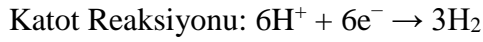
OFET uygulamalar için yüksek kaliteli kapı yalıtkanları hazırlamak amacıyla Galvanostatik Anodizasyon işlemi kullanılabilir [166]. Bu yöntemde kaplanacak metal ve karşıt elektrot hazırlanan elektrolit çözeltisinin içine daldırılır. Daha sonra sisteme kontrollü faraday akımı sağlanarak ince yalıtkan bir oksit tabaka elde edilir.



**Şekil 4.3.** Alüminyum çalışma elektrotu ve platin karşıt elektrotun gösterildiği anodizasyon sisteminin şematik yapısı

Şekil 4.3 anodizasyon sisteminin şematik yapısını göstermektedir. Sistemde platin metali, karşıt elektrot ince alüminyum metali ise çalışma elektrotu olarak görev yapar. Aşağıda gösterildiği gibi galvanostatik işlemin anodizasyon süresi takip edilerek oksit kalınlığı kontrol edilmektedir.

Alüminyum metalinin anodizasyon yöntemi ile oksitlenme işlemi aşağıdaki gibi verilir:



Anot reaksiyonu, elektronların mol sayısının oluşan alüminyum oksit moleküllerinin mol sayısının 6 katı olduğunu göstermektedir:  $N_{e^-} = 6 \cdot N_{\text{Al}_2\text{O}_3}$  oluşan elektron sayısı elektrokimyasal hücreden geçen Faraday akımına ( $I$ ) doğrudan bağlıdır. Faraday akımı birim yüzey alanı ve akım yoğunluğunun çarpımıdır.

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{(N_{e^-}) \cdot F}{t} \quad (4.1)$$

$$I = J \cdot A \quad (4.2)$$

Denklemden  $t$ , zamanı, Faraday sabiti  $F$ , elektron molü başına elektrik yükü büyüklüğünü ifade etmektedir ( $F = e^- \cdot N_A$ ).

Denklem 4.1. ve 4.2.'nin çözümünden alüminyum oksit moleküllerin sayısı bulunabilir:

$$N_{\text{Al}_2\text{O}_3} = \frac{N_{e^-}}{6} = \frac{J \cdot A \cdot T}{6 \cdot F} \quad (4.3)$$

Bir sonraki adım olarak, alüminyum oksit moleküllerinin mol sayısı ve oksit tabakasının kalınlığı ( $d_{Al_2O_3}$ ) arasındaki ilişki elde edilebilir. Burada  $M$  molar kütle,  $\rho$  yoğunluk ve  $V$  malzemenin hacmi olmak üzere;

$$N_{Al_2O_3} = \frac{m_{Al_2O_3}}{M_{Al_2O_3}} = \frac{\rho_{Al_2O_3} \cdot V_{Al_2O_3}}{M_{Al_2O_3}} = \frac{\rho_{Al_2O_3} \cdot A \cdot d_{Al_2O_3}}{M_{Al_2O_3}} \quad (4.4)$$

Denklem 4.3. ve 4.4. birleştirilip çözümlerse oksit tabakanın kalınlığı aşağıdaki denklemde olduğu gibi hesaplanabilir.

$$d_{Al_2O_3} = \frac{J \cdot M_{Al_2O_3}}{6 \cdot F \cdot \rho_{Al_2O_3}} \cdot t \quad (4.5)$$

Akım yoğunluğu  $J = 0,6 \text{ mA.cm}^{-2}$  ve alüminyum oksite ait sayısal değerler kullanılarak alüminyum oksidin anodizasyon işlemi ile oluşan kalınlığı aşağıdaki formülü yolu ile hesaplanabilir:

$$d_{Al_2O_3} [nm] = 0,266 [nm/s] \cdot t [s] \quad (4.6)$$

**Çizelge 4.2.** Alüminyum Oksit yalıtkanına ait bazı sayısal değerler [167]

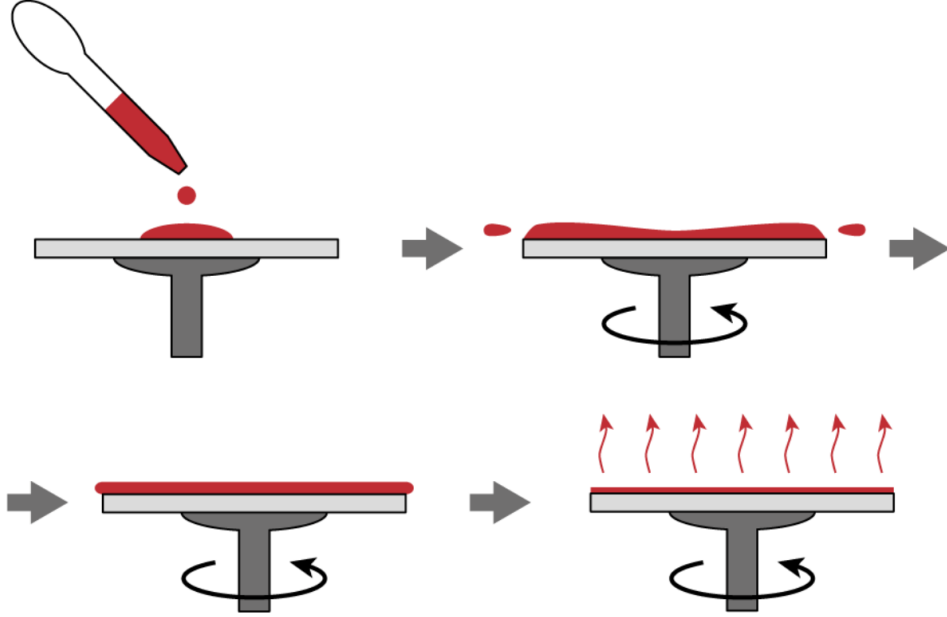
Sabit	Değer	Birim
$J$	0,6	$\text{mA.cm}^{-2}$
$M_{Al_2O_3}$	101,96	$\text{g.mol}^{-1}$
$F$	96485,34	$\text{C.mol}^{-1}$
$\rho_{Al_2O_3}$	3,97	$\text{g.cm}^{-3}$

### 4.3. Spin Kaplama Yöntemi

Spin (döndürerek) kaplama yöntemi polimer veya metal oksit filmlerin kaplanmasında çok etkili bir yöntemdir. Polimerler büyük moleküler ağırlıkları nedeniyle termal buharlaştırma yöntemiyle alttaşlar üzerine büyütülmemektedir. Spin kaplama yönteminde polimer veya metal oksit malzemenin tuzu ilk olarak bir çözücüde çözülür. Daha sonra bir miktar hazırlanan çözelti duran veya yavaş dönen alttaş üzerine damlatılır. Bu esnek veya esnek olmayan alttaş genellikle dakikada birkaç bin (rpm) dönmeye ayarlanmış spin kaplama cihazı sayesinde döndürülür ve çözelti ince film formasyonu ile dışa doğru yayılır. Genellikle bu işlem filmin içindeki çözücünün buharlaştırılarak daha düzgün ve daha ince bir film elde edilmesi amacıyla bir fırında tavlama ile son bulur. Spin kaplama işlemi aşağıdaki formülle modelleştirilebilir [168];

$$d = \left( \frac{\delta}{4\pi\rho\omega^2} \right)^{1/2} \left( \frac{1}{t} \right)^{1/2} \quad (4.7)$$

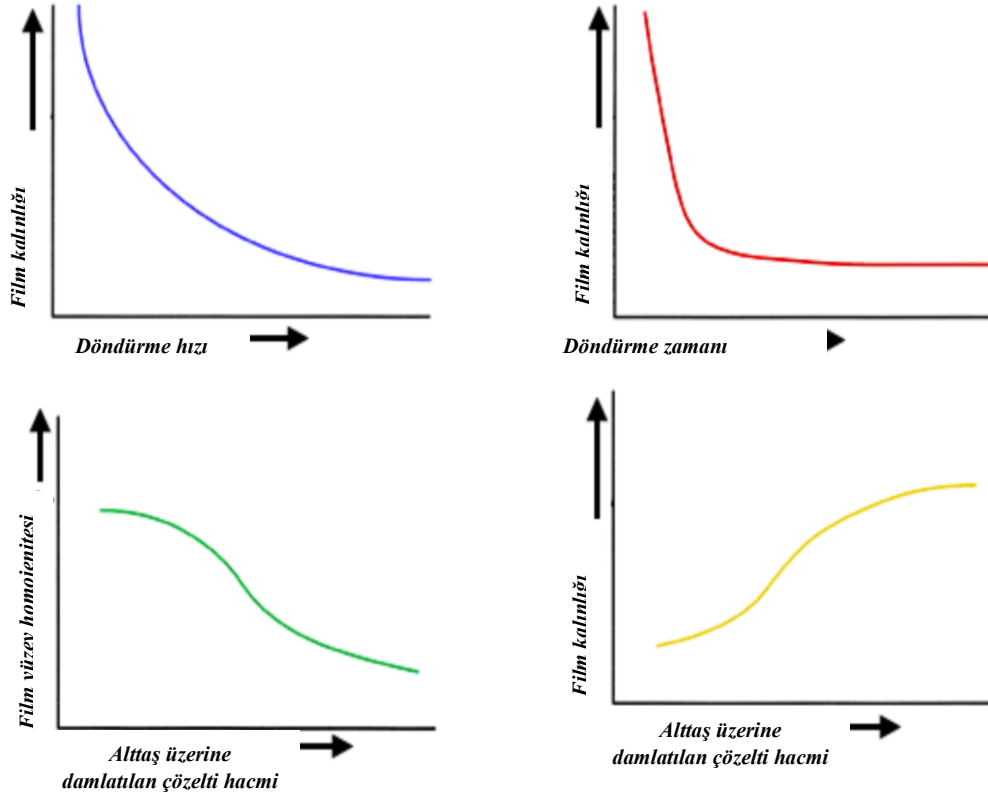
Denklemden  $d$  spin kaplama yöntemi ile oluşturulan filmin kalınlığı,  $\delta$  çözeltinin viskozite sabiti,  $\omega$  dönüş açısal frekansı,  $\rho$  çözeltinin yoğunluğu ve  $t$  ise dönme zamanıdır. Şekil 4.4 spin kaplama metodu aşamalarını göstermektedir.



Şekil 4.4. Spin kaplama metodu ([126])

#### 4.3.1. Spin kaplama yöntemini etkileyen parametreler

Şekil 4.5'te verilen spin kaplama yönteminde çeşitli işlem parametrelerinin genel eğilimlerini temsil etmektedir. Spin kaplama yöntemi ile oluşturulacak filmlerin kalınlığı döndürme hızı ve döndürme zamanı ile ters orantılı olacaktır. Bununla birlikte spin kaplama işlemi esnasında alttaşın üzerine boşaltılan çözeltinin hacmi de film kalınlığını ve filmin yüzey morfolojisini etkileyecektir [169].



**Şekil 4.5.** Spin kaplama yönteminde film kalınlığı ve film yüzey homojenitesinin bazı cihaz ve çözelti parametrelerine bağlı değişimi ([169])

#### 4.3.2. Spin kaplama yönteminin avantajları ve dezavantajları

Spin-kaplama yöntemi sanayinin birçok alanında çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem nispeten basit, düşük maliyetli ve hızlı üretim sistemine sahiptir. Bunun yanında spin kaplama yöntemi ince ve homojen filmlerin oluşturulmasına olanak sağlar. Döndürme işlemi esnasında numune yüksek hava akımına da maruz kalarak hızlı ve düzenli bir şekilde kuruyabilmektedir. Bu avantajların yanında bu sistemin bazı dezavantajları da vardır. Bunların başında malzemenin verimli bir şekilde kullanım problemidir. Bu yöntemde genellikle hazırlanan çözeltinin 5-10% kullanılmaktadır [170]. İşlem esnasında hızlı kuruma süresi bazı özel nanoteknoloji uygulamaları için (örneğin küçük moleküllü OFET'ler) düşük performansa neden olabilir. Çünkü bu uygulamaların kendi kendine yapılanabilmesi veya kristalleşebilmesi için kurumadan önce biraz zamana ihtiyaçları vardır [171]. Bu dezavantajlara rağmen hem akademik hem de endüstriyel alanlarda spin kaplama yöntemi ince ve düzgün bir kaplama gerektiren uygulamalarda kullanılan başlıca yöntemlerden biridir.

## 5. YARIİLETKEN TABANLI DEVRE ELEMANLARI

İçinde bulunduğumuz yüzyıl birçok insan tarafından bilgi çağı olarak adlandırılmaktadır. Bilginin varlığının ve kullanımının yaşam ve refah için vazgeçilmez olduğu bir çağda yaşamaktayız. Bilginin elde edilmesi, işlenmesi ve transfer edilmesi yaşamın ve ekonominin önemli bir parçası haline geldi. Bilgi ise tıpkı bir hücrenin organizmadaki görevi gibi yarıiletken cihazların temel bileşenleri olan ağlar, işlemciler ve devreler ile ilişkilidir. Yarıiletken cihazların gelişmesi ile birlikte bilgisayarlar ve cep telefonları gibi elektronik ürünler günlük yaşamı kolaylaştırmanın yanında büyük bir elektronik endüstrinin oluşmasında da önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin optik fiber ve yarıiletken elemanlara dayalı internet, neredeyse hayatın her alanına nüfuz etmiş ve dünyamızı adeta küresel bir köye dönüştürmüş durumdadır.

### 5.1. İnorganik Yarıiletken Tabanlı Devre Elemanları

1930'larda, ilk olarak J. E. Lilienfeld [173,174] ve O. Heil [175] Alan-Etkili Transistörlerin şemasını önerdi. 1947 yılında ilk germanyum bipolar transistör W. Shockley, J. Bardeen ve W. H. Brattain tarafından Bell Laboratuvarları'nda icat edildi [8,172]. Bu icat elektroniğin gelişmesinde bir dönüm noktası olurken, sanayi ve bilimsel araştırma alanları gibi hayatın neredeyse bütün alanlarına doğrudan veya dolaylı bir şekilde etki etti. Şu anda elektronik sanayi, demir ve çelik endüstrisi gibi eski devleri gölgede bırakarak dünyanın en büyük sektörlerden biri haline geldi [41]. Bipolar transistörün icadından bu yana elektronik teknolojisi hızla ilerledi ve yeni yarıiletken tabanlı devre elemanları geliştirildi. Öte yandan, ilk pratik Metal Oksit-Yarıiletken Alan Etkili Transistor (MOSFET) 1960 D. Kahng [176] tarafından bildirilmiştir. Daha sonraki yıllarda n-tipi MOSFET'ler ve p-tipi MOSFET'ler aynı yonga üzerinde birleştirilerek daha düşük gerilimlerde çalışmaları sağlanarak güç tüketimi azaltıldı. Diğer önemli bir gelişme ise polikristal silisyumun kapı elektrotu olarak kullanılması ile birlikte devre elemanının boyutunun küçülmesi ve kapasitans çakışmasının düşürülmesi sağlandı [177]. Mükemmel performansları sayesinde inorganik yarıiletken (Si , Ge , GaAs , InP , GaN , vb) tabanlı cihazlar elektronik pazarını domine etmiş durumdadır. İnorganik yarıiletken malzemeler, atomik yapılarının kovalent bağla birbirine bağlı olmasından dolayı

genellikle yüksek mobiliteye sahip olmaktadır. Yüksek mobilité, elektrik alan altında hızlı hareket etme anlamına gelmektedir. Bu nedenle bu yapılardan elde edilen devre elemanlarının da performansı yüksek olmaktadır. İnorganik yarıiletkenler litografi teknolojisine uyumlu olmaları sayesinde bir yonga üzerinde çok fazla sayıda devre elemanı oluşturulabilmektedir. Bununla birlikte inorganik yarıiletkenlerin su ve havadaki oksijenle çok fazla reaksiyona girmemesi ve çok az kusurla tek kristal ve polikristal şeklinde büyütülebilmesi sayesinde elektronik devre elemanı uygulamalarında yüksek kararlılığa sahiptirler. İnorganik yarıiletkenler bir çok yönden mükemmel olmasına rağmen bazı dezavantajlı tarafları da vardır. İnorganik yarıiletkenlerin yüksek sıcaklık işlemleri (500° ve üstü) plastik gibi esnek alttaşlar üzerine oluşturulmalarını kısıtlamakta ve geniş alana büyütülememeleri de geniş elektronik ekran gibi elektronik cihazlarının üretilmesini kısıtlamaktadır. Buna karşın organik yarıiletken devre elemanları düşük sıcaklıkta işlenebilmekte ve geniş alana büyütülebilmektedirler.

## 5.2. Organik Yarıiletken Tabanlı Devre Elemanları

Si, Ge ve GaAs gibi inorganik yarıiletkenlerin iletkenlikleri ayarlanabildiği için uzun süredir yarıiletken elektronik dünyasında liderliği ellerinde bulundurmaktadırlar. Buna karşın, organik malzemeler çok yüksek özdirençlerinden dolayı yalıtkan oldukları kabul edilirdi. Ancak, bu yanlış kanı 1973'te tetrathiafulvallene-tetracyanoquinodimethane (TTF-TCNQ) kompleks ve 1977'de iletken polimerlerin keşfi ile değişti. TTF-TCNQ oda sıcaklığında 100 S/cm'den daha büyük iletkenliği ile bu kanıyı değiştiren ilk organik malzeme almıştır. Bu buluş azot, hidrojen, karbon ve sülfür içeren organik malzemelerin metallere karşılaştırılabilir derecede iletkenliğe sahip olabileceklerini gösterdi. Organik elektronikte diğer bir kilometre taşı ise, poliasetilenin katkılanarak iletkenliğinin artırılması keşfi oldu [178]. Bununla birlikte tek ve çift bağ ile değişen ve iletken polimerlerin mekanizması olan bir molekül omurgasının varlığı keşfedildi. Bu buluş sayesinde organik malzemelerin bant aralıkları azaltılarak, katkılanmadan yarıiletken veya iletken organik malzemeler elde edilebilmektedir.

1970'den beri organik tabanlı birçok elektronik devre elemanı üretilmiştir. Bunlar başlıcaları; organik tabanlı ince film transistörler, güneş pilleri ve ışık yayan diyotlardır [179,180]. Organik elektronik malzemelerin süblimleşme sıcaklıkları genellikle düşük

olduğu için üretim aşaması da düşük sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. Birçok durumda organik elektronik malzemeler spin kaplama [181] veya mürekkep baskı (Ink-jet) yöntemleri ile büyütülebilmektedir [182]. Bir anlamda inorganik elektronik endüstrisinde oda sıcaklığında üretiminin hayal olduğu elektronik cihazlar organik malzemelerle oda sıcaklığında üretilebilmektedir. Organik malzemeler bu özellikleri sayesinde esnek alttaşlar üzerine büyütülebilmekte, geniş alan uygulamalarında ve güneş pillerinde kullanılabilir. Bununla birlikte organik malzemeler çok hafif olduğundan taşınabilir ve giyilebilir elektronik endüstrisinde yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Organiklerin fabrikasyon aşamalarının kolay olması üretim maliyetlerini de aşağıya doğru çekmektedir. Ne var ki tüm bu avantajlarının yanında bazı dezavantajları da vardır. Bu dezavantajlarının en başında kararlılık gelmektedir. Birçok organik malzeme oksijen ve su ile reaksiyona girme eğiliminde olup ışık altında bu reaksiyon hızı daha da hızlanabilmektedir [183]. Örneğin organik bir malzeme olan plastik yıllar geçtikçe hem renk hem de yapısal olarak bozulmaya uğramaktadır. Bu dezavantajlı durum ambalajlama teknolojisi ile çözülebilmekte fakat beraberinde ek cihazlar ve maliyet getirmektedir. Organiklerin üretim aşaması genellikle vakum cihazlarıyla ve inert ortamda gerçekleştirilmektedir. Kararlılık probleminin diğer bir nedeni ise, organik yarıiletken malzemelerde bulunan çok fazla sayıda kusurlardır. İnorganik malzemelerde atomlar kovalent bağlarla birbirine bağlı iken organik malzemelerde ise moleküller kovalent bağlardan çok daha zayıf olan Van Der Waals's kuvvetleri ile birbirlerine bağlıdır. Bu nedenle organik malzemelerde yüksek kristal yapı silisyum veya germanyum gibi inorganik yarıiletkenler kadar kolay olamamaktadır. Organik malzemelerde çok fazla kusur, yapıda tuzaklara sebep olmakta bu da organik tabanlı cihazda kararsızlığa neden olmaktadır [6]. Organik yarıiletkenlerin taşıyıcı mobiliteleri inorganik yarıiletkenlere oranla daha düşüktür. Bu nedenle işlemciler gibi yüksek hız isteyen uygulamalarda inorganik yarıiletkenlerle yarışması şimdilik gerçekçi görünmemektedir. Hem organik malzemelerin hem de inorganik malzemelerin avantajlı ve dezavantajlı özellikleri vardır. Bu nedenle aralarında bir yarıştan ziyade elektronik dünyasında birbirini tamamlayan yapılar olup farklı alanlarda kullanılmaya uygundur. Örneğin işlemci uygulamalarında işlemcinin küçük boyutta olması, yüksek taşıyıcı hızına sahip olması ve yüksek kararlılıkta olması aranan özelliklerdir. Bu nedenle bu tür uygulamalarda inorganik malzemeler uygunken, düşük hız, geniş alan, düşük maliyet, hafif ve esnek elektronik cihazlar gibi uygulamalarda ise organik malzemeler daha uygundur. Organik malzemeler,

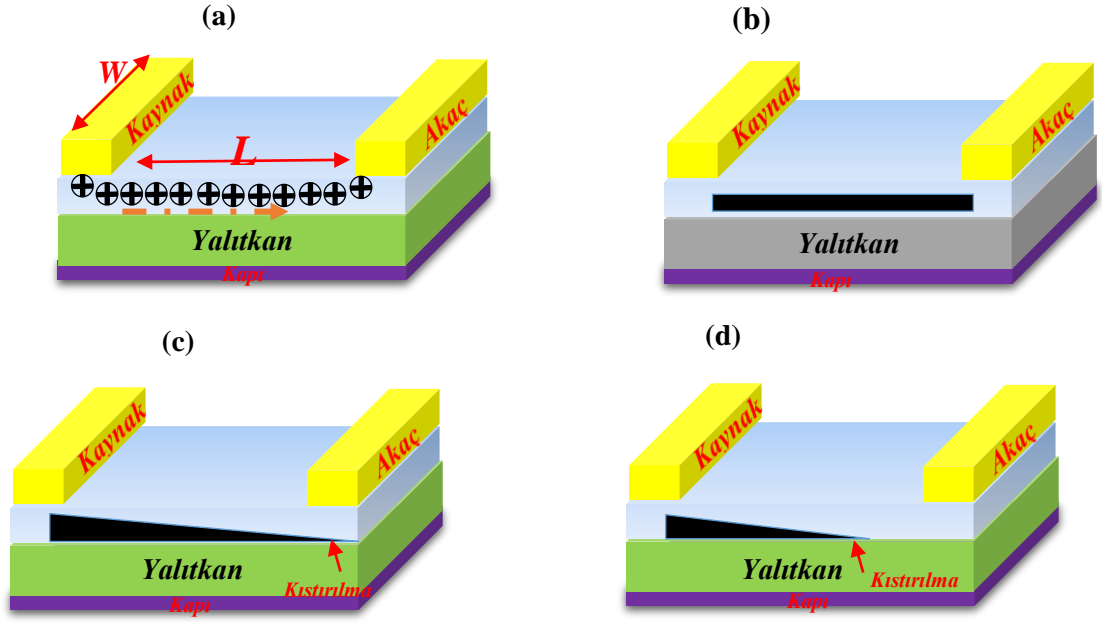
inorganik benzerlerine oranla daha düşük mobiliteye sahip olmalarına rağmen geniş alana ve esnek yapılar üzerine büyütülebilmeleri onları ekran uygulamalarında ön plana çıkarmaktadır.

### **5.3. Organik Alan Etkili Transistörler (OFET) ve Karakteristikleri**

1986 yılında A. Tsumura, H. Koezuka, ve T. Ando organik yarıiletken tabanlı ilk OFET'i ürettiler [184]. Transistör polythiophene aktif tabaka ve SiO<sub>2</sub> kapı yalıtkanı kullanılarak hazırlandı. Transistörün alan etkili mobilitesi  $10^{-5} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  ve açma/kapama oranı  $10^2 \sim 10^3$  olarak hesaplandı. İlk OFET'in performansı çok yüksek olmamasına rağmen, elektronik dünyasında çok ses getirdi. Bu ilk organik transistörden sonra OFET teknolojisi sürekli bir gelişim göstererek cihaz performansında büyük bir aşama kaydedildi. Transistörler tüm modern elektronik devrelerde kullanılmakta olup akım düzenleyici ve anahtarlama elemanı olarak görev yaparlar. Alan etkili transistörlerde üç temel bileşen olup bunlar; kontak elektrotlar (kapı, kaynak ve akaç), aktif tabaka yarıiletken ve yalıtkan tabakadır. Alan J. Heeger, Alan G. MacDiarmid ve Hideki Shirakawa 2000 yılında iletken polimer keşifleri sayesinde Nobel Kimya ödülü aldılar.

#### **5.3.1. OFET'lerin çalışma prensipleri**

OFET'lerin çalışma prensipleri, taşıyıcı yoğunluğunun ayarlanması üzerine tasarlanan metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılara dayanmaktadır. İnorganik tabanlı transistörler birkaç farklı modda çalışmasına karşın, OFET'ler genellikle toplanma (accumulation) modunda çalışırlar [185]. Bu kısımda p-tipi aktif tabakalı OFET'lerin toplanma modunda çalışması üzerine durulacaktır.



Şekil. 5.1. OFET'lerin çalışma prensipleri

Şekil 5.1 (a)'da görüldüğü gibi p-tipi kanal yapısına sahip OFET'te akaç ve kapı elektrotuna negatif gerilim uygulanır ve kaynak topraklanır. Akaç kontağına negatif gerilim uygulanması ile beraber kaynak elektrotundan aktif tabakaya hollerin enjeksiyonu gerçekleşir. Daha sonra yarıiletken/yalıtkan ara yüzeyinde negatif kapı gerilimin uygulanması ile yalıtkan boyunca bu taşıyıcılar toplanır. Yarıiletken/yalıtkan ara yüzeyinde toplanan holler kaynak ve akaç arasında bir iletim kanalı oluşturur. Daha sonra kaynak ve akaç arasında oluşan elektrik alan sayesinde bu taşıyıcılar akaca doğru sürüklenirler. Toplanma bölgesinde oluşan taşıyıcı yoğunluğu uygulanan kapı gerilimi ( $V_{gs}$ ) ve yalıtkanın birim alan başına düşen kapasitansı ( $C_i$ ) ile orantılıdır. Unutulmaması gereken önemli bir nokta, toplanma tabakasındaki bütün yüklerin hareketli olmadığı ve bu taşıyıcılardan bir kısmının transistörde akıma katkı sağladığıdır. Yarıiletken/yalıtkan ara yüzeyine yakın bölgede bulunan kirlilikler ve kusurlardan dolayı bu taşıyıcıların da bir kısmı tuzaklanacaktır. Kanal boyunca akım oluşmadan önce derin tuzakların doldurulması gerekmektedir. Sonuçta, belirli bir negatif  $V_{gs}$  voltajı uygulanıp yarıiletken/yalıtkan ara yüzeyinde kanalın oluşturulması gerekir ki, bu gerilime Eşik Voltajı ( $V_{th}$ ) denilmektedir. Sabit bir  $V_{gs}$  ( $|V_{gs}| > |V_{th}|$ ) gerilimi altında, kaynak-akaç ( $I_{ds}$ ) akımı  $V_{ds}$  tarafından kontrol edilmektedir. Şekil 5.1 (b)'de gösterildiği gibi toplanma bölgesindeki yüklerin lineer yoğunluk gradyenti kaynak ve akaç arasında oluşmaktadır.

Bir OFET’te, akım-gerilim ilişkisi kademeli kanal yaklaşımına dayanılarak ortaya çıkarılabilir. Kademeli kanal yaklaşımı, kapı yalıtkanı boyunca dikey elektrik alanının kaynak ve akaç arasındaki enine elektrik alanından daha kuvvetli olduğu varsayımına dayanır [186]. Bu varsayımına göre  $I_{ds}$  akımı, iki farklı tek boyutlu denklem kullanılarak hesaplanabilmektedir. İlk olarak kanal içinde  $x$  konumundaki serbest taşıyıcı yoğunluğu aşağıdaki denklem kullanılarak kapı gerilimi ile ilişkilendirilebilir.

$$n(x) = C_i |V_{gs} - V(x) - V_{th}| \quad (5.1)$$

Denklemden  $n(x)$ ; serbest taşıyıcı yoğunluğu,  $C_i$ ; kapı yalıtkanının birim alan başına düşen kapasitansı,  $V_{gs}$ ; kapı gerilimi,  $V(x)$   $x$  konumunda yarıiletkenin gerilimi ve  $V_{th}$  ise eşik voltajıdır. İkinci olarak, akım kaynak ve akaç arasındaki mevcut tek boyutlu denklem kullanılarak hesaplanabilir.

$$I_{ds} = -Wn(x)\mu \frac{\partial V}{\partial x} = -W\mu C_i |V_{gs} - V(x) - V_{th}| \frac{\partial V}{\partial x} \quad (5.2)$$

Denklemden  $W$  kanal genişliği,  $\mu$  alan etkili mobilite ve  $\partial V/\partial x$  ise yanal elektrik alanıdır. Eğer  $x=0$ , kaynak kontağı olarak tanımlanırsa,  $x=L$ , akaç kontağına karşılık gelir (kanal uzunluğu  $L$ ). Bu yüzden  $V(0)=V_s=0$  ve  $V(L)=V_{ds}=V_d$  şeklinde yazılabilir. Burada  $V_s$  ve  $V_d$  sırasıyla kaynak ve akaç gerilimleridir.  $\mu$ , yarıiletken için sabit olarak farz edilirse, denklem 5.2’de  $x=0$ ’dan  $x=L$  ye kadar integral alınır aşağıdaki akım-voltaj eşitliği elde edilir.

$$I_{ds} = \frac{W}{L} \mu C_i \left[ (V_{gs} - V_{th})V_{ds} - \frac{1}{2}V_{ds}^2 \right] \quad (5.3)$$

$|V_{ds}| \ll |V_{gs} - V_{th}|$  olduğundan dolayı,  $V_{ds}$ ’nin kareli terimi ihmal edilebilir. Böylece akım-voltaj denklemi aşağıdaki gibi basitleştirilebilir:

$$I_{ds} = \frac{W}{L} \mu C_i (V_{gs} - V_{th})V_{ds} \quad (5.4)$$

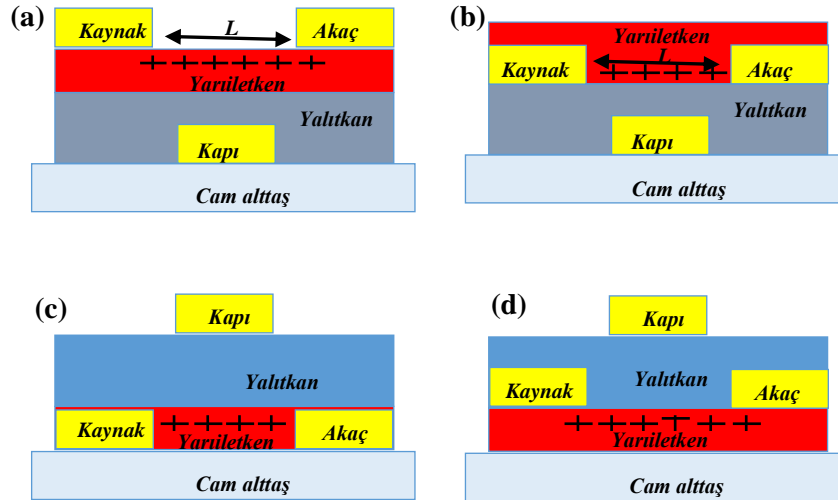
Denklemden de görüldüğü gibi  $I_{ds}$  akımı  $V_{ds}$ ’ye lineer bir şekilde bağlıdır. Bu nedenle OFET’in bu çalışma bölgesi Lineer Bölge olarak adlandırılır. Negatif  $V_{ds}$  gerilimi daha da arttırıldığında, yalıtkan ve yarıiletken üzerindeki gerilim düşüşü kanalda konuma bağlı bir fonksiyon olur. Kaynak kontakta voltaj düşüşü olmayacağından, birikmiş yük yoğunluğu da aynı kalır. Buna karşın akaç kontakta gerilim düşüşü azalmakta ve daha az taşıyıcı yoğunluğu ile sonuçlanmaktadır. Bu durumda birikmiş yük yoğunluğu kanal boyunca kaynak kontakta akaç kontakta doğru devamlı bir şekilde azalma gösterecektir.

$|V_{ds}| = |V_{gs} - V_{th}|$  olduğunda taşıyıcı yoğunluğu akaç kontakta azalarak sıfır olur. Bu durum Şekil 5.1 (c)'de gösterildiği gibi Kısıtılma (pinch off) olarak adlandırılır. Bu noktadan sonra Şekil 5.1 (d)'de gösterildiği gibi daha büyük negatif  $V_{ds}$  gerilimi ( $|V_{ds}| > |V_{gs} - V_{th}|$ ) akımın artışı ile sonuçlanmayacak ve transistör doyum (saturation) bölgesinde çalışmaya devam edecek. Bu durumda akım aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir:

$$I_{ds} = \frac{W}{2L} \mu C_i (V_{gs} - V_{th})^2 \quad (5.5)$$

### 5.3.2. OFET'lerin mimarisi

Cam alttaşlar üzerine üretilen OFET'ler Şekil 5.2'de görüldüğü gibi dört farklı biçimde üretilmektedir. Bu kısımda bu yapıların avantajları ve dezavantajları vurgulanacaktır.



**Şekil 5.2.** OFET'lerin üretim mimarileri (a) alt katman kapı/üst yüzey kontak (b) alt katman kapı/alt yüzey kontak (c) üst yüzey kapı /alt yüzey kontak (d) üst yüzey kapı/üst yüzey kontak

#### 5.3.2.1. Alt katman kapı/üst yüzey kontak

Transistörlerde genellikle Şekil 5.2 (a)'da gösterilen Alt Katman Kapı/Üst Yüzey Kontak mimarisinde üretilmektedirler [187,188]. Kapı yalıtkanının aktif yarıiletken tabakadan önce büyütülmesi farklı büyütme teknikleri ile aktif tabakanın yalıtkan tabaka üzerine oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Bu mimarinin diğer bir avantajı kaynak-akaç kontakların geniş efektif alanından dolayı taşıyıcı yüklerin yarıiletken kanalına

enjeksiyonuna olanak sağlaması sayesinde oluşan düşük kontak direncidir [189]. Yarıiletken kapı yalıtkan ara yüzüne doğru taşıyıcıların iletimi esnasında karşılaşılan ek direnci Erişim Direnci (access resistance) olarak adlandırılır [6]. Bu erişim direnci organik tabakanın ince olması sayesinde OFET’lerde genellikle küçüktür. Bu mimari yapının dezavantajı ise, çözücüler organik tabakaya zarar vereceğinden dolayı fotolitografi tekniği ile kaynak ve akaç kontaklarının oluşturulmasına imkân vermemesidir [190].

### **5.3.2.2. Alt katman kapı/alt yüzey kontak**

Şekil 5.2 (b)’de gösterilen alt katman kapı/alt katman kontak yapısı genel olarak OFET’lerde kullanılmaktadır [191,192]. Yarıiletken tabakanın en son büyütülmesi sayesinde bu yapılandırma en pratik olanıdır. Aktif tabakanın büyütülmesinden sonra herhangi bir işleme gerek duyulmadığından birçok organik ve inorganik yarıiletken bu mimaride kullanılabilir. Yalıtkan tabaka yarıiletken tabakadan önce hazırlandığından kimyasal buharlaştırma, radyo frekans magnetron yöntemi gibi birçok metot ile yarıiletken aktif tabaka oluşturulabilir. Bu mimaride fotolitografi ile kontak oluşturulması da mümkündür. Bu yapının dezavantajı, küçük efektif alandan dolayı oluşacak kontak direncinin çok büyük olabilmesidir.

### **5.3.2.3. Üst yüzey kapı/alt yüzey kontak**

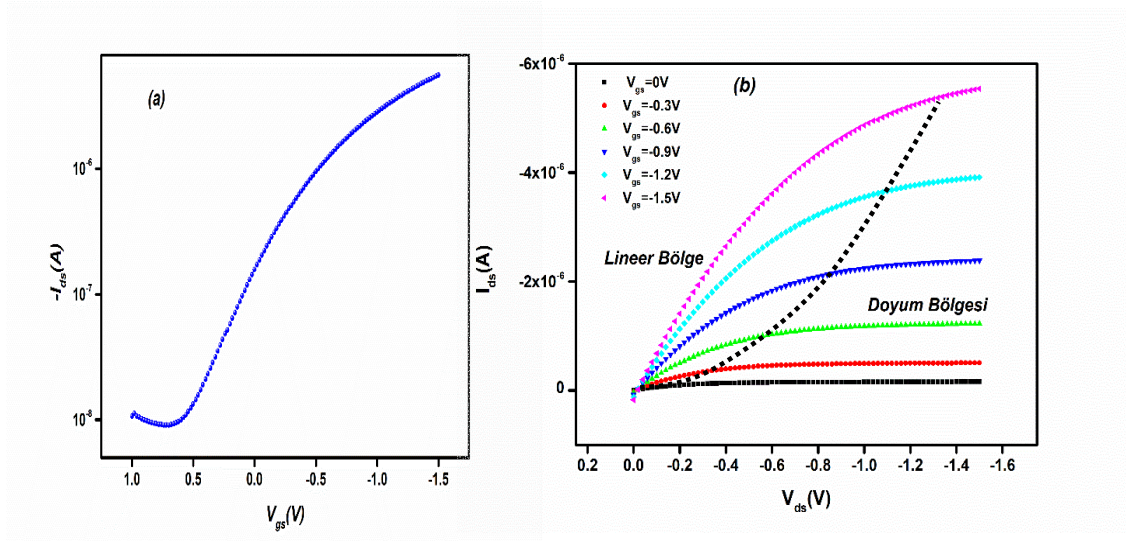
Şekil 5.2 (c)’de verilen bu yapının bir avantajı, uygun bir yalıtkan tabaka kullanıldığında, kapı yalıtkanı ve kapı kontağının organik aktif tabakayı nemden ve oksijenden kaynaklı oluşabilecek muhtemel bozulmalara karşı koruyan bir yapıya dönüşebilmesidir. Bu yapının diğer bir avantajı, kaynak-akaç kontaklarının büyük efektif alanı sayesinde taşıyıcıların daha fazla kanala enjeksiyonu ile kontak direncinin düşük olmasıdır. Bununla birlikte organik yarıiletken tabakanın ince olması nedeniyle erişim direncinin de düşük olması beklenir. Bu yapının dezavantajı ise kapı yalıtkanının sputter gibi büyütme yöntemleri ile uyumlu olmayacağıdır. Çünkü geleneksel ince film işleme teknikleri Van der Waals bağlı bileşiklerin yüzeylerine geri dönüşümsüz hasarlar verebilmektedir [193].

#### 5.3.2.4. Üst yüzey kapı/üst yüzey kontak

Şekil 5.2 (d)'de gösterilen üst yüzey kapı/üst yüzey kontak mimarisi OFET'lerde nadiren kullanılmaktadır. Bu mimari temel olarak alitaş üzerine büyütülen veya alitaşlar üzerinde hazır bulunan yarıiletken malzemelerin transistör karakterizasyonunu doğrulama amaçlı ham araştırma deneylerinde kullanılmaktadır [194]. Bu konfigürasyonda efektif alanın düşük olması ve kanala taşıyıcı enjeksiyonun az olması nedeniyle kontak direnci çok yüksek olacaktır. Bu yapılandırmada enerjik iyonların, depolanma esnasında organik yarıiletken malzemeye zarar vereceğinden dolayı organik yarıiletken tabakanın diğer işlem adımlarından önce oluşturulması gerekir. Aynı zamanda kaynak ve akaç elektrotları fotolitografi ile bu mimaride oluşturulması mümkün değildir. Bu mimarinin bir avantajı uygun yalıtkan tabakanın seçimi durumunda kapı yalıtkanı ve kapı elektrotunun organik yarıiletken aktif tabakanın nem ve oksijenden dolayı oluşacak bozulmaya karşı koruyan bir yapı gibi davranmasıdır.

#### 5.4. OFET'lerin Akım Voltaj Karakteristikleri

Bir OFET'in performansını belirleyen bazı elektriksel parametreler vardır. Bunlar alan etkili mobilite ( $\mu$ ), eşik voltajı ( $V_{th}$ ), açma/kapama akım oranı ve alt eşik salınım değeridir ( $SS$ ). Akaç akımı ( $I_{ds}$ ) iki bağımsız gerilim kaynağı olan akaç voltajı ( $V_{ds}$ ) ve kapı voltajı ( $V_{gs}$ ) ile kontrol edilmektedir. Bu nedenle transistörün I-V karakteristiği iki yolla gösterilebilir. Birincisi  $V_{ds}$  nin sabit olduğu ve  $I_{ds}$  nin  $V_{gs}$  ile değiştiği eğri olup transistörün "transfer karakteristiği" olarak adlandırılmaktadır. İkincisi ise  $V_{gs}$  nin farklı ve sabit değerleri için  $I_{ds}$ - $V_{ds}$  eğrisidir. Bu eğride transistörün "çıkış karakteristiği" olarak adlandırılmaktadır. Şekil 5.3, pentasen aktif tabakalı OFET'in transfer ve çıkış karakteristiğini göstermektedir. Şekil 5.3 (b)'de çıkış karakteristiğinden lineer ve doyum bölgesi açıkça görülmektedir.



Şekil 5.3. OFET'in transfer (a) karakteristiği (b) çıkış karakteristiği

#### 5.4.1. Eşik voltajı ve alan etkili mobilite

Kısım 5.3.1'de anlatıldığı gibi OFET'lerde iki çalışma bölgesi vardır. Bunlardan birincisi düşük  $V_{ds}$  gerilimlerinde lineer bölge ve yüksek  $V_{ds}$  gerilimlerinde doyum bölgesidir. Lineer bölgede Akım-Voltaj ( $I$ - $V$ ) ilişkisi aşağıdaki denklemde verilmektedir:

$$I_{ds} = \frac{W}{L} \mu C_i (V_{gs} - V_{th}) V_{ds} \quad (5.6)$$

Yukarıdaki denklem analiz edildiğinde açıkça görülmektedir ki, alan etkili mobilite sabit bir  $V_{ds}$  gerilimi altında geçiş iletkenlikten ( $I_{ds}$ 'nin  $V_{gs}$  ile olan değişimi ile tanımlanır) elde edilebilir. Geçiş iletkenlik ve lineer bölgedeki mobilite arasındaki ilişki aşağıdaki denklemde verilmektedir:

$$g_m = \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{gs}} (V_{ds} = \text{sabit}) = -\frac{\mu W C_i}{L} V_{ds} \quad (5.7)$$

Böylece, lineer bölgedeki mobilite değeri, Denklem (5.7) kullanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\mu = -g_m \frac{L}{W} \frac{1}{C_i} \frac{1}{V_{ds}} (V_{ds} = \text{sabit}) \quad (5.8)$$

Lineer bölgedeki eşik voltajı Şekil 5.4 (a)'da verilen transfer karakteristiğindeki lineer eğiminin alınması ile elde edilir.

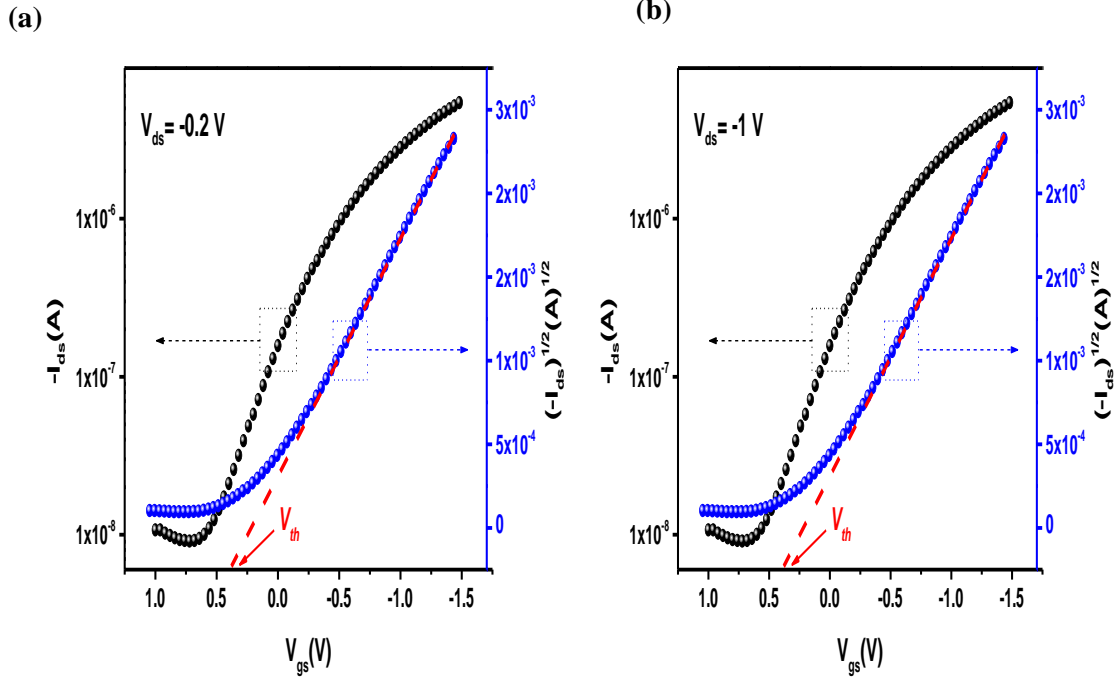
Diğer yandan doyum bölgesindeki I-V ilişkisi aşağıdaki gibi verilir:

$$I_{ds} = \frac{W}{2L} \mu C_i (V_{gs} - V_{th})^2 \quad (5.9)$$

Yukarıdaki denklemden de görüldüğü gibi, akaç akımının ( $|I_{ds}|$ ) karekök değeri  $V_{gs}$  gerilimine lineer olarak bağlıdır. Bu nedenle  $|I_{ds}|^{1/2}$ - $V_{gs}$  grafiğinin eğiminden mobilite değeri elde edilebilir.

$$\mu = \frac{2L}{W} \frac{1}{C_i} \left[ \frac{\partial \sqrt{I_{ds}}}{\partial V_{gs}} \right]^2 \quad (5.10)$$

Doyum bölgesinde yine OFET'in  $|I_{ds}|^{1/2}$ - $V_{gs}$  transfer grafiğinin eğiminden doyum mobilite değeri elde edilebilir. Şekil 5.4 (a) ve Şekil 5.4 (b) sırasıyla OFET'in lineer bölgedeki ve doyum bölgesindeki transfer karakteristiğini göstermektedir. Şekil 5.4 (a)'da görüldüğü gibi transfer karakteristiğinde lineer doğrunun  $V_{gs}$  eksenini kestiği noktadan Denklem (5.9) yardımı eşik gerilim değeri bulunur. OFET'lerin pratik uygulamaları için eşik voltajın sıfır volta yakın olması istenilen bir durumdur. Eşik Voltajı yerleşik dipoller, kirlilikler, arayüzey durumları, yarıiletken ve yalıtkan arasındaki taşıyıcı tuzaklarından oldukça etkilenir [195]. Eşik Voltajı yüksek kapasitans değerlerine sahip yalıtkanlar kullanılarak düşürülebilir. Yüksek kapasitansa sahip yalıtkan tabakalar yarıiletken kanalda daha fazla yük indükleyerek daha düşük voltajlarda kanalın oluşmasını sağlayabilir.



Şekil 5.4. OFET'in (a) lineer ve (b) doyum bölgesi transfer karakteristiği gösterimi

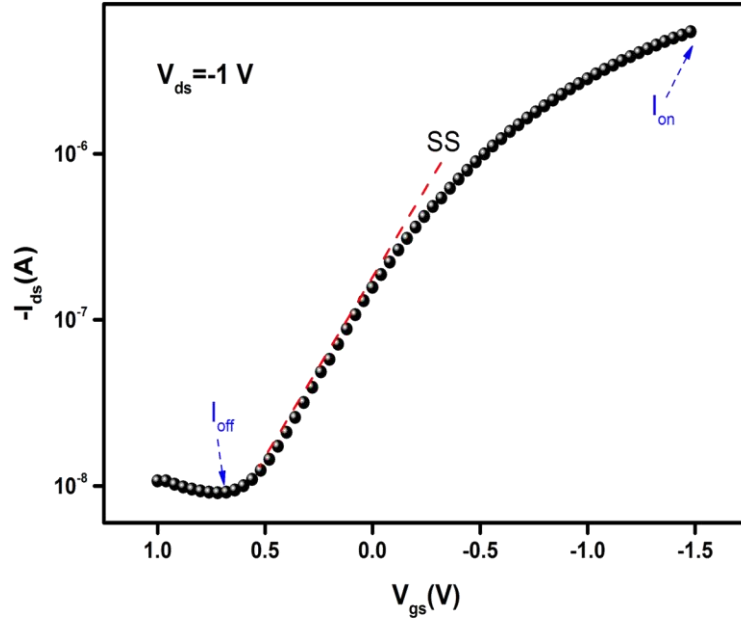
#### 5.4.2. Açma/kapama oranı ve alt eşik salınım değeri

Açma/kapama akım oranı OFET'lerin karakterizasyon için önemli bir parametredir. Açma/kapama oranı açık durumdaki kanal akımının kapalı durumdaki kanal akımına oranı olarak belirlenir. OFET'in pratik uygulamalarda iyi bir anahtarlama özelliği gösterebilmesi için açma/kapama oranının yüksek olması istenen bir durumdur. OFET'ler için açma/kapama oranları genel olarak  $\sim 10^3$  ve  $\sim 10^8$  arasında değişmektedir.

Anahtarlama oranı olan açma/kapama oranı aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$Açma/kapama_{oranı} = \frac{I_{açma}}{I_{kapama}} \quad (5.11)$$

Açma/kapama akım oranı, kaynak-akaç kontak direnci ihmal edilirse, transistörün mobilitesine, dielektrik tabakanın kapasitansına, sızıntı akımına ve organik yarıiletken malzemenin iletkenliğine bağlı olarak değişmektedir [196]. Şekil 5.5'te OFET'in transfer karakteristiğinden en düşük akım değeri ( $I_{off}=I_{kapama}$ ) kapalı akım ve en yüksek akım değeri ( $I_{on}=I_{açma}$ ) açık akım olarak gösterilmektedir.



**Şekil 5.5.** OFET'in açma/kapama oranı ve alt eşik salınım değerinin (SS) grafikte gösterimi

Alt Eşik Salınım Değeri (SS) transistörün anahtarlama durumu olan off konumundan on konumuna geçiş hızını karakterize eder. SS değeri  $\log(|I_{ds}|)-V_{gs}$  grafiğinin eğiminden elde edilebilir.

SS aşağıdaki gibi verilir:

$$SS = \frac{\partial V_{gs}}{\partial (\log |I_{ds}|)} \quad (5.12)$$

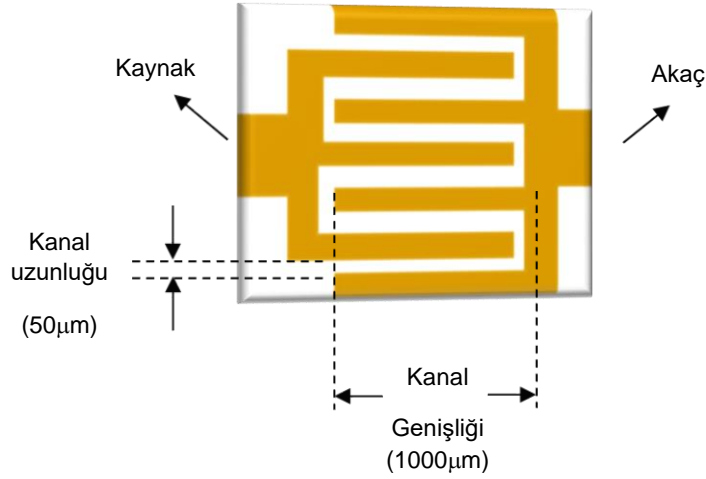
SS değeri yaklaşık 60 mV/dec civarındadır [7]. OFET'lerin daha iyi anahtarlama özelliğine sahip olabilmeleri için bu değerinin düşük olması gerekmektedir.

## 6. OFET'LERİN ÜRETİMİ

Bu tez çalışmasında, pentasen esaslı OFET'lerin üretimi için tek tabaka polimer yapılar ve ikili inorganik/organik kapı yalıtkan filmleri oluşturulmuştur. Tek tabaka kapı yalıtkanı olarak sol jel spin kaplama yöntemi ile PS, PMMA, P4MS, PVP, PVA, PVP\_ko\_PMMA polimerleri oluşturuldu. İkili tabaka kapı yalıtkanları olarak ise, anodizasyon yöntemi ile oluşturulan inorganik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> üzerine çok ince (~4-6 nm) PS, PMMA, P4MS, PVP, PVP\_ko\_PMMA polimerleri sol jel spin kaplama yöntemi ile kaplanmıştır. Diğer ikili inorganik/organik kapı yalıtkanları ise sol jel spin kaplama yöntemi ile oluşturulan TiO<sub>2</sub> üzerine yüksek döndürme hızlarında yine sol jel spin kaplama yöntemi ile çok ince PS, PMMA, PVP, PVP\_ko\_PMMA polimerlerinin kaplanması ile gerçekleştirilmiştir. OFET'lerin üretimi için aktif tabaka olarak Sigma-Aldrich firmasından satın alınan %99 saflıkta ve 278,35g/mol moleküler ağırlığına sahip p-tipi pentasen organik yarıiletkeni kullanılmıştır. Şekil 6.2 (a)'da gösterilen VAKSIS PVD Handy-MT/101T termal buharlaştırma cihazı kullanılarak  $\sim 10^{-5}$  Torr basınç altında ve yaklaşık 5-10 Å/s kaplama hızı ile 50nm kalınlığına sahip pentasen filmler üretilen yalıtkan tabakalar üzerine kaplanmıştır. Son aşamada kaynak ve akaç üst kontakları için, 100 nm kalınlığında altın, 50 µm kanal uzunluğuna ve 1000 µm kanal genişliğine sahip shadow maske yardımıyla aktif tabaka üzerine oluşturuldu. %99,99 saflıktaki altın,  $\sim 10^{-5}$  Torr basınç altında tungsten pota içinde yine VAKSIS PVD Handy-MT/101T termal buharlaştırma cihazı kullanılarak buharlaştırıldı.

### 6.1. Tek Tabaka Polimer Yalıtkanı ile Hazırlanan OFET'ler

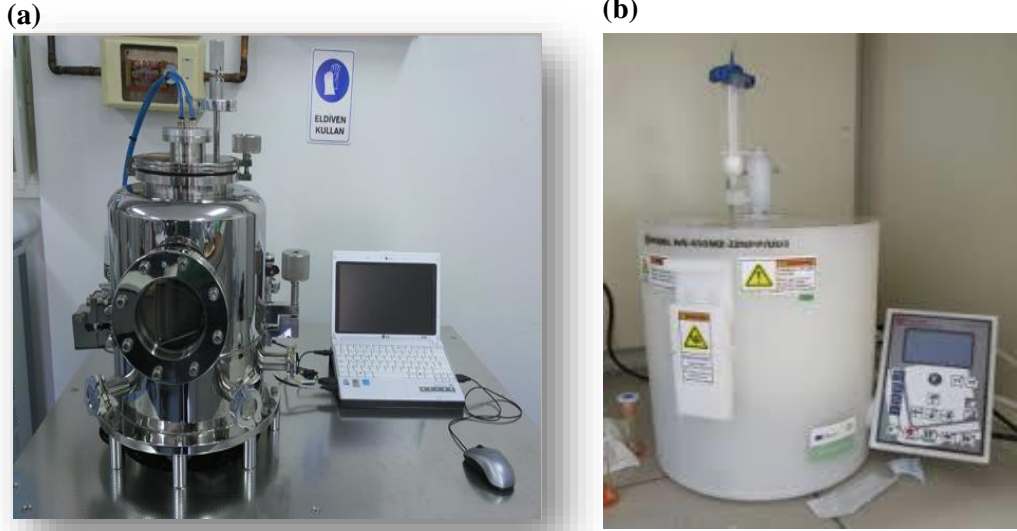
Termal buharlaştırma yöntemiyle yalıtkan tabakalar üzerine büyütülen Pentasen filmleri kullanılarak OFET fabrikasyonu gerçekleştirilmiştir. Pentasen-OFET fabrikasyonu için gerekli olan kaynak-akaç omik kontakları “shadow maske”ler kullanılarak yapılmıştır. Kaynak ve akaç kontakları Altın metali buharlaştırılarak oluşturulmuştur. Şekil 6.1'de pentasen-OFET'in kaynak-akaç kontaklarının şematik yapısı gösterilmektedir.



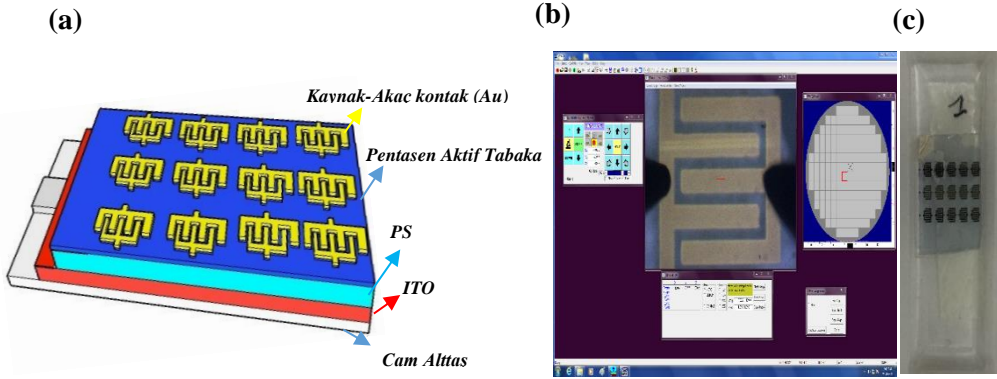
**Şekil 6.1.** *Pentasen-OFET'in kaynak-akaç kontağının şematik yapısı*

### 6.1.1. ITO/PS/Pentasen OFET'inin hazırlanması

Alt kapı/üst yüzey kontak mimarisinde üretilen OFET için PS polimeri kapı yalıtkanı olarak ve indiyum-kalay oksit (ITO) iletken yüzeyli cam ise alttaş olarak kullanılmıştır. 5-15  $\Omega$ /sq yüzey direncine sahip ITO alttaş ultrasonik banyoda sırasıyla aseton, etanol ve deiyonize suda 10'ar dakika temizlendi. Kapı yalıtkanı PS polimerinin toluende %10 (100 mg/ml) çözeltisi hazırlanarak Şekil 6.2 (b)'de gösterilen programlanabilir Laurell marka ince film kaplama sistemi kullanılarak spin kaplama yöntemiyle 1000 devir/dakika dönme hızıyla 60 saniye süre ile ITO alttaş üzerine kaplandı. Kaplanan PS polimeri 100°C sıcaklık altında vakumlu fırında bir gece boyunca bekletilerek PS yalıtkan tabakası elde edildi. Yalıtkan tabakalar üretildikten sonra, OFET'in hazırlanması için gerekli aktif tabaka ve üst kaynak-akaç kontaklarının üretim süreci detaylı olarak Kısım 6'da anlatılmıştır. Bu aşamalardan sonra hazırlanan ITO/PS/Pentasen OFET'inin Şekil 6.3'te şematik yapısı, prob istasyonu kontak görüntüsü ve gerçek görüntüsü gösterilmektedir.



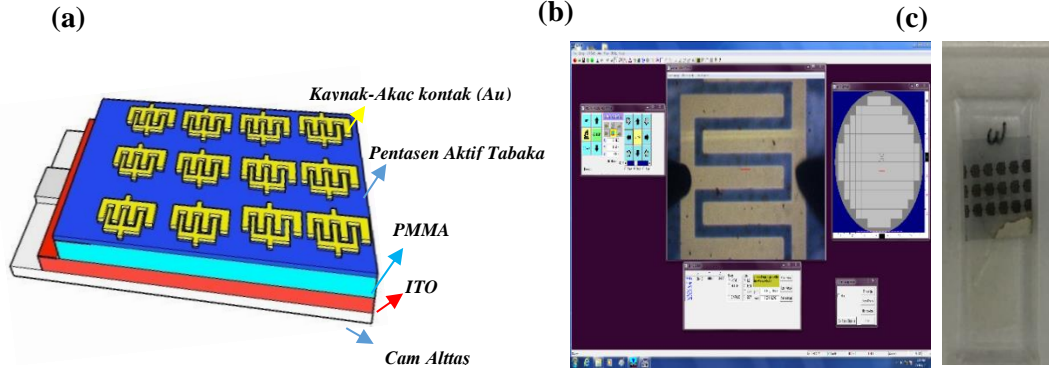
Şekil. 6.2. (a) VAKSIS PVD Handy-MT/101T termal buharlaştırma sistemi (b) spin kaplama sistemi



Şekil. 6.3. ITO/PS/Pentaseen OFET'inin (a) şematik yapısı, (b) prob istasyonu kontak görüntüsü, (c) gerçek görüntüsü

### 6.1.2. ITO/PMMA/Pentaseen OFET'inin hazırlanması

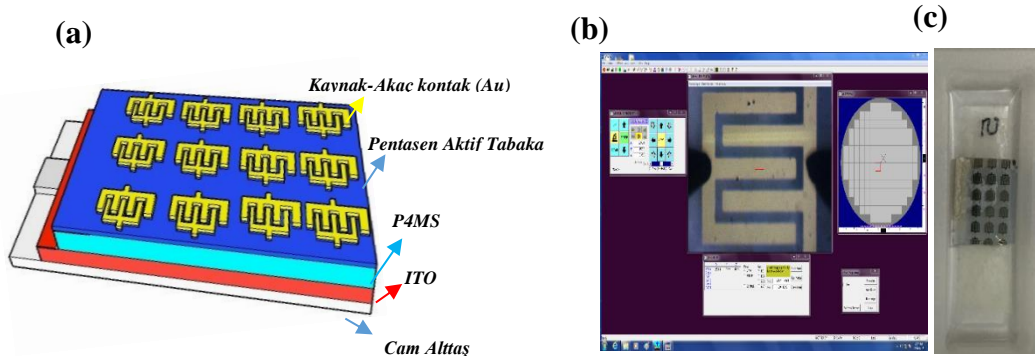
Alt kapı/üst yüzey kontak mimarisinde üretilen ITO/PMMA/Pentaseen OFET'in dielektrik tabakasını elde etmek için PMMA polimeri % 10'luk tolüen çözeltisinde (100 mg/ml) hazırlandı. Elde edilen çözelti spin kaplama yöntemi kullanılarak 1000 dev/dakika dönme hızında, 60 saniye süre ile ITO alttaş üzerine kaplandı. Oluşan PMMA filmi 100°C sıcaklıktaki fırında bir gece boyunca bekletilerek PMMA yalıtkan tabakası elde edildi. OFET üretiminin diğer aşamaları Kısım 6'daki ile aynıdır. Şekil 6.4'te ITO/PMMA/Pentaseen OFET'inin şematik yapısı, prob istasyonu kontak görüntüsü ve gerçek görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil. 6.4. ITO/PMMA/Pentacene OFET'inin (a) şematik yapısı, (b) prob istasyonu kontak görüntüsü, (c) gerçek görüntüsü

### 6.1.3. ITO/P4MS/Pentacene OFET'inin hazırlanması

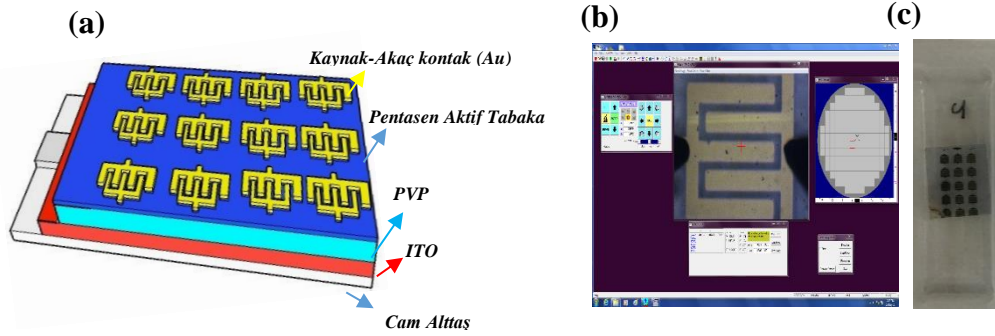
Alt kapı/üst yüzey kontak mimarisinde üretilen ITO/P4MS/Pentacene OFET'in dielektrik tabakasını elde etmek için P4MS polimeri % 10'luk tolüen çözeltisinde (100 mg/ml) hazırlandı. Elde edilen çözelti spin kaplama yöntemi kullanılarak 1000 dev/dakika dönme hızında, 60 saniye süre ile ITO alttaş üzerine kaplandı. Oluşan P4MS filmi 100°C sıcaklıktaki fırında bir gece boyunca bekletilerek P4MS yalıtkan tabakası elde edildi. OFET üretiminin diğer aşamaları Kısım 6'daki ile aynıdır. Şekil 6.5'te ITO/P4MS/Pentacene OFET'inin şematik yapısı, prob istasyonu kontak görüntüsü ve gerçek görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil. 6.5. ITO/P4MS/Pentacene OFET'inin (a) şematik yapısı, (b) prob istasyonu kontak görüntüsü, (c) gerçek görüntüsü

#### 6.1.4. ITO/PVP/Pentasen OFET'inin hazırlanması

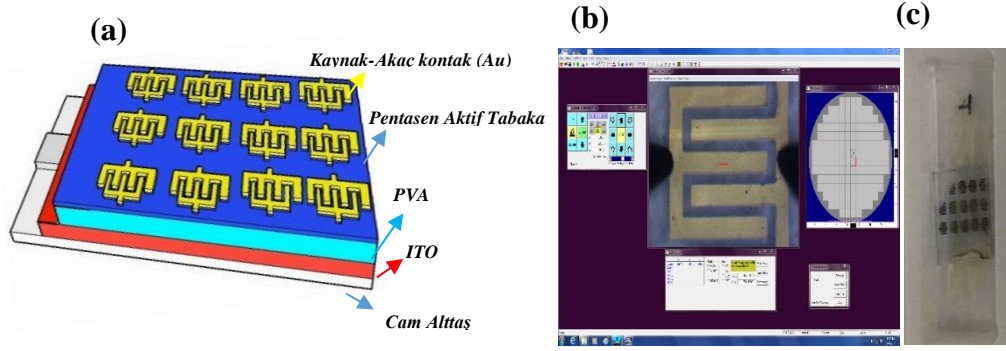
Alt kapı/üst yüzey kontak mimarisinde üretilen ITO/PVP/Pentasen OFET'in dielektrik tabakasını elde etmek için PVP polimeri % 10'luk 2-propanolde çözeltisinde (100 mg/ml) hazırlandı. Elde edilen çözelti spin kaplama yöntemi kullanılarak 1000 dev/dakika dönme hızında, 60 saniye süre ile ITO alttaş üzerine kaplandı. Oluşan PVP filmi 100°C sıcaklıktaki fırında bir gece boyunca bekletilerek PVP yalıtkan tabakası elde edildi. OFET üretiminin diğer aşamaları Kısım 6'daki ile aynıdır. Şekil 6.6'da ITO/PVP/Pentasen OFET'inin şematik yapısı, prob istasyonu kontak görüntüsü ve gerçek görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil. 6.6. ITO/PVP/Pentasen OFET'inin (a) şematik yapısı, (b) prob istasyonu kontak görüntüsü, (c) gerçek görüntüsü

#### 6.1.5. ITO/PVA/Pentasen OFET'inin hazırlanması

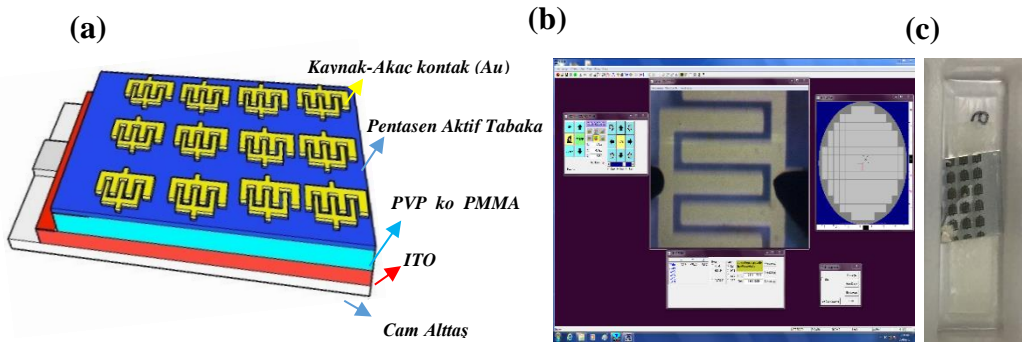
Alt kapı/üst yüzey kontak mimarisinde üretilen ITO/ PVA/Pentasen OFET'in dielektrik tabakasını elde etmek için PVA polimeri % 10'luk deiyonize suda çözeltisinde (100 mg/ml) hazırlandı. Elde edilen çözelti spin kaplama yöntemi kullanılarak 1000 dev/dakika dönme hızında, 60 saniye süre ile ITO alttaş üzerine kaplandı. Oluşan PVA filmi 100°C sıcaklıktaki fırında bir gece boyunca bekletilerek PVA yalıtkan tabakası elde edildi. OFET üretiminin diğer aşamaları Kısım 6'daki ile aynıdır. Şekil 6.7'de ITO/PVA/Pentasen OFET'inin şematik yapısı, prob istasyonu kontak görüntüsü ve gerçek görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil. 6.7. ITO/PVA/Pentasen OFET'inin (a) şematik yapısı, (b) prob istasyonu kontak görüntüsü, (c) gerçek görüntüsü

#### 6.1.6. ITO/PVP\_ko\_PMMA/Pentasen OFET'inin hazırlanması

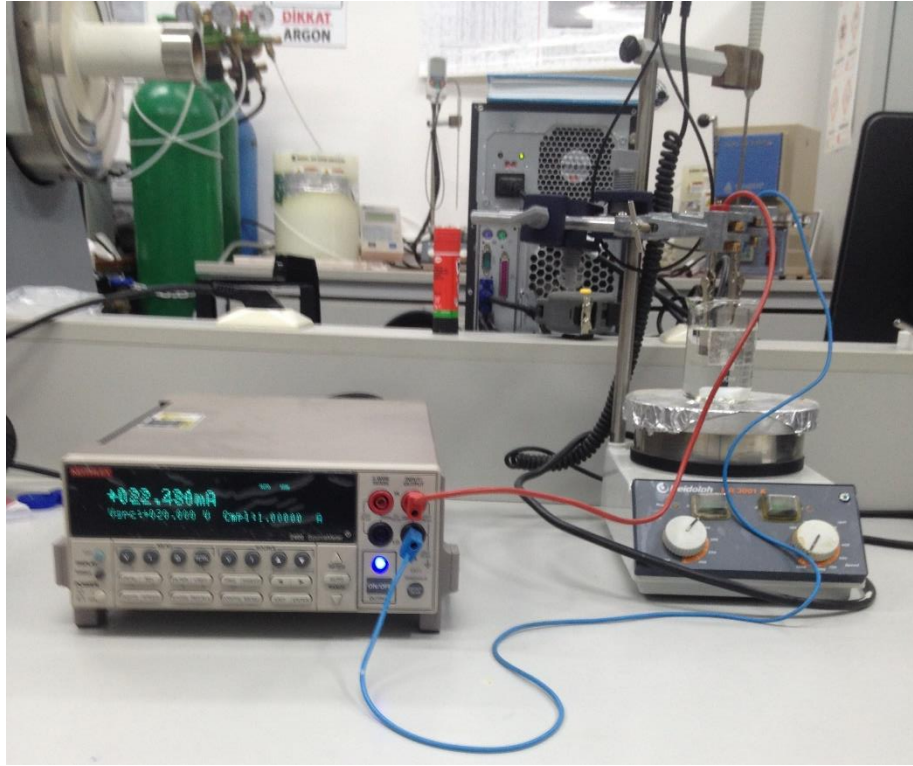
Alt kapı/üst yüzey kontak mimarisinde üretilen ITO/PVP\_ko\_PMMA/Pentasen OFET'in dielektrik tabakasını elde etmek için PVP\_ko\_PMMA polimeri % 10'luk deiyonize suda çözeltisinde (100 mg/ml) hazırlandı. Elde edilen çözelti spin kaplama yöntemi kullanılarak 1000 dev/dakika dönme hızında, 60 saniye süre ile ITO alttaş üzerine kaplandı. Oluşan PVP\_ko\_PMMA filmi 100°C sıcaklıktaki fırında bir gece boyunca bekletilerek PVP\_ko\_PMMA yalıtkan tabakası elde edildi. OFET üretiminin diğer aşamaları Kısım 6'daki ile aynıdır. Şekil 6.8'de ITO/PVP\_ko\_PMMA/Pentasen OFET'inin şematik yapısı, prob istasyonu kontak görüntüsü ve gerçek görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil. 6.8. ITO/PVP\_ko\_PMMA/Pentasen OFET'inin (a) şematik yapısı, (b) prob istasyonu kontak görüntüsü, (c) gerçek görüntüsü

## 6.2. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Polimer Çift Tabakalı Yalıtkanı ile Hazırlanan OFET'ler

Tek tabaka polimer yalıtkan tabakalı OFET'lerin üretiminden sonra Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/organik ikili yalıtkan tabakalı 5 adet OFET üretimi gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan ikili yalıtkan yapılar sırasıyla Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ PS, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/P4MS, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PMMA ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP\_ko\_PMMA kapı dielektrikleridir. İkili yapıda kullanılan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'in üretilmesi için anodizasyon işlemi uygulanmış ve bu işlemde kullanılan sistem Şekil 6.9'da verilmiştir.



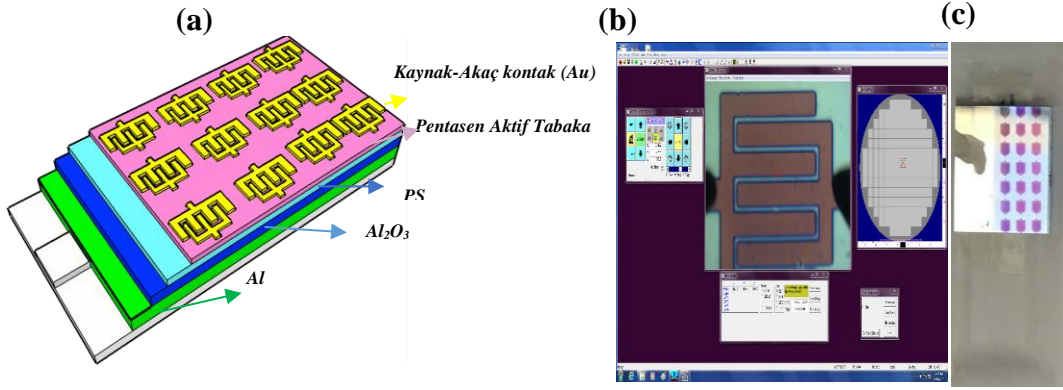
Şekil. 6.9. Anodizasyon sistemi

### 6.2.1. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PS/Pentasen OFET'inin hazırlanması

Alt kapı/üst yüzey kontak mimarisinde üretilen Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PS/Pentasen OFET'inde inorganik-organik ikili yalıtkan tabakası sırasıyla anodizasyon (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için) ve sol jel spin kaplama (PS için) yöntemleri kullanılarak hazırlanmıştır. Anodik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'in oluşturulması için 15 mmx1,5 mm boyutunda kesilen cam alttaşlar sırasıyla aseton, etanol ve deiyonize suda 10'ar dakika temizlendikten sonra azot gazı yardımıyla kurutuldu. Daha sonra bir kısmının kapı kontağı olarak kullanılması ve geriye kalan kısmının da yalıtkan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'e

dönüştürülmesi için 150nm kalınlığında alüminyum  $\sim 10^{-5}$  Torr basınç altında termal buharlaştırma cihazı yardımıyla temizlenen camlar üzerine kaplandı. Anodizasyon işlemi için hazırlanan alüminyum ile kaplanan alttaşlar 0,01M sitrik asit elektrolit çözeltisine yerleştirildi (100 ml DI su içinde 0,265 g sitrik asit, 2,57 g sodyum sitrate) [197] ve sabit 20V gerilim cam alttaş üzerine büyütülen alüminyum kaplı elektroda uygulandı. Anodizasyon işleminden sonra deiyonize suyla yıkanıp azot gazı ile kurutuldu. Son olarak yalıtkan  $Al_2O_3$  tabakaları 120 °C' de 30 dakika tavlandı. Bu şekilde 32 nm kalınlığında  $Al_2O_3$  ince filmler elde edildi. İkili yalıtkan tabakanın organik PS polimeri toluende % 0,5 (5 mg/ml) çözeltisi hazırlanarak spin kaplama yöntemiyle 5000 devir/dakika dönme hızıyla 60 saniye süre ile  $Al_2O_3$  inorganik yalıtkanı üzerine kaplandı. Böylece  $Al_2O_3$  inorganik yalıtkanı çok ince ( $\sim 4$ nm) organik tabaka ile kaplandı. Pentasen aktif tabakanın ve kaynak-akaç kontaklarının da oluşturulması Kısım 6'da anlatıldığı gibidir.

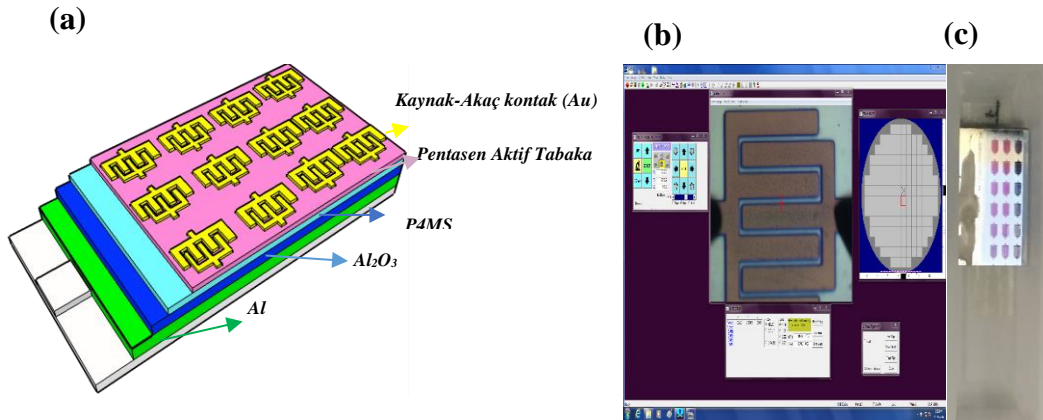
Anodik  $Al_2O_3$  dielektriğinin üretimi ucuz ve organik elektronik için istenilen esnek alttaşlar üzerine büyütülebilmesi açısından oldukça avantajlıdır. Bununla birlikte OFET'ler kaçak akımlardan ve inorganik yalıtkan-organik yarıiletken etkileşmesinde olumsuz etkilenmektedir. Bu problemlerin üstesinden gelmek için inorganik/organik hibrit çoklu yalıtkan tabakalar OFET'lerde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır [198,199]. Düşük dielektrik sabitine, pürüzsüz yüzeye ve düşük tuzak seviyesine sahip polimerler, yarıiletken yalıtkan ara yüzeyinde etkin taşıyıcı iletimini arttırabilir. Buna ek olarak ince inorganik yalıtkan tabaka üzerine polimer yalıtkanının büyütülmesi sızıntı akımını da azaltmaktadır. Bu nedenle metaloksit/polimer ikili kapı yalıtkanlarının OFET'lerde kullanılması istenmeyen birçok etkiyi azaltabilmektedir [200,201]. Şekil 6.10'da Al/ $Al_2O_3$ /PS/Pentasen OFET'inin şematik yapısı, prob istasyonu kontak görüntüsü ve gerçek görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil. 6.10. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PS/Pentaseen OFET'inin (a) şematik yapısı, (b) prob istasyonu kontak görüntüsü, (c) gerçek görüntüsü

### 6.2.2. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/P4MS/Pentaseen OFET'inin hazırlanması

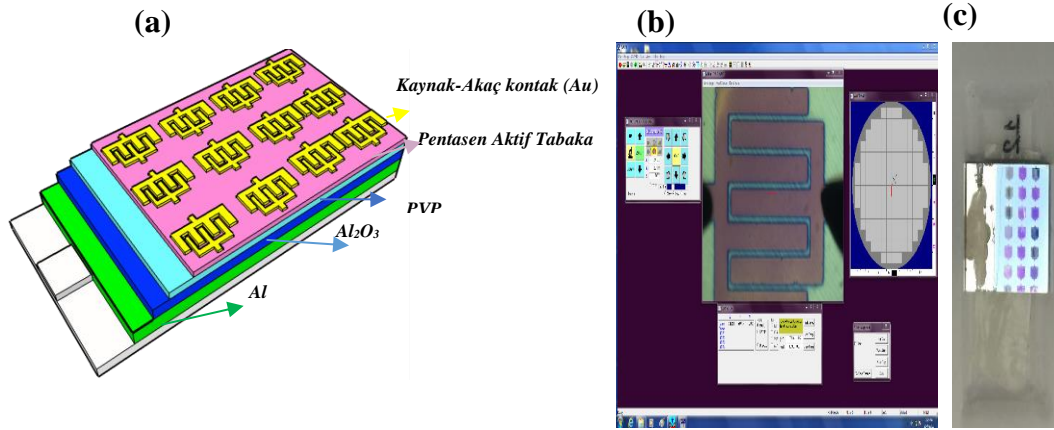
Alt kapı/üst yüzey kontak mimarisinde üretilen Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/P4MS/Pentaseen OFET'in dielektrik tabakalarından Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Kısım 6.2.1'de anlatıldığı gibi üretilmiştir. P4MS polimeri ise toluende % 0.5 (5 mg/ml) çözeltisi hazırlanarak spin kaplama yöntemiyle 5000 devir/dakika dönme hızıyla 60 saniye süre ile Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inorganik yalıtkanı üzerine kaplanmıştır. Böylece Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inorganik yalıtkanı çok ince (~ 4nm) organik tabaka ile kaplanmıştır. Pentaseen Aktif tabakanın ve kaynak-akaç kontaklarının da oluşturulması Kısım 6'da anlatıldığı gibidir. Şekil 6.11'de Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PS/Pentaseen OFET'inin şematik yapısı, prob istasyonu kontak görüntüsü ve gerçek görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil. 6.11. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/P4MS/Pentaseen OFET'inin (a) şematik yapısı, (b) prob istasyonu kontak görüntüsü, (c) gerçek görüntüsü

### 6.2.3. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP/Pentasen OFET'inin hazırlanması

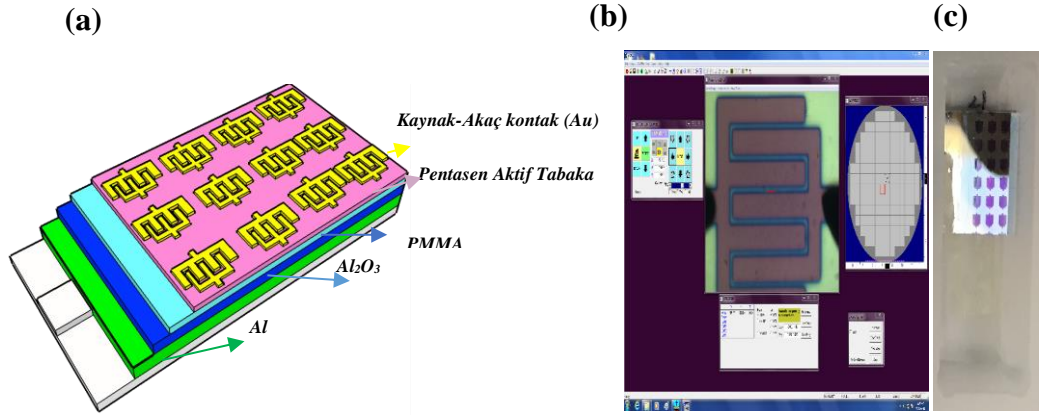
Alt kapı/üst yüzey kontak mimarisinde üretilen Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP/Pentasen OFET'in dielektrik tabakalarından Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Kısım 6.2.1'de anlatıldığı gibi üretilmiştir. PVP polimeri ise 2-Proponalde % 0.5 (5 mg/ml) çözeltisi hazırlanarak spin kaplama yöntemiyle 5000 devir/dakika dönme hızıyla 60 saniye süre ile Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inorganik yalıtkanı üzerine kaplanmıştır. Böylece Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inorganik yalıtkanı çok ince (~4nm) organik tabaka ile kaplanmıştır. Pentasen Aktif tabakanın ve kaynak-akaç kontaktlarının da oluşturulması Kısım 6'da anlatıldığı gibidir. Şekil 6.12'de Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PS/Pentasen OFET'inin şematik yapısı, prob istasyonu kontak görüntüsü ve gerçek görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil. 6.12. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP/Pentasen OFET'inin (a) şematik yapısı, (b) prob istasyonu kontak görüntüsü, (c) gerçek görüntüsü

### 6.2.4. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PMMA/Pentasen OFET'inin hazırlanması

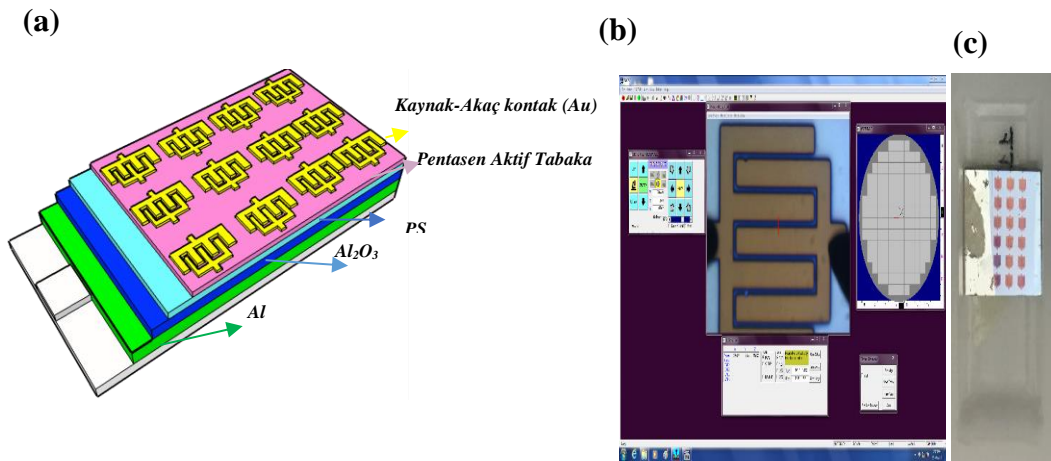
Alt kapı/üst yüzey kontak mimarisinde üretilen Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PMMA/Pentasen OFET'in dielektrik tabakalarından Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Kısım 6.2.1'de anlatıldığı gibi üretilmiştir. PMMA polimeri ise tolüende % 0,5 (5 mg/ml) çözeltisi hazırlanarak spin kaplama yöntemiyle 5000 devir/dakika dönme hızıyla 60 saniye süre ile Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inorganik yalıtkanı üzerine kaplandı. Böylece Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inorganik yalıtkanı çok ince (~4nm) organik tabaka ile kaplandı. Pentasen Aktif tabakanın ve kaynak-akaç kontaktlarının da oluşturulması Kısım 6'da anlatıldığı gibidir. Şekil 6.13'te Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ PMMA/Pentasen OFET'inin şematik yapısı, prob istasyonu kontak görüntüsü ve gerçek görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil. 6.13. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PMMA/Pentacene OFET'inin (a) Şematik yapısı, (b) Prob istasyonu kontak görüntüsü, (c) Gerçek görüntüsü

### 6.2.5. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP\_ko\_PMMA/Pentacene'nin hazırlanması

Alt kapı/üst yüzey kontak mimarisinde üretilen Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP\_ko\_PMMA/Pentacene OFET'in dielektrik tabakalarından Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Kısım 6.2.1'de anlatıldığı gibi üretilmiştir. PVP\_ko\_PMMA polimeri ise N,N-Dimetilformamid ile % 0,5 (5 mg/ml) çözeltisi hazırlanarak spin kaplama yöntemiyle 5000 devir/dakika dönme hızıyla 60 saniye süre ile Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inorganik yalıtkanı üzerine kaplandı. Böylece Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inorganik yalıtkanı çok ince (~4nm) organik tabaka ile kaplanmıştır. Pentacene Aktif tabakanın ve kaynak-akaç kontaklarının da oluşturulması Kısım 6'da anlatıldığı gibidir. Şekil 6.14'te Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP\_ko\_PMMA/Pentacene OFET'inin şematik yapısı, prob istasyonu kontak görüntüsü ve gerçek görüntüsü gösterilmektedir.



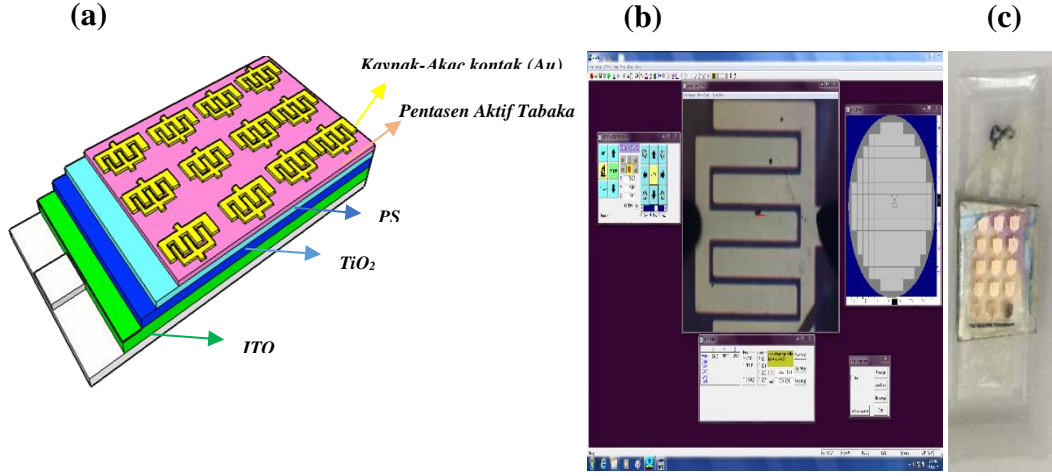
Şekil. 6.14. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP\_ko\_PMMA/Pentacene OFET'inin (a) şematik yapısı, (b) prob istasyonu kontak görüntüsü, (c) gerçek görüntüsü

### 6.3. TiO<sub>2</sub>/Polimer Çift Tabakalı Yalıtkanı ile Hazırlanan OFET'ler

İkinci inorganik/organik ikili yapılarımız TiO<sub>2</sub>/polimer kapı yalıtkanlarıdır. TiO<sub>2</sub>/polimer tabanlı 4 adet OFET üretimi gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan ikili yalıtkan kapı dielektrikleri sırasıyla TiO<sub>2</sub>/PS, TiO<sub>2</sub>/PVP, TiO<sub>2</sub>/PMMA ve TiO<sub>2</sub>/PVP\_ko\_PMMA yapılarıdır.

#### 6.3.1. ITO/TiO<sub>2</sub>/PS/Pentasen OFET'inin hazırlanması

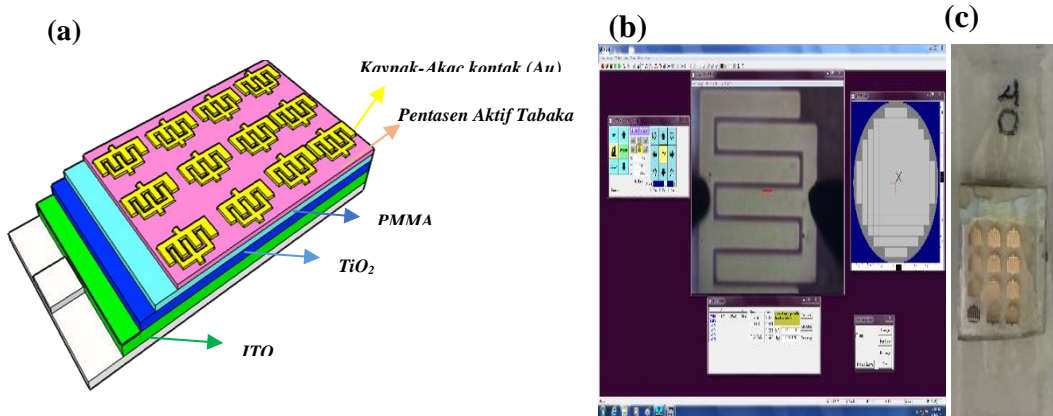
Alt kapı/üst yüzey kontak mimarisinde üretilen ITO/TiO<sub>2</sub>/PS/Pentasen OFET'in inorganik-organik ikili yalıtkan tabakası sol jel spin kaplama yöntemi ile hazırlanmıştır. TiO<sub>2</sub> dielektriğinin oluşturulması için öncelikle 15 mmx15 mm boyutunda kesilen 5-15  $\Omega$ /sq yüzey direncine sahip ITO alttaşı ultrasonik banyoda sırasıyla aseton, etanol ve deiyonize suda 10'ar dakika temizlendikten sonra azot gazı yardımıyla kurutulmuştur. 0,1 M olarak hazırlanan TiO<sub>2</sub> çözeltisinde Ti kaynağı olarak Tetra-n-Butyl orthotitanate (C<sub>16</sub>H<sub>36</sub>O<sub>4</sub>Ti), çözücü olarak etanol, stabilizer olarak nitrik asit ve deiyonize su kullanılmıştır. Hazırlanan çözeltinin homojenize olması için 60 °C de 2 saat süre ile karıştırılmıştır. Daha sonra ITO alttaşları üzerine 3000 devir/dk dönme hızı ile 30 sn süre ile kaplanmıştır. Kaplanan TiO<sub>2</sub> filmler 300°C sıcaklıktaki fırında 30 dakika bekletilmiş ve yaklaşık 20 nm kalınlığında TiO<sub>2</sub> ince filmler elde edilmiştir. İkili yalıtkan tabakada kullanılacak organik PS polimeri, toluende % 0,5 (5 mg/ml) çözeltisi hazırlanarak spin kaplama yöntemiyle 5000 devir/dakika dönme hızıyla 60 saniye süre ile TiO<sub>2</sub> inorganik yalıtkanı üzerine kaplanmıştır. Böylece TiO<sub>2</sub> inorganik yalıtkanı çok ince (~ 4nm) organik tabaka ile kaplandı. Pentasen aktif tabakanın ve kaynak-akaç kontaklarının da oluşturulması Kısım 6'da anlatıldığı gibidir. Şekil 6.15'te ITO/TiO<sub>2</sub>/PS/Pentasen OFET'inin şematik yapısı, prob istasyonu kontak görüntüsü ve gerçek görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil. 6.15. ITO/TiO<sub>2</sub>/PS/Pentacene OFET'inin (a) şematik yapısı, (b) prob istasyonu kontak görüntüsü, (c) gerçek görüntüsü

### 6.3.2. ITO/TiO<sub>2</sub>/PMMA/Pentacene OFET'inin hazırlanması

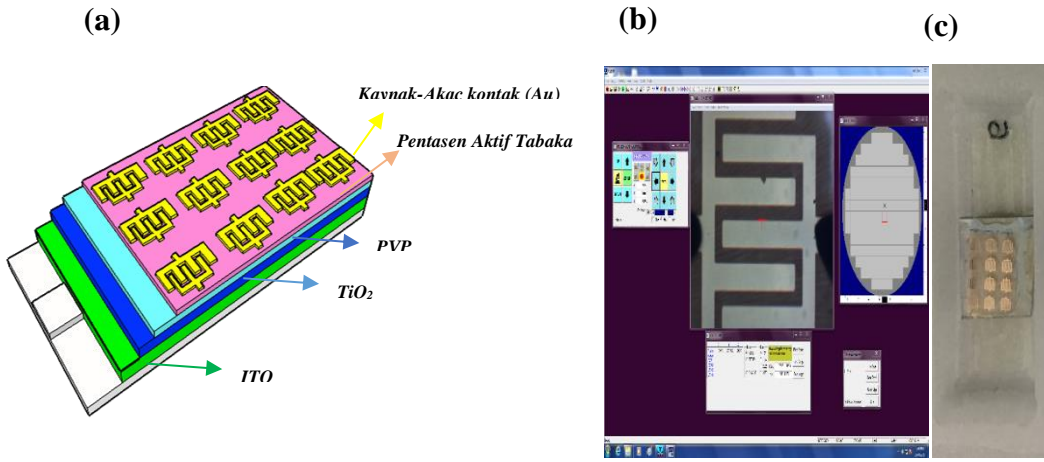
Alt kapı/üst yüzey kontak mimarisinde üretilen ITO/TiO<sub>2</sub>/PMMA/Pentacene OFET'in dielektrik tabakalarından TiO<sub>2</sub> Kısım 6.3.1'de anlatıldığı gibidir. PMMA polimeri ise tolüende % 0,5 (5 mg/ml) çözeltisi hazırlanarak spin kaplama yöntemiyle 5000 devir/dakika dönme hızıyla 60 saniye süre ile TiO<sub>2</sub> inorganik yalıtkanı üzerine kaplanmıştır. Böylece TiO<sub>2</sub> inorganik yalıtkanı çok ince (~4nm) organik tabaka ile kaplanmıştır. Pentacene aktif tabakanın ve kaynak-akaç kontaklarının da oluşturulması Kısım 6'da anlatıldığı gibidir. Şekil 6.16'da ITO/TiO<sub>2</sub>/PMMA/Pentacene OFET'inin şematik yapısı, prob istasyonu kontak görüntüsü ve gerçek görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil. 6.16. ITO/TiO<sub>2</sub>/PMMA/Pentacene OFET'inin (a) şematik yapısı, (b) prob istasyonu kontak görüntüsü, (c) gerçek görüntüsü

### 6.3.3. ITO/TiO<sub>2</sub>/PVP/Pentasen OFET'inin hazırlanması

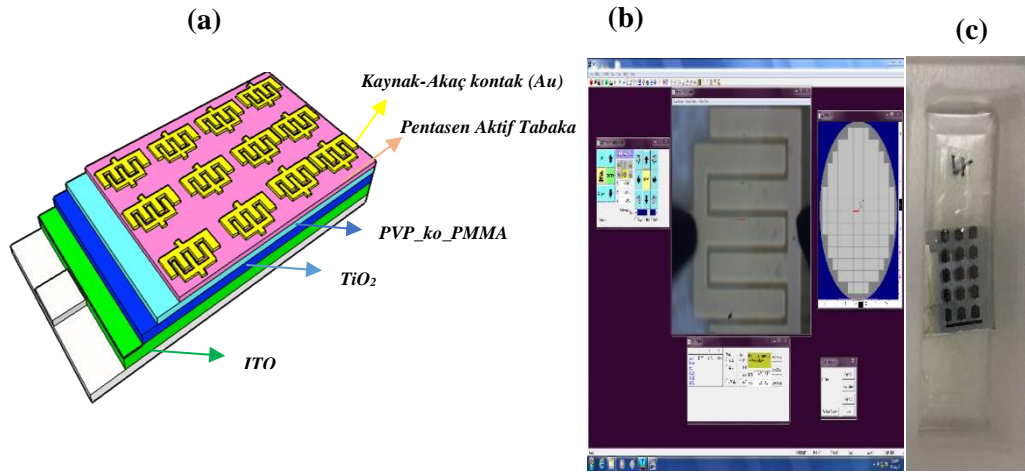
Alt kapı/üst yüzey kontak mimarisinde üretilen ITO/TiO<sub>2</sub>/PVP/Pentasen OFET'in dielektrik tabakalarından TiO<sub>2</sub> Kısım 6.3.1'de anlatıldığı gibidir. PVP polimeri ise 2-Proponalde % 0.5 (5 mg/ml) çözeltisi hazırlanarak spin kaplama yöntemiyle 5000 devir/dakika dönme hızıyla 60 saniye süre ile TiO<sub>2</sub> inorganik yalıtkanı üzerine kaplanmıştır. Böylece TiO<sub>2</sub> inorganik yalıtkanı çok ince (~4nm) organik tabaka ile kaplanmıştır. Pentasen aktif tabakanın ve kaynak-akaç kontaklarının da oluşturulması Kısım 6'da anlatıldığı gibidir. Şekil 6.17'de ITO/TiO<sub>2</sub>/PVP/Pentasen OFET'inin şematik yapısı, prob istasyonu kontak görüntüsü ve gerçek görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil. 6.17. ITO/TiO<sub>2</sub>/PVP/Pentasen OFET'inin (a) şematik yapısı, (b) prob istasyonu kontak görüntüsü, (c) gerçek görüntüsü

### 6.3.4. ITO/TiO<sub>2</sub>/PVP\_ko\_PMMA/Pentasenin hazırlanması

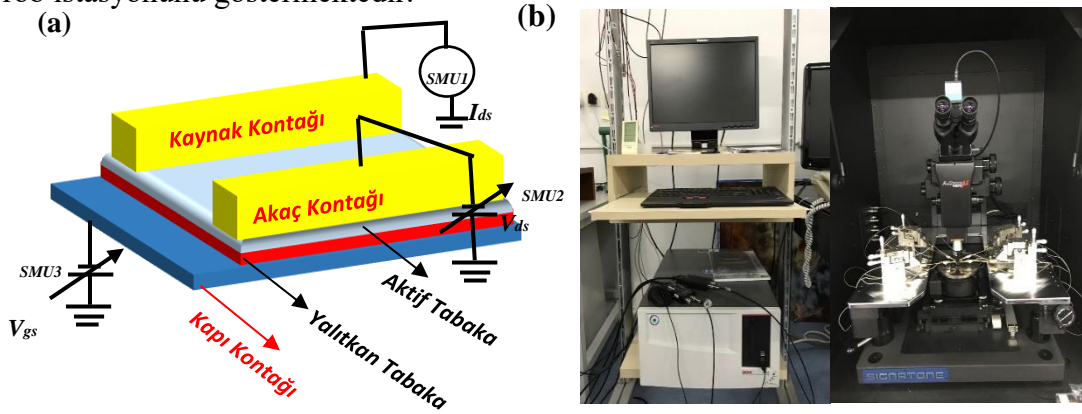
Alt kapı/üst yüzey kontak mimarisinde üretilen ITO/TiO<sub>2</sub>/PVP\_ko\_PMMA/Pentasen OFET'in dielektrik tabakalarından TiO<sub>2</sub> Kısım 6.3.1'de anlatıldığı gibidir. PVP\_ko\_PMMA polimeri ise N,N-Dimetilformamid % 0,5 (5 mg/ml) çözeltisi hazırlanarak spin kaplama yöntemiyle 5000 devir/dakika dönme hızıyla 60 saniye süre ile TiO<sub>2</sub> inorganik yalıtkanı üzerine kaplanmıştır. Böylece TiO<sub>2</sub> inorganik yalıtkanı çok ince (~4nm) organik tabaka ile kaplanmıştır. Pentasen aktif tabakanın ve kaynak-akaç kontaklarının da oluşturulması Kısım 6'da anlatıldığı gibidir. Şekil 6.18'de ITO/TiO<sub>2</sub>/PVP\_ko\_PMMA/Pentasen OFET'inin şematik yapısı, prob istasyonu kontak görüntüsü ve gerçek görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil. 6.18. *ITO/TiO<sub>2</sub>/PVP\_ko\_PMMA/Pentacene OFET*'inin (a) şematik yapısı, (b) prob istasyonu, (c) gerçek görüntüsü

## 7. OFET'LERİN KARAKTERİZASYONU

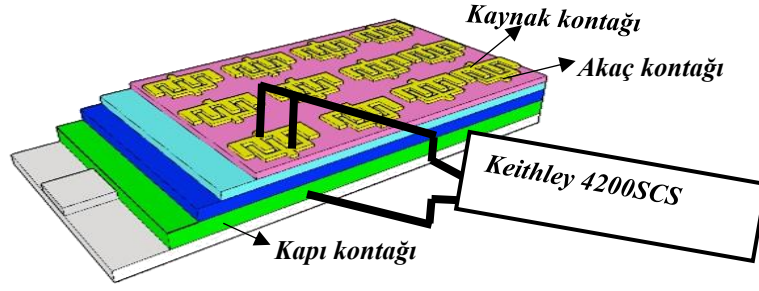
Farklı yalıtkan tabakalar kullanılarak oluşturulan OFET'lerin elektriksel ölçümleri Keithley 4200 SCS/CV yarıiletken karakterizasyon sistemi ve Signatone marka yarı-otomatik prob istasyonu yardımı ile ölçülmüştür. Tek tabaka organik yalıtkanların kullanıldığı OFET'lerin Foto-OFET karakteristikleri için 150 W'lık bir xenon lambaya sahip 1,5 AM (air mass) spektral dağılımını veren Sciencetech SF-150 marka solar simülator kullanılmıştır. Kullanılan ışığın şiddeti ise bir solar power metre yardımıyla ölçülmüştür. Oluşturulan alt ve üst kontakların omik kontak olup olmadıkları akım-voltaj ölçümleri ile Keithley 4200 SCS/CV yarıiletken karakterizasyon sistemi kullanılarak test edilmiş ve bütün kontakların omik kontak olduğu görülmüştür. Şekil 7.1 (a)'da OFET bağlantı şemasını Şekil 7.1 (b)'de ise Keithley 4200 SCS/CV cihazı ve bağlı prob istasyonunu göstermektedir.



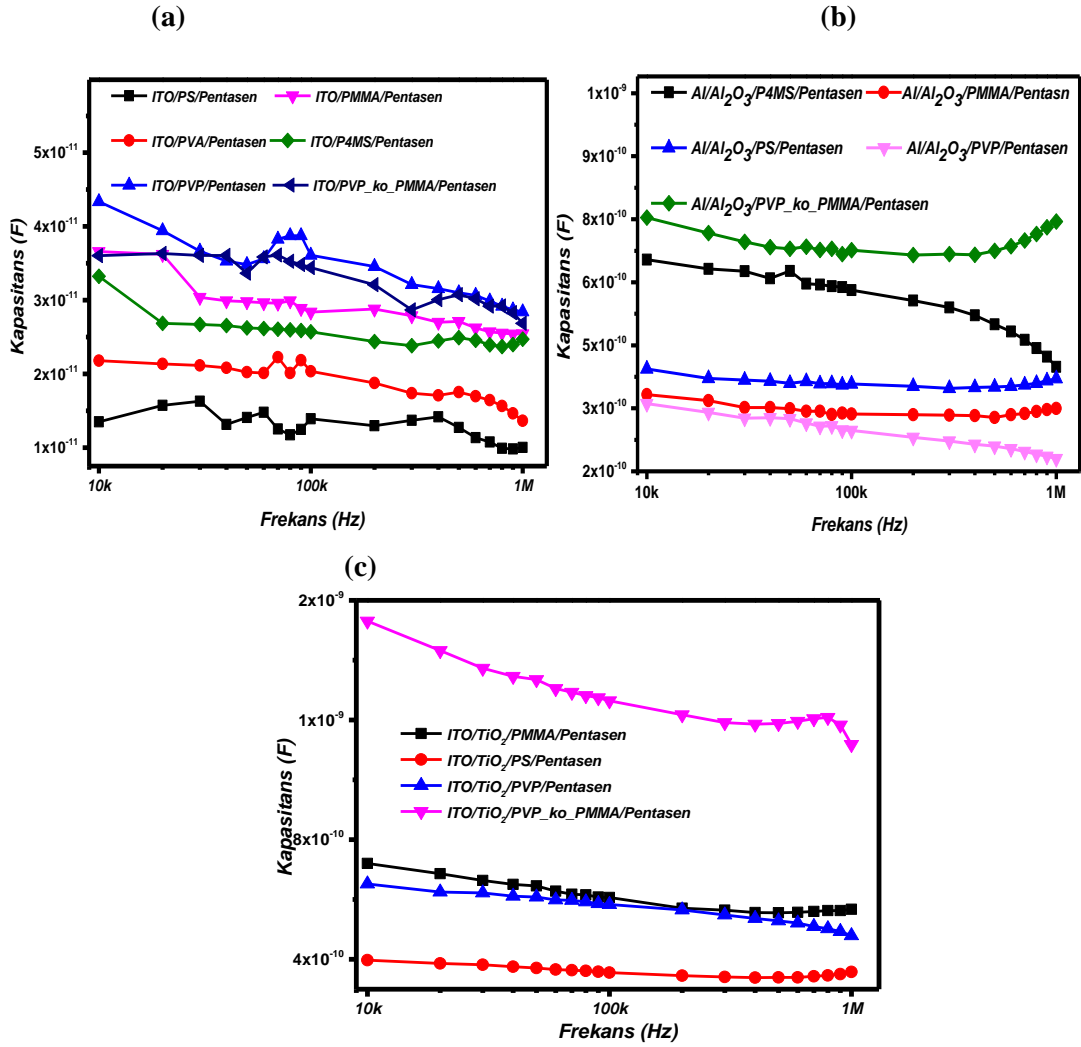
Şekil 7.1. (a) OFET'lerin I-V karakteristik şeması (b) Keithley 4200 SCS/CV sistemi ve bağlı prob istasyonu

### 7.1. Üretilen OFET'lerin Kapasitans-Frekans Ölçümleri

Üretilen OFET'lerin birim alan başına kapasitans değerlerinin elde edilmesi için Kapasitans-Frekans ( $C-F$ ) ölçümleri Şekil. 7.2'de görüldüğü gibi MIS (metal-yalıtkan-yarıiletken) yapısında gerçekleştirilmiş olup  $C-F$  ölçümleri Şekil. 7.3'de gösterilmiştir. OFET'lerin  $C-F$  karakteristikleri incelendiğinde, tüm OFET kapasitanslarının frekans ile değiştiği ve frekans arttıkça kapasitanslarının azaldığı görülmüştür.



Şekil 7.2. OFET'ler için C-F karakteristiğinin şematik yapısı



Şekil 7.3. Üretilen OFET'ler için C-F karakteristikleri,  
 (a) ITO/polimer/Pentasen, (b) Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/polimer/Pentasen,  
 (c) ITO/TiO<sub>2</sub>/polimer/Pentasen

MIS yapılarında arayüzey hallerindeki yükler, yüksek frekanslarda a.c sinyalinin takip edemediğinden dolayı kapasitans değeri düşmektedir [202,203]. Bununla beraber MIM (metal-yalıtkan-metal) yapılarında yüksek frekans ile kapasitans düşüşü, yalıtkan içerisinde bulunan moleküler dipollerin elektrik alanın hızlı değişimlerini takip edememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir [204]. Polimer tek tabaka yalıtkanına sahip ITO/P4MS/pentasen, ITO/PMMA/pentasen, ITO/PS/pentasen, ITO/PVA/pentasen, ITO/PVP/pentasen ve ITO/PVP\_ko\_PMMA/pentasen OFET'ler için birim alan başına kapasitans değerleri sırasıyla 3,7 nF/cm<sup>2</sup>, 3,92 nF/cm<sup>2</sup>, 1,3 nF/cm<sup>2</sup>, 2,58 nF/cm<sup>2</sup>, 4,68 nF/cm<sup>2</sup> ve 4,45 nF/cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/polimer tabanlı Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/P4MS/Pentasen, Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PMMA/Pentasen, Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PS/Pentasen, Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP/Pentasen ve Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP\_ko\_PMMA/Pentasen OFET'ler için birim alan başına kapasitans değerleri sırasıyla 74,3 nF/cm<sup>2</sup>, 37,8 nF/cm<sup>2</sup>, 44,7 nF/cm<sup>2</sup>, 35,4 nF/cm<sup>2</sup> ve 85,7 nF/cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. TiO<sub>2</sub>/polimer tabanlı ITO/TiO<sub>2</sub>/PMMA/pentasen, ITO/TiO<sub>2</sub>/PS/pentasen, ITO/TiO<sub>2</sub>/PVP/pentasen ve ITO/TiO<sub>2</sub>/PVP\_ko\_PMMA/pentasen OFET'ler için birim alan başına kapasitans değerleri ise sırasıyla 92 nF/cm<sup>2</sup>, 66,3 nF/cm<sup>2</sup>, 75,8 nF/cm<sup>2</sup> ve 238 nF/cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Kapı yalıtkanlarının yüksek kapasitans değerlerine sahip olması OFET'lerin düşük çalışma voltaj aralığında kontrol edilmesini sağlamaktadır [205]. Şekil 7.3'ten de görüldüğü gibi kapasitans değerleri Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/polimer yapıları OFET'lerde artmakta ve TiO<sub>2</sub>/polimer yapıları OFET'lerde ise daha da artmaktadır. Bu kapasitans değerleri de OFET'lerin çalışma voltaj aralığını doğrudan etkilemiştir.

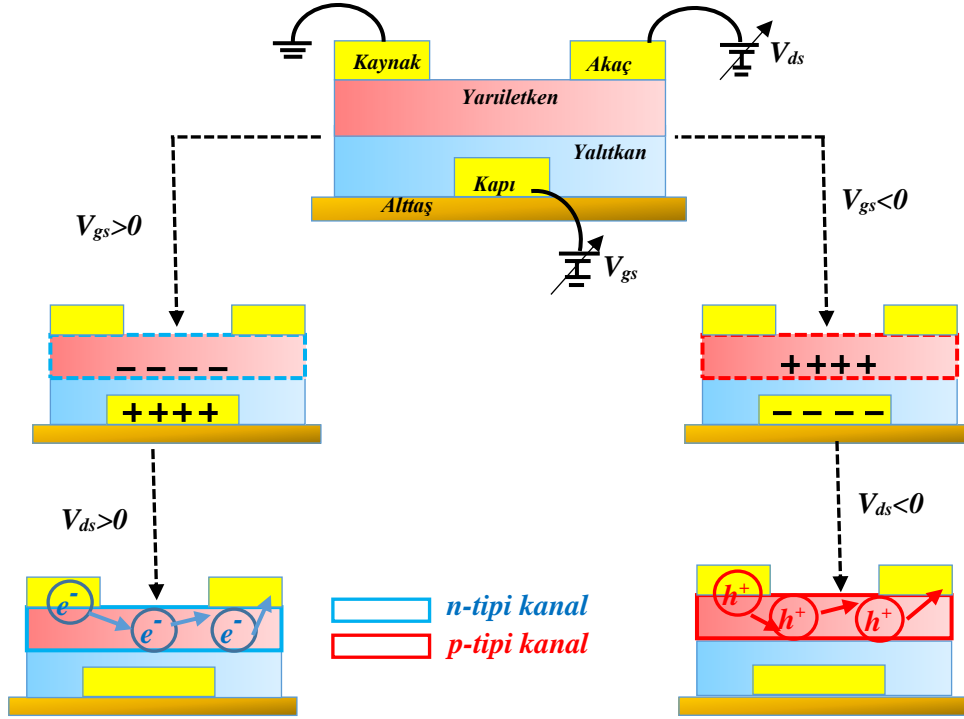
## **7.2. Tek Tabaka Polimer Yalıtkan Tabakasına Sahip OFET'lerin Elektriksel Ölçümleri**

OFET'lerin üretiminde yarıiletken malzemenin seçimi kadar cihazda kullanılacak kapı yalıtkanının seçimi de o kadar önemlidir. Kullanılacak yalıtkan tabakalar OFET'in bütün elektriksel parametrelerini değiştirebilmektedir. OFET'lerin performansının artırılabilmesi için yüksek dielektrik sabitine sahip, esnek yapıda, saf ve alttaş üzerine homojen ve düzgün büyütülebilecek yalıtkan tabakalara ihtiyaç vardır. Bölüm 2.'de anlatıldığı gibi OFET'lerin aktif tabakalarının çalışma prensibi yarıiletkenin HOMO ve LUMO orbitallerin konumları ile açıklanabilir. Kaynak-akaç arasına küçük bir voltaj uygulandığında, OFET kapalı (off) durumunda olduğu için yarıiletkende yük

oluşmayacaktır. n-tipi kanal yapısına sahip OFET'e pozitif bir kapı voltajı uygulanması ile yarıiletken/yalıtkan ara yüzeyinde büyük bir elektrik alan oluşur. Bu elektrik alanı yarıiletkendeki HOMO ve LUMO seviyelerini metal kontaktaki fermi seviyesine göre daha aşağıya indirir (daha düşük enerji seviyesine). Herhangi bir kapı voltajı uygulanmadığı zaman ise organik yarıiletkende HOMO ve LUMO seviyeleri sabit kalır. Eğer kapı voltajı yeterli seviyede ise ve bir kaynak voltajı uygulanırsa kontaktların fermi seviyesinden LUMO orbitallerinin içine elektronlar akmaya başlayacaktır. Bunun sonucunda, kaynak-akaç akımı oluşmaya başlayacaktır. p-tipi kanal yapısına sahip OFET'lerde de bu mantık aynıdır. Yeterli büyüklükte pozitif bir kapı voltajı uygulandığında, HOMO ve LUMO seviyelerinin bükülmesi ile HOMO seviyesi kontaktların fermi seviyesine gelir. Elektronlar yarıiletkenden kontaktlara doğru akarken geride pozitif yüklü holler bırakılır. Artık bu holler uygulanacak bir akaç voltajına karşı kanalda hareket edecek pozitif yüklerdir [206]. OFET'lerde kabul edilebilir bir performans elde etmek için, organik yarıiletkenler, hem enjeksiyon hem de akım taşıma özellikleriyle ilgili genel kriterleri yerine getirmelidir. Örneğin;

- malzemenin kristal yapısı komşu moleküller arasında verimli yük hareketinin sağlanması için orbitallerin yeterli derecede üst üste örtüşmesine olanak sağlamalıdır.
- malzemedeki yabancı maddeler yük taşıyıcı tuzakları gibi davrandığı için, malzeme son derece saf olmalıdır.
- moleküller, tercihen uzun eksen boyunca, OFET alttaşına yaklaşık olarak paralel yönlendirilmelidir. Çünkü, en etkin yük aktarımı, molekül içi  $\pi$ - $\pi$  istifleme yönünde meydana gelir.
- yarıiletken kristal domainleri kaynak ve akaç kontaktları arasındaki bölgede düzgün bir şekilde kaplanmalıdır. Çünkü film, tek kristal benzeri bir morfolojiye sahip olmalıdır.

OFET, açık konumdayken negatif kapı voltajına karşı oluşan negatif kaynak-akaç akımı kanalın p-tipi (holler çoğunluk taşıyıcılar), pozitif kapı voltajına karşı oluşan pozitif kaynak-akaç akımı ise kanalın n-tipi (elektronlar çoğunluk taşıyıcıları) olduğunu gösterir [207]. Şekil 7.4. OFET'lerde basit bir şekilde n ve p-tipi kanal çalışma şemasını göstermektedir.



Şekil 7.4. p ve n kanallı OFET'in şematik çalışma gösterimi

### 7.2.1. ITO/PS/Pentasen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri

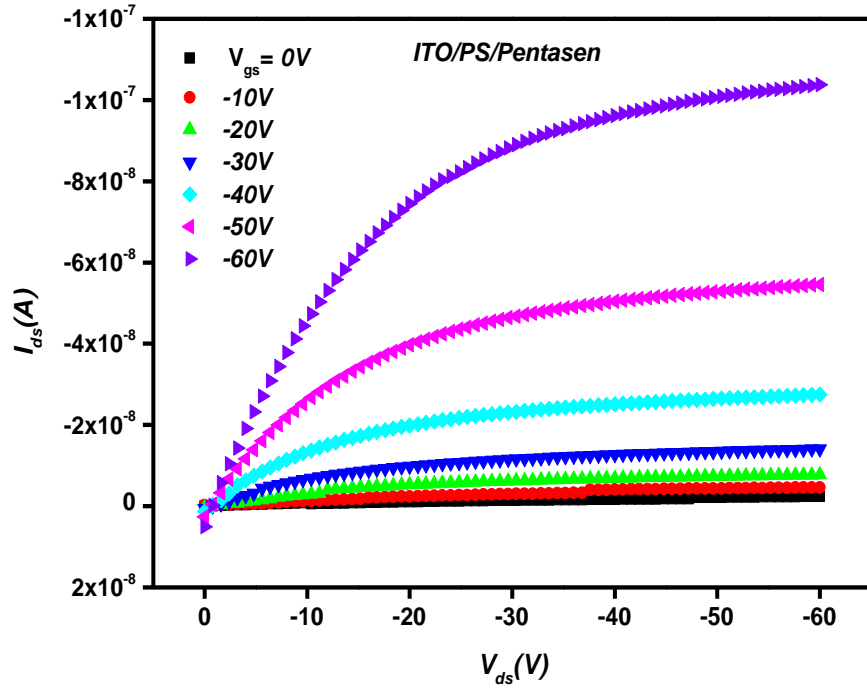
ITO/PS/Pentasen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri sırasıyla Şekil 7.5. ve Şekil 7.6.'da gösterilmektedir. OFET'in çıkış karakteristiği farklı kapı voltajlarına ( $V_{gs}$ ) bağlı olarak kaynak-akaç akımının ( $I_{ds}$ ), kaynak-akaç voltajına ( $V_{ds}$ ) göre değişimini göstermektedir. OFET'in çalışma voltajı 0 ile -60V arasında olup -10V aralıklarla ve 0 ile -60V arasında kapı voltajı uygulanmıştır. OFET'in akaç akımı küçük akaç voltajlarında lineer ve akaç geriliminin kapı gerilimine yaklaştığı voltajlarda ise kanalın kısıtılması nedeniyle doygunluğa ulaşmaktadır. OFET'in akaç akımı negatif kapı voltajı ile artması kanalın p-tipi yapıda olduğunu göstermektedir. Alan etkili mobilite ( $\mu$ ), eşik voltajı ( $V_{th}$ ), açma/kapama akım oranı ve alt eşik salınım değeri (SS) gibi OFET'ler için en önemli elektriksel parametreleri transfer karakteristiğinden elde edilmiştir. ITO/PS/Pentasen OFET'i için mobilite, eşik voltajı ve açma/kapama oranı sırasıyla  $5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ , -22V ve  $10^2$  olarak hesaplanmıştır. OFET'ler için önemli bir parametre de eşik voltaj değeridir. p-tipi yarıiletken tabanlı OFET'lerde negatif eşik voltajı OFET'in arttırma (enhancement) modunda çalıştığını göstermektedir. OFET 0V kapı geriliminde

( $V_{gs} = 0V$ ) kapalı durumdadır ve iletken bir kanal oluşması için negatif bir kapı voltajına ihtiyaç vardır. Azaltma (depletion) ve arttırma modu sıfır kapı voltajında transistörün kapalı (off) veya açık (on) olmasına karşılık gelen iki büyük çalışma modudur. Arttırma modlu OFET'ler sıfır kapı voltajında açık durumdayken azaltma modlu OFET'ler kapalı durumdadır. OFET'lerde arttırma modu tercih edilmektedir. Çünkü bu modda transistörü kapatmak için herhangi bir kapı voltajı uygulanmasına gerek yoktur [208]. Yarıiletken ve yalıtkan arasındaki tuzakların varlığını ve arayüzeyin kalitesini gösteren SS değeri ITO/PS/Pentasen OFET'i için 30 V/decade olarak hesaplanmıştır. SS değerinin düşük olması OFET performansının artışı için arzu edilen bir durumdur. OFET'ler için yarıiletken ve yalıtkan tabaka arasındaki tuzakların maksimum arayüzey yoğunluğu aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilir [209,210].

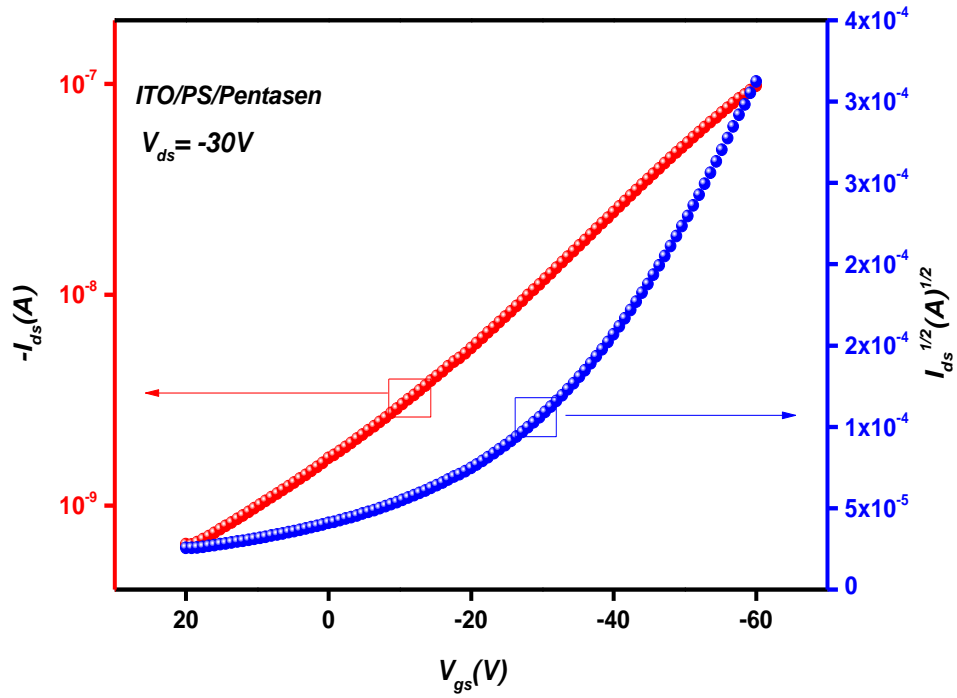
$$N_{max}^{SS} = \left[ \frac{SS \log(e)}{kT/q} - 1 \right] \frac{C_i}{q} \quad (7.1)$$

Denklemden  $k$ ; Boltzman sabiti,  $q$ ; elektrik yükü,  $C_i$ ; birim alan başına kapasitans ve  $T$  sıcaklıktır. ITO/PS/Pentasen OFET'inin arayüzey yoğunluğu  $4 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  olarak hesaplanmıştır. Yüksek ve düşük  $N_{max}^{SS}$  değeri cihaz performansını kuvvetli bir şekilde etkilemektedir.

Yüksek tuzak yoğunluğu, sızıntı akımını arttırdığından dolayı yüksek alt eşik salınım değerine ve düşük açma/kapama oranına neden olmaktadır. Dolayısıyla OFET'lerde tuzak yoğunluğunun azaltılması arzu edilir. Aynı zamanda tuzak yoğunluğunun azaltılması yarıiletken/yalıtkan arayüzey kalitesinin ve taşıyıcı mobilitelerinin artmasını sağlamaktadır [81,211].



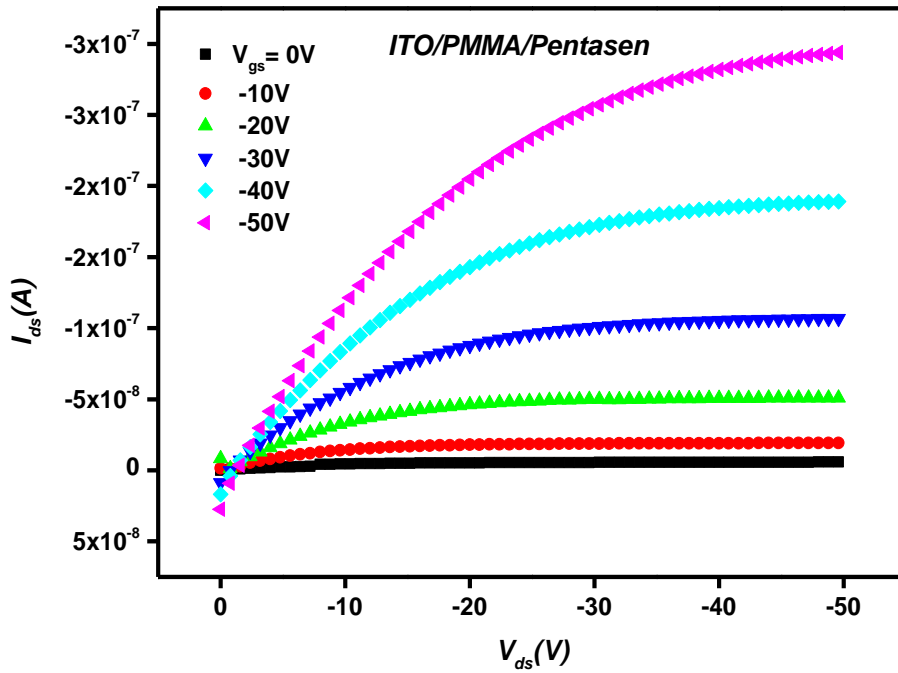
Şekil 7.5. ITO/PS/Pentacene OFET'inin çıkış karakteristiği



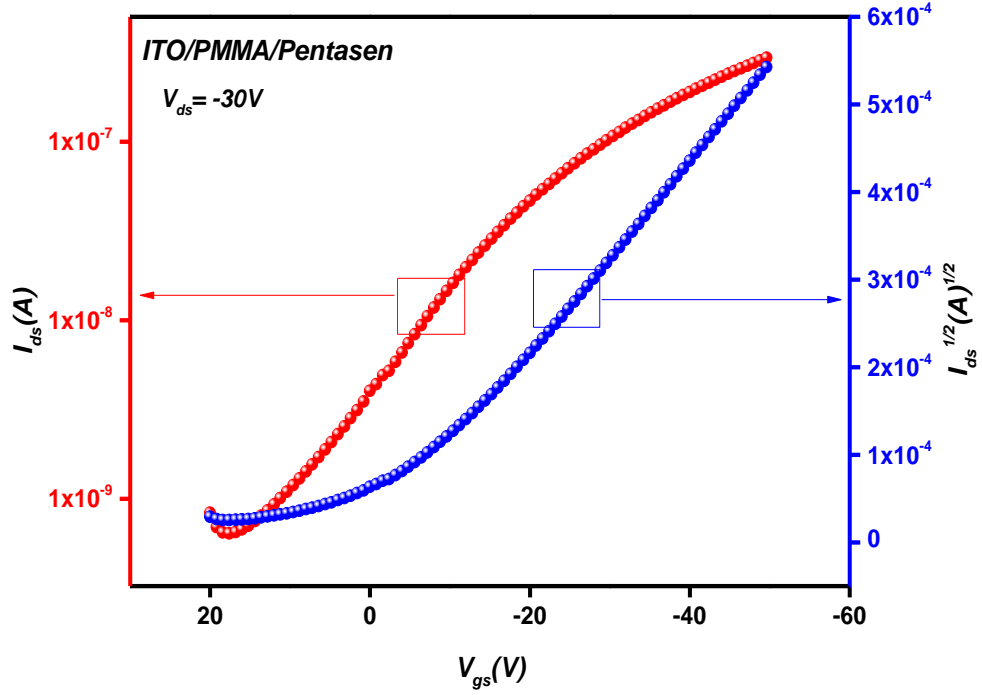
Şekil 7.6. ITO/PS/Pentacene OFET'inin transfer karakteristiği

## 7.2.2. ITO/PMMA/Pentasen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri

ITO/PMMA/Pentasen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri sırasıyla Şekil 7.7 ve Şekil 7.8'de gösterilmektedir. OFET'in çıkış karakteristiği farklı kapı voltajlarına ( $V_{gs}$ ) bağlı olarak kaynak-akaç akımının ( $I_{ds}$ ), kaynak-akaç voltajına ( $V_{ds}$ ) göre değişimini göstermektedir. OFET'in çalışma voltajı 0 ile -50V arasında olup -10V aralıklarla ve 0 ile -50V arasında kapı voltajı uygulanmıştır. OFET'in akaç akımı küçük akaç voltajlarında lineer ve akaç geriliminin kapı gerilimine yaklaştığı voltajlarda ise kanalın kısırılması nedeniyle doygunluğa ulaşmaktadır. OFET'in akaç akımı negatif kapı voltajı ile artması kanalın p-tipi yapıda olduğunu göstermektedir. ITO/PMMA/Pentasen OFET'inin mobilitesi, eşik voltajı ve açma/kapama oranı sırasıyla  $3,2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , -1,2V ve  $10^3$  olarak bulunmuştur. OFET, negatif eşik voltajı ile arttırma modunda çalışmaktadır. OFET için alt eşik salınım değeri 17 V/decade olarak hesaplanmıştır. ITO/PMMA/Pentasen OFET'inin arayüzey yoğunluğu ise  $6,9 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  olarak hesaplanmıştır.



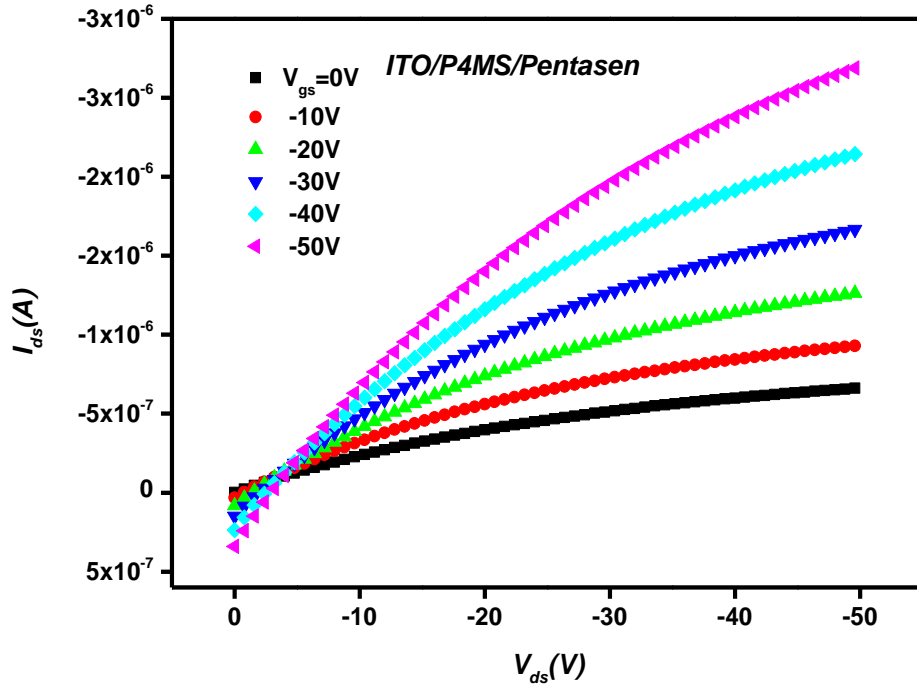
Şekil 7.7. ITO/PMMA/Pentasen OFET'inin çıkış karakteristiği



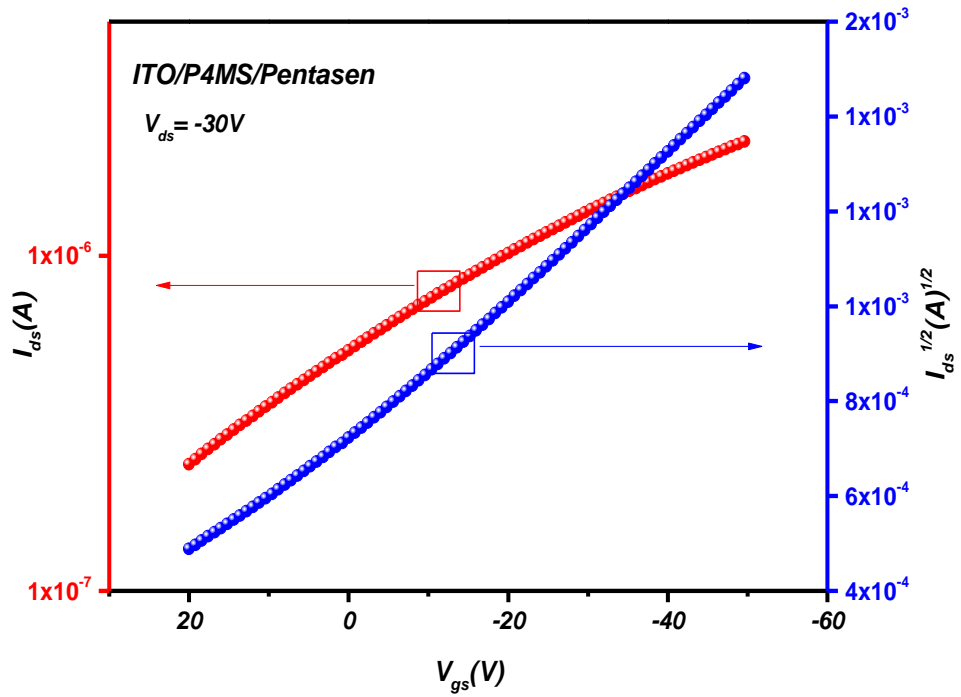
Şekil 7.8. ITO/PMMA/Pentaseen OFET'inin transfer karakteristiği

### 7.2.3. ITO/P4MS/Pentaseen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri

ITO/P4MS/Pentaseen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri sırasıyla Şekil 7.9 ve Şekil 7.10'da gösterilmektedir. OFET'in çıkış karakteristiği farklı kapı voltajlarına ( $V_{gs}$ ) bağlı olarak kaynak-akaç akımının ( $I_{ds}$ ) kaynak-akaç voltajına ( $V_{ds}$ ) göre değişimini göstermektedir. OFET'in çalışma voltajı 0 ile -50V arasında olup -10V aralıklarla ve 0 ile -50V arasında kapı voltajı uygulanmıştır. OFET'in akaç akımı negatif kapı voltajı ile artması kanalın p-tipi yapıda olduğunu göstermektedir. ITO/P4MS/Pentaseen OFET'inin mobilitesi, eşik voltajı ve açma/kapama oranı sırasıyla  $6,7 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ , 43V ve 10 olarak bulundu. OFET'in pozitif eşik voltajı ile azaltma modunda çalıştığı görülmektedir. OFET için alt eşik salınım değeri 67 V/decade olarak hesaplanmıştır. ITO/P4MS/Pentaseen OFET'inin arayüzey yoğunluğu ise  $2,6 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$  olarak hesaplanmıştır.



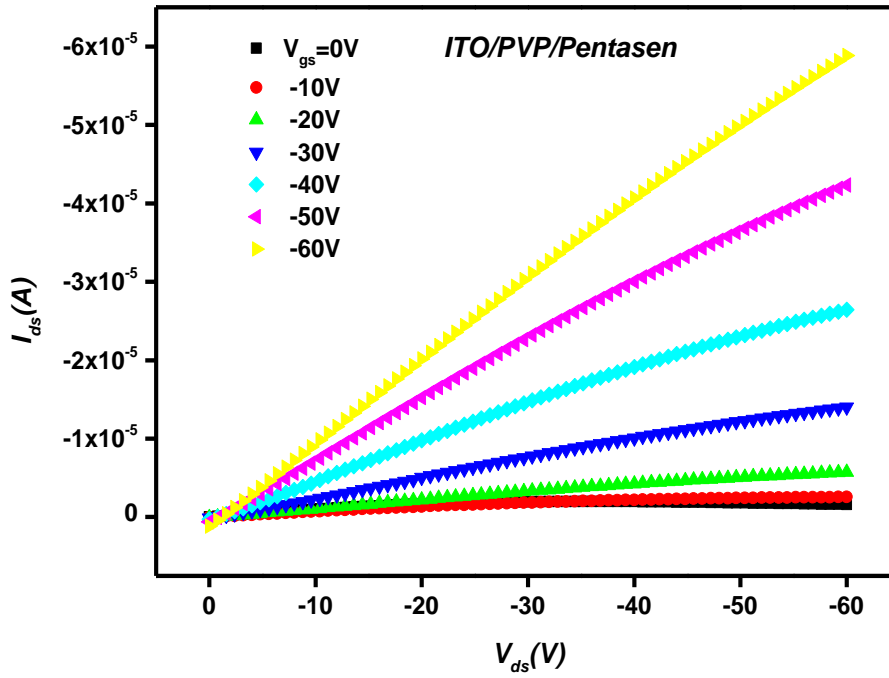
Şekil 7.9. ITO/P4MS/Pentaseen OFET'inin çıkış karakteristiği



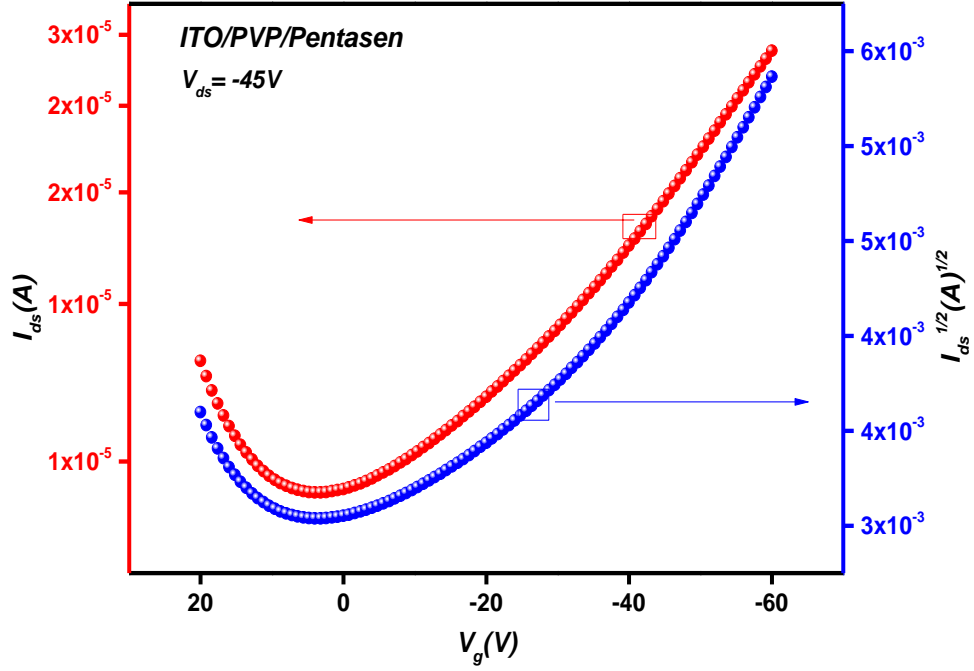
Şekil 7.10. ITO/P4MS/Pentaseen OFET'inin transfer karakteristiği

#### 7.2.4. ITO/PVP/Pentasen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri

ITO/PVP/Pentasen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri sırasıyla Şekil 7.11 ve Şekil 7.12'de gösterilmektedir. OFET'in çıkış karakteristiği farklı kapı voltajlarına ( $V_{gs}$ ) bağlı olarak kaynak-akaç akımının ( $I_{ds}$ ), kaynak-akaç voltajına ( $V_{ds}$ ) göre değişimini göstermektedir. OFET'in çalışma voltajı 0 ile -60V arasında olup -10V aralıklarla ve 0 ile -60V arasında kapı voltajı uygulanmıştır. OFET'in akaç akımı negatif kapı voltajı ile artması kanalın p-tipi yapıda olduğunu göstermektedir. ITO/P4MS/Pentasen OFET'inin mobilitesi, eşik voltajı ve açma/kapama oranı sırasıyla  $6,6 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , 34,6V ve 4 olarak bulunmuştur. OFET pozitif eşik voltajı ile azaltma modunda çalıştığı görülmektedir. OFET için alt eşik salınım değeri 90 V/decade olarak hesaplanmıştır. ITO/P4MS/Pentasen OFET'inin arayüzey yoğunluğu ise  $3,7 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  olarak hesaplanmıştır.



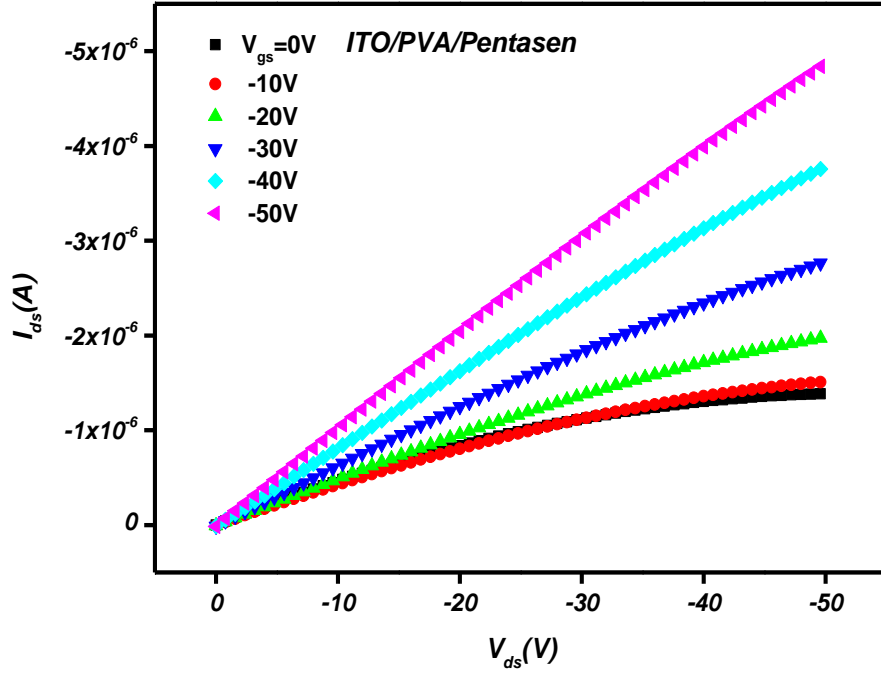
Şekil 7.11. ITO/PVP/Pentasen OFET'inin çıkış karakteristiği



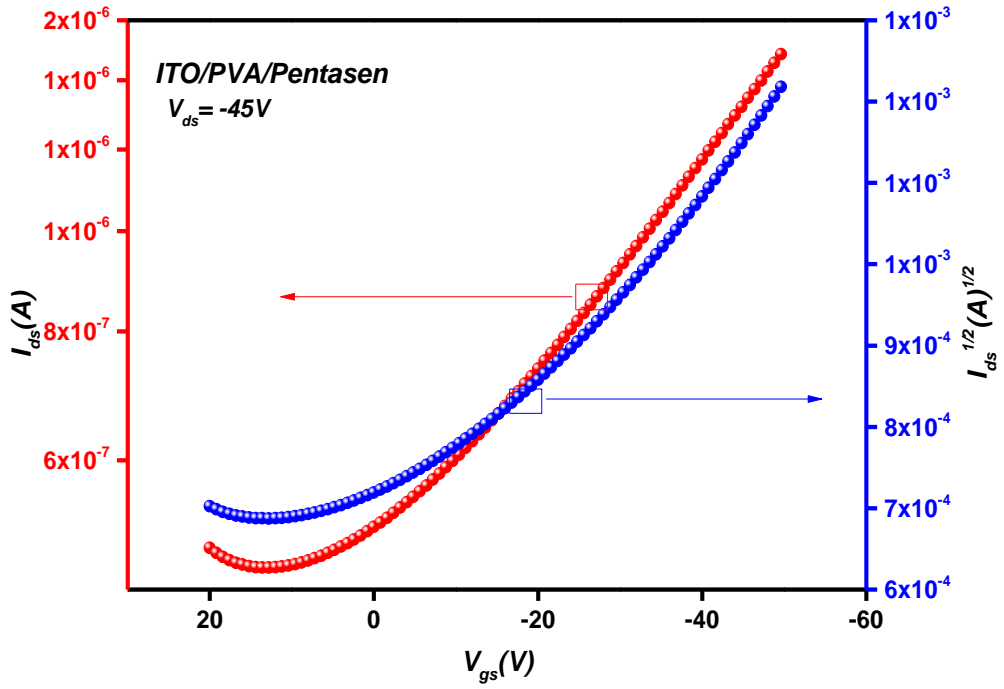
Şekil 7.12. ITO/PVP/Pentaseen OFET'inin transfer Karakteristiği

### 7.2.5. ITO/PVA/Pentaseen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri

ITO/PVA/Pentaseen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri sırasıyla Şekil 7.13 ve Şekil 7.14'te gösterilmektedir. OFET'in çıkış karakteristiği farklı kapı voltajlarına ( $V_{gs}$ ) bağlı olarak kaynak-akaç akımının ( $I_{ds}$ ), kaynak-akaç voltajına ( $V_{ds}$ ) göre değişimini göstermektedir. OFET'in çalışma voltajı 0 ile -50V arasında olup -10V aralıklarla ve 0 ile -50V arasında kapı voltajı uygulanmıştır. OFET'in akaç akımı negatif kapı voltajı ile artması kanalın p-tipi yapıda olduğunu göstermektedir. ITO/PVA/Pentaseen OFET'inin mobilitesi, eşik voltajı ve açma/kapama oranı sırasıyla  $7,3 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , 38V ve 10 olarak bulunmuştur. OFET pozitif eşik voltajı ile azaltma modunda çalıştığı görülmektedir. OFET için alt eşik salınım değeri 94 V/decade olarak hesaplanmıştır. ITO/PVA/Pentaseen OFET'inin arayüzey yoğunluğu ise  $2,5 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  olarak hesaplanmıştır.



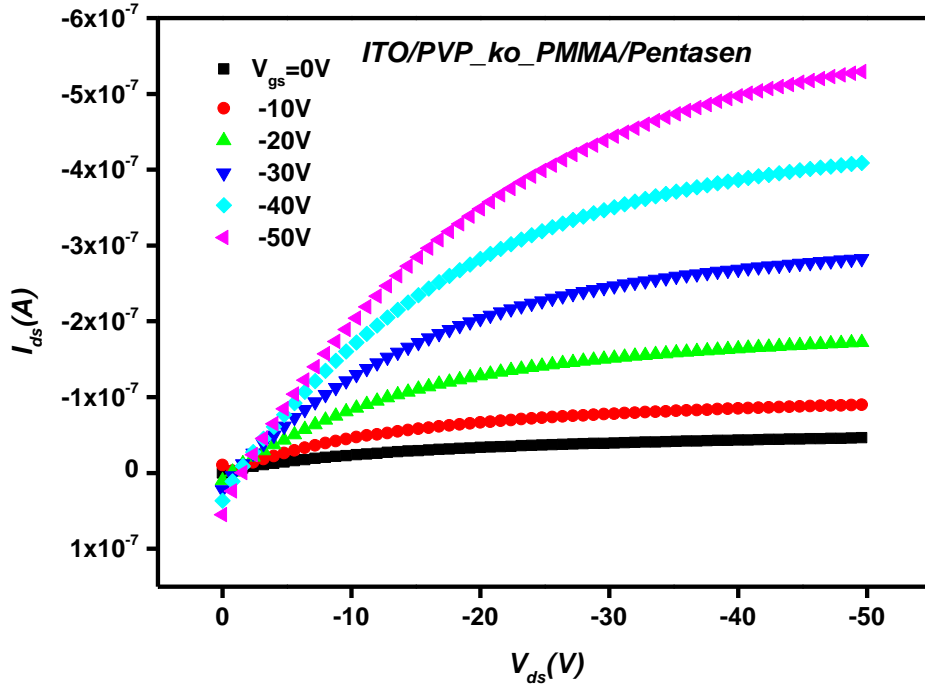
Şekil 7.13. ITO/PVA/Pentaseen OFET'inin çıkış karakteristiği



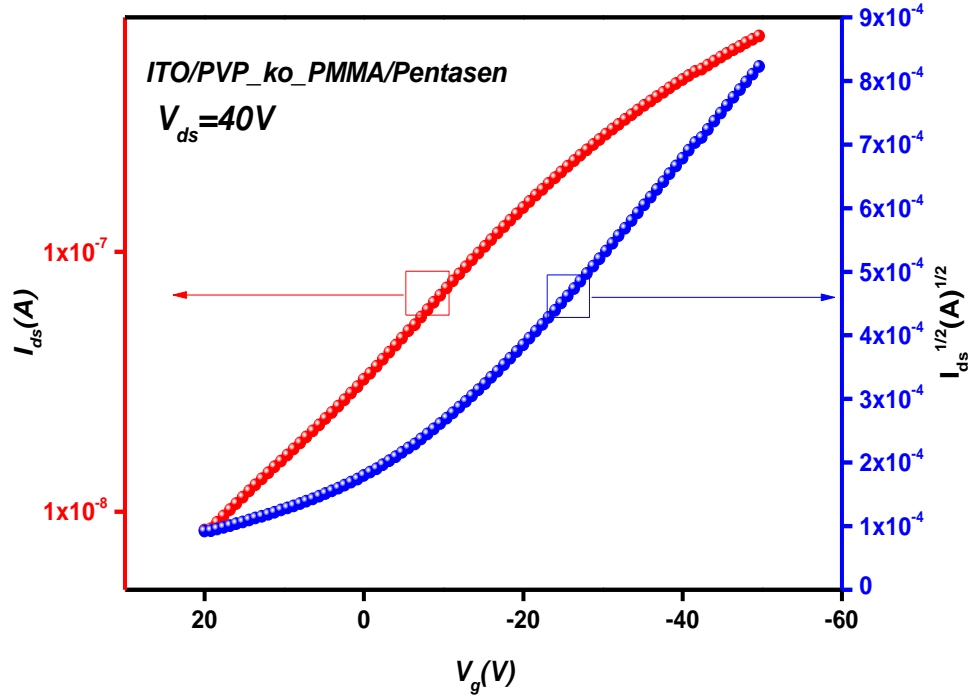
Şekil 7.14. ITO/PVA/Pentaseen OFET'inin transfer karakteristiği

### 7.2.6. ITO/PVP\_ko\_PMMA/Pentasen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri

ITO/PVP\_ko\_PMMA/Pentasen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri sırasıyla Şekil 7.15 ve Şekil 7.16'da gösterilmektedir. OFET'in çıkış karakteristiği farklı kapı voltajlarına ( $V_{gs}$ ) bağlı olarak kaynak-akaç akımının ( $I_{ds}$ ), kaynak-akaç voltajına ( $V_{ds}$ ) göre değişimini göstermektedir. OFET'in çalışma voltajı 0 ile -50V arasında olup -10V aralıklarla ve 0 ile -50V arasında kapı voltajı uygulanmıştır. OFET'in akaç akımı negatif kapı voltajı ile artması kanalın p-tipi yapıda olduğunu göstermektedir. ITO/PVP\_ko\_PMMA/Pentasen OFET'inin mobilitesi, eşik voltajı ve açma/kapama oranı sırasıyla  $5,5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , 4,4V ve  $10^2$  olarak bulunmuştur. OFET pozitif eşik voltajı ile azaltma modunda çalıştığı görülmektedir. OFET için alt eşik salınım değeri 30 V/decade olarak hesaplanmıştır. ITO/PVA/Pentasen OFET'inin arayüzey yoğunluğu ise  $1,2 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  olarak hesaplanmıştır. Tek tabaka yalıtkan filmler ile hazırlanan OFET'lerin elektriksel parametreleri Çizelge 7.1'de verilmiştir.



Şekil 7.15. ITO/PVP\_ko\_PMMA/Pentasen OFET'inin çıkış karakteristiği



Şekil 7.16. ITO/PVP\_ko\_PMMA/Pentaseen OFET'inin transfer karakteristiği

Çizelge 7.1'de görüldüğü gibi en yüksek mobilite değeri OFET ITO/PVP/Pentaseen OFET'e aittir. Buna rağmen, diğer OFET'lere ait parametrelerin istenilen düzeyde olmadığı görülmektedir. Transistörün açma hızının bir ölçüsü olan alt eşik salınım değeri en düşük ITO/PMMA/Pentaseen OFET'te elde edilmiştir. Buna paralel olarak en yüksek açma/kapama oranı da bu OFET'e aittir. Kanal akımının alt eşik davranışı yarıiletkenin yasak enerji aralığı içinde bulunan kusurlu durumlara ve safsızlıklara atfedilebilir [212]. Literatürde yapılan bazı çalışmalarda pentaseen tabanlı OFET'in tek tabaka kapı yalıtkanı olarak PS'nin kullanıldığı transistörde mobilete  $0,18 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  [213] olarak, PMMA'nın kullanıldığı transistörlerde ise  $0,01 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  [214] olarak bulunmuştur. Farklı PMMA kalınlıklarının kullanıldığı pentaseen tabanlı OFET'lerde mobilite sırasıyla  $0,270 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  (152nm,PMMA),  $0,151 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  (427nm,PMMA) ve  $0,014 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  (810 nm,PMMA) olarak elde edilmiştir [131]. Diğer bir çalışmada, Kang ve ark. [215] PVP ve PMMA yalıtkanlarını kullandıkları pentaseen tabanlı OFET'lerde sırasıyla mobilite değerlerini  $0,15 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  ve  $0,045 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  olarak bulmuşlardır. Çizelge 7.1'de rapor edilen OFET'lere ait olan elektriksel parametre

değerleri arasındaki farklılıklarının sebebinin, yalıtkan/yarıiletken arayüzey morfolojisinden ve taşıyıcıların tuzaklanma durumlarından kaynaklandığı düşünülmektedir [92].

**Çizelge 7.1.** Tek Tabaka Yalıtkan Filmler ile Hazırlanan OFET'lerin Elektriksel Parametreleri

OFET	$\mu$ ( $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ )	$V_{th}$ (V)	$I_{açma}/I_{kapama}$	SS (V/decade)	$N_{max}^{SS}$ ( $10^{13}\text{eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ )
<i>ITO/PS/Pentasen</i>	$5 \times 10^{-3}$	-22	$10^2$	30	0,4
<i>ITO/PMMA/Pentasen</i>	$3,2 \times 10^{-3}$	-1,2	$10^3$	17	0,69
<i>ITO/P4MS/Pentasen</i>	$6,7 \times 10^{-3}$	43	10	67	2,6
<i>ITO/PVP/Pentasen</i>	$6,6 \times 10^{-2}$	34,6	4	90	3,7
<i>ITO/PVA/Pentasen</i>	$7,3 \times 10^{-3}$	38	10	94	2,5
<i>ITO/PVP_ko_PMMA/Pentasen</i>	$5,5 \times 10^{-3}$	4,4	$10^2$	30	1,2

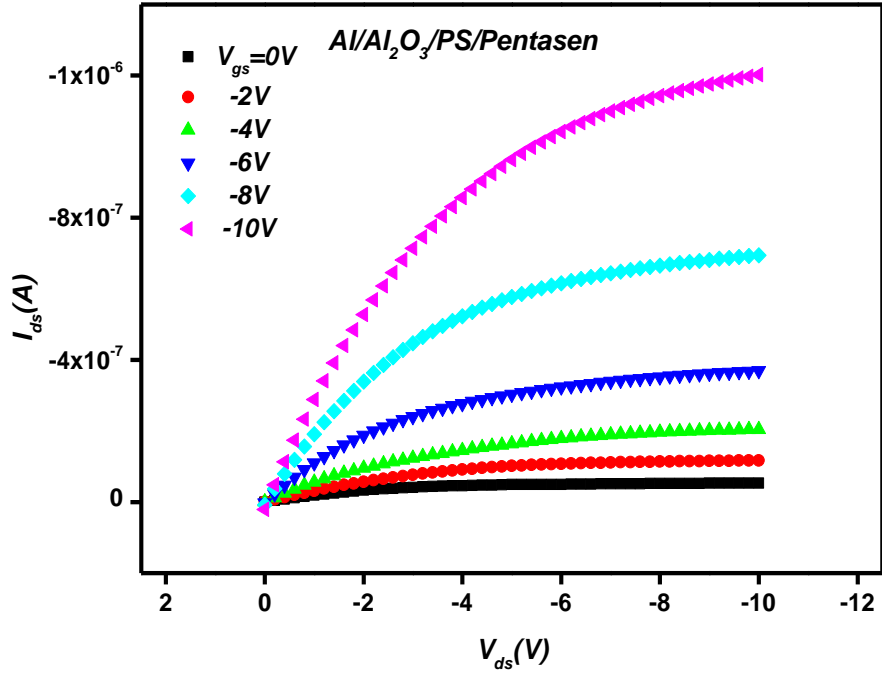
### 7.3. $\text{Al}_2\text{O}_3$ /Polimer Çift Tabakalı Yalıtkanı ile Hazırlanan OFET'lerin Elektriksel Ölçümleri

Düşük çalışma voltajı, hızlı anahtarlama özelliği, esnek ve ucuz OFET teknolojisi üzerine yapılan çalışmalar, daha iyi yalıtkan tabakanın elde edilmesi, alan etkili mobilitenin artırılması ve yük enjeksiyon probleminin çözülmesi üzerine yoğunlaşmaktadır [195,216]. OFET'lerin elektriksel performansı hem organik yarıiletkenlere hem de kapı yalıtkanına bağlı değişebilen mobilite değeri üzerinden yorumlanmaktadır.  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  ve  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  gibi inorganik oksit yalıtkanlar kapı dielektriği olarak yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak bu inorganik yalıtkanlarının çoğu pahalı ve yüksek vakum gerektiren büyütme yöntemleri ile elde edilmektedir. Anodik oksidasyon yöntemi ile hazırlanan  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , düşük maliyetli büyütme işlemi ve cazip dielektrik özellikleri sayesinde OFET'ler için uygun bir kapı yalıtkanıdır (dielektrik sabiti  $\sim 8-10$ , elektriksel kırılma alanı  $> 8 \text{ MV/cm}$ ). Ayrıca  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'ün organik

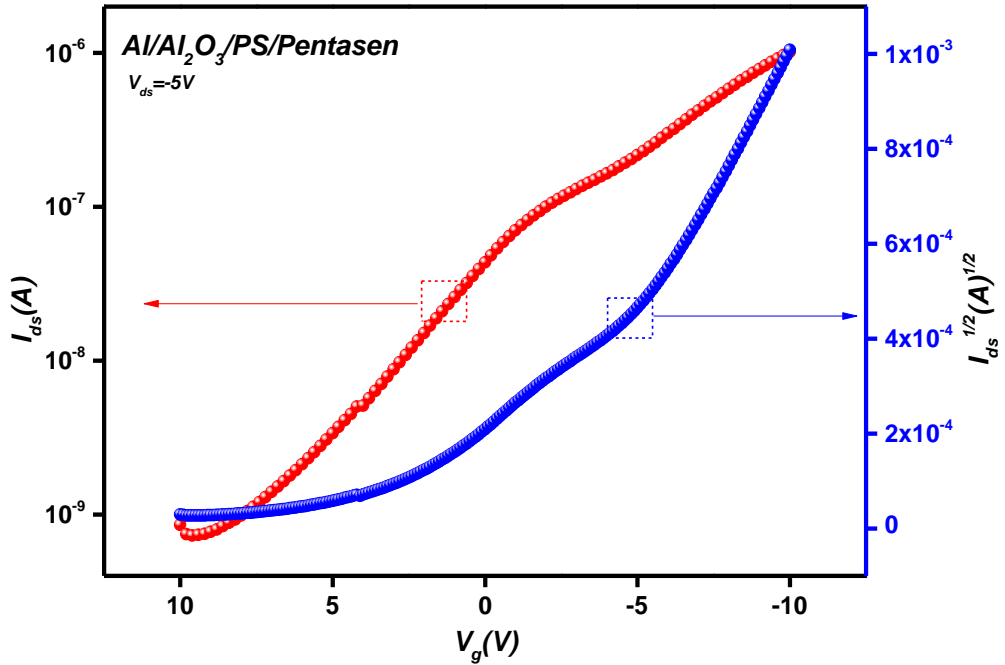
elektronik için önemli olan esnek alttaşlar üzerine büyütülebilmesi onun en önemli özelliklerinden bir tanesidir. OFET'lerin sızıntı akımı ve inorganik yalıtkan/organik yarıiletkenler arasındaki etkileşimden olumsuz etkilenmesinden dolayı, çok katmanlı dielektrik kapı yalıtkanları kullanılması oldukça önemlidir. Bu nedenle, OFET performansını arttırmak için inorganik/organik hibrid dielektrik tabakalar yoğun olarak incelenmektedir [198,199]. Bununla beraber yüzey fizikokimyasal özelliklerini değiştirmesi ve kolay bir işlem olması nedeniyle yüzeyin polimer ile kaplanması OFET performansı açısından faydalıdır [217]. Pürüzsüz yüzeylere ve düşük tuzak seviyelerine sahip polimer yalıtkanlar bu ara yüzeylerde etkili taşıyıcı iletimini sağlayabilmektedir. Aynı zamanda, inorganik yalıtkan tabaka üzerine ince bir polimer dielektrik tabakanın kaplanması sızıntı akımını azaltılabilmektedir. Bu nedenle metal oksit/polimer çift katmanlı kapı yalıtkanlarının kullanılması bu sorunların üstesinden gelmenin umut verici bir yoludur [200,201].

### 7.3.1. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PS/Pentaseen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri

Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PS/Pentaseen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri sırasıyla Şekil 7.17 ve Şekil 7.18'de gösterilmektedir. OFET'in çıkış karakteristiği farklı kapı voltajlarına ( $V_{gs}$ ) bağlı olarak kaynak-akaç akımının ( $I_{ds}$ ), kaynak-akaç voltajına ( $V_{ds}$ ) göre değişimini göstermektedir. OFET'in çalışma voltajı 0 ile -10V arasında olup -2V aralıklarla ve 0 ile -10V arasında kapı voltajı uygulanmıştır. OFET'in akaç akımı küçük akaç voltajlarında lineer ve akaç geriliminin kapı gerilimine yaklaştığı voltajlarda ise kanalın kısıtılması nedeniyle doygunluğa ulaşmaktadır. OFET'in akaç akımı negatif kapı voltajı ile artması kanalın p-tipi yapıda olduğunu göstermektedir. Anodik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'in kullanılması ile çalışma voltajının (0-10V) tek tabaka polimer yalıtkanlı OFET'lere göre daha düşük olduğu görülmektedir. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PS/Pentaseen OFET'inin mobilitesi, eşik voltajı ve açma/kapama oranı sırasıyla  $2,2 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , -0,38V ve  $1,4 \times 10^3$  olarak bulunmuştur. Negatif eşik voltajı OFET'in arttırma modunda çalıştığını göstermektedir. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PS/Pentaseen OFET'ine ait SS değeri 5,8 V/decade ve arayüzey yoğunluğu  $2,73 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  olarak hesaplanmıştır. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PS/Pentaseen OFET'inin bütün elektriksel parametrelerinin ITO/PS/Pentaseen OFET'e göre daha iyi olduğu görülmektedir.



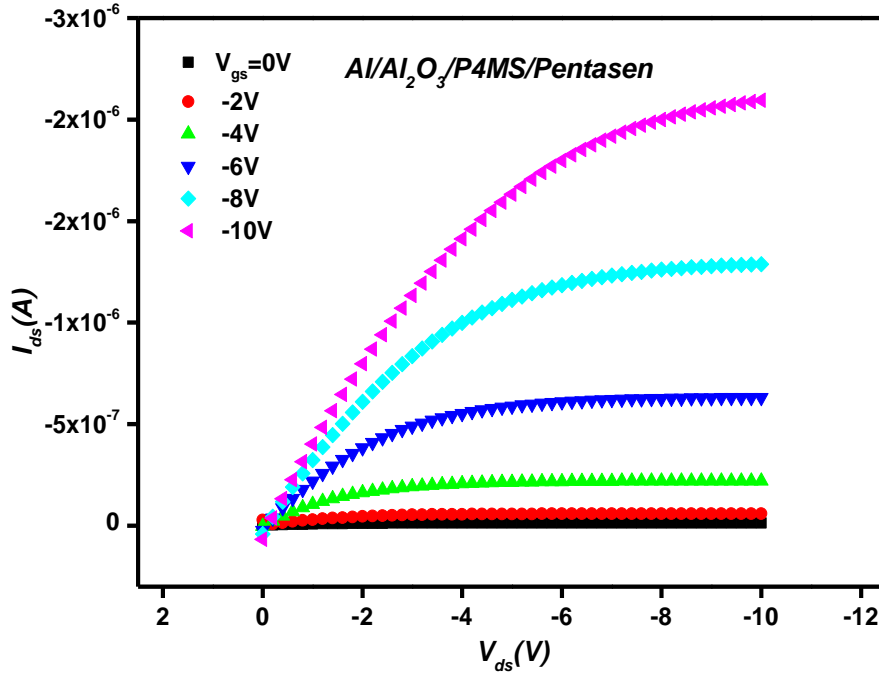
Şekil 7.17. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PS/Pentacene OFET'inin çıkış karakteristiği



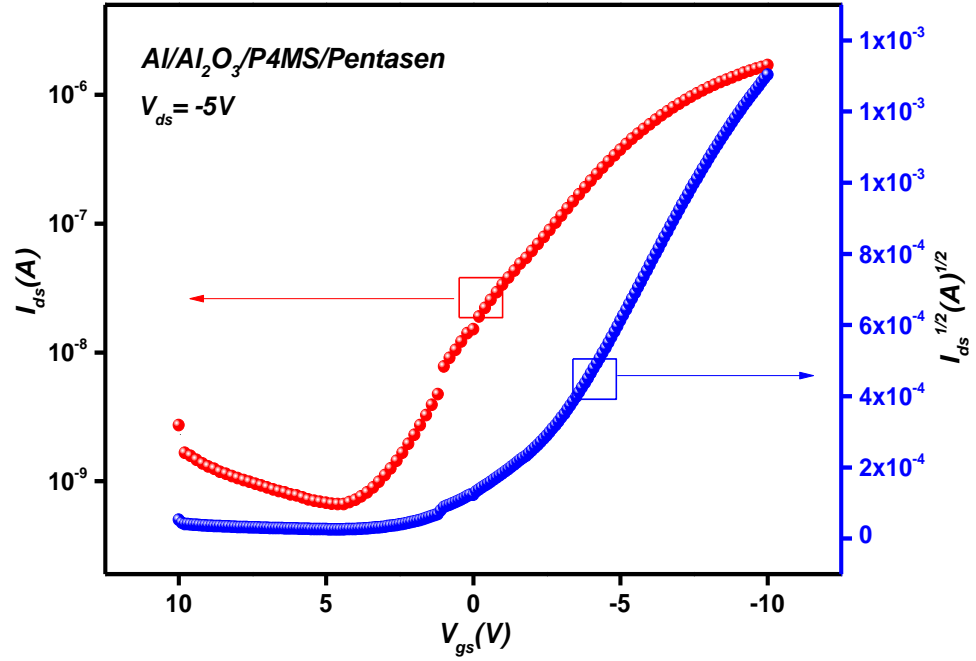
Şekil 7.18. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PS/Pentacene OFET'inin transfer karakteristiği

### 7.3.2. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/P4MS/Pentaseen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri

Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/P4MS/Pentaseen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri sırasıyla Şekil 7.19 ve Şekil 7.20'de gösterilmektedir. OFET'in çıkış karakteristiği farklı kapı voltajlarına ( $V_{gs}$ ) bağlı olarak kaynak-akaç akımının ( $I_{ds}$ ), kaynak-akaç voltajına ( $V_{ds}$ ) göre değişimini göstermektedir. OFET'in çalışma voltajı 0 ile -10V arasında olup -2V aralıklarla ve 0 ile -10V arasında kapı voltajı uygulanmıştır. OFET'in akaç akımı küçük akaç voltajlarında lineer ve akaç geriliminin kapı gerilimine yaklaştığı voltajlarda ise kanalın kısırılması nedeniyle doygunluğa ulaşmaktadır. OFET'in akaç akımı negatif kapı voltajı ile artması kanalın p-tipi yapıda olduğunu göstermektedir. Anodik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'in kullanılması ile çalışma voltajının (0-10V) tek tabaka polimer yalıtkanlı OFET'lere göre daha düşük olduğu görülmektedir. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/P4MS/Pentaseen OFET'inin mobilitesi, eşik voltajı ve açma/kapama oranı sırasıyla  $3,2 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , -1V ve  $2,5 \times 10^4$  olarak hesaplanmıştır. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/P4MS/Pentaseen OFET te arttırma modunda çalışmaktadır. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/P4MS /Pentaseen OFET'ine ait SS değeri 3,3 V/decade ve arayüzey yoğunluğu  $2,52 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  olarak hesaplanmıştır. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/P4MS/Pentaseen OFET'inin bütün elektriksel parametrelerinin ITO/P4MS/Pentaseen OFET'e göre daha iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 7.19. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/P4MS/Pentaseen OFET'inin çıkış karakteristiği

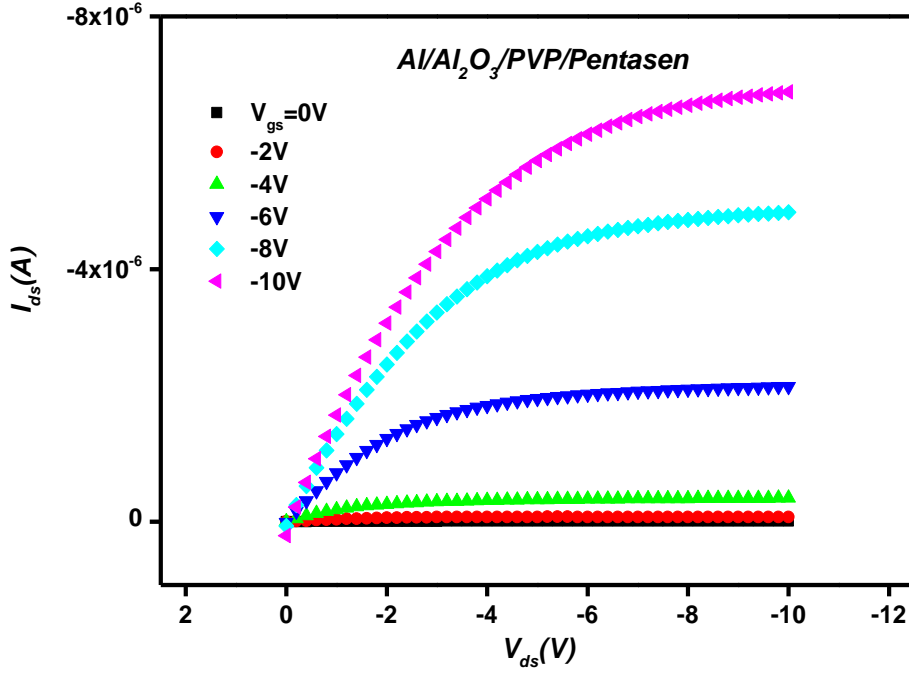


Şekil 7.20. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/P4MS/Pentaseen OFET'inin transfer karakteristiği

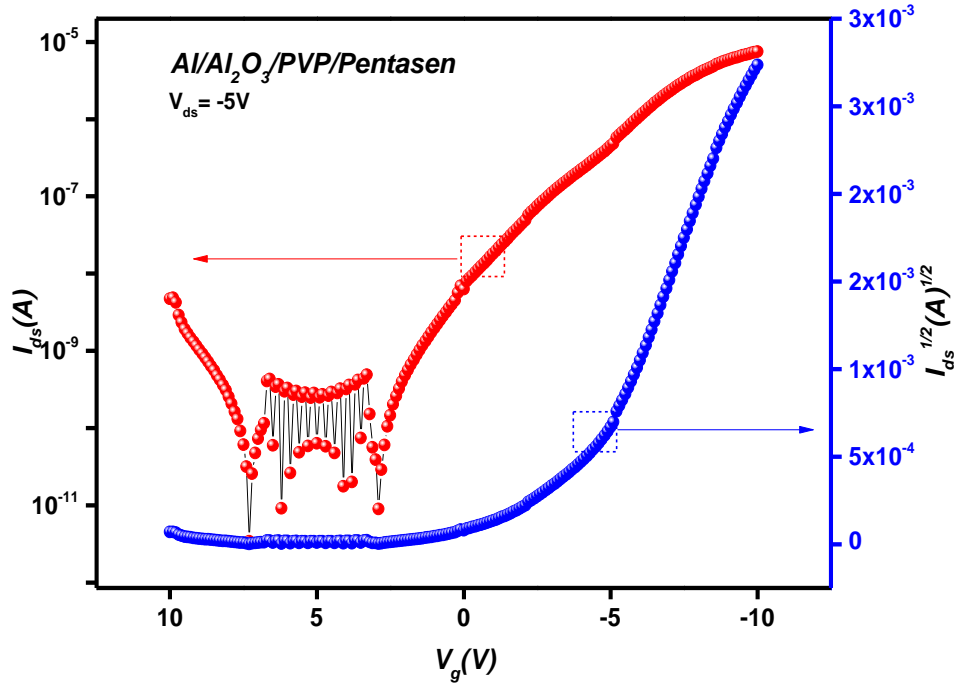
### 7.3.3. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP/Pentaseen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri

Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP/Pentaseen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri sırasıyla Şekil 7.21 ve Şekil 7.22'de gösterilmektedir. OFET'in çıkış karakteristiği farklı kapı voltajlarına ( $V_{gs}$ ) bağlı olarak kaynak-akaç akımının ( $I_{ds}$ ), kaynak-akaç voltajına ( $V_{ds}$ ) göre değişimini göstermektedir. OFET'in çalışma voltajı 0 ile -10V arasında olup -2V aralıklarla ve 0 ile -10V arasında kapı voltajı uygulanmıştır. OFET'in akaç akımı küçük akaç voltajlarında lineer ve akaç geriliminin kapı gerilimine yaklaştığı voltajlarda ise kanalın kısıtılması nedeniyle doygunluğa ulaşmaktadır. OFET'in akaç akımı negatif kapı voltajı ile artması kanalın p-tipi yapıda olduğunu göstermektedir. Anodik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'in kullanılması ile çalışma voltajının (0-10V) tek tabaka polimer yalıtkanlı OFET'lere göre daha düşük olduğu görülmektedir. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP/Pentaseen OFET'inin mobilitesi, eşik voltajı ve açma/kapama oranı sırasıyla  $0,65 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , -3,8V ve  $10^6$  olarak hesaplanmıştır. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP/Pentaseen OFET te arttırma modunda çalışmaktadır. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP/Pentaseen OFET'ine ait SS değeri 2,2 V/decade ve arayüzey yoğunluğu  $0,8 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  olarak hesaplanmıştır. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP/Pentaseen OFET'inin bütün

elektriksel parametrelerinin ITO/PVP/Pentasen OFET'e göre daha iyi olduğu görülmektedir.



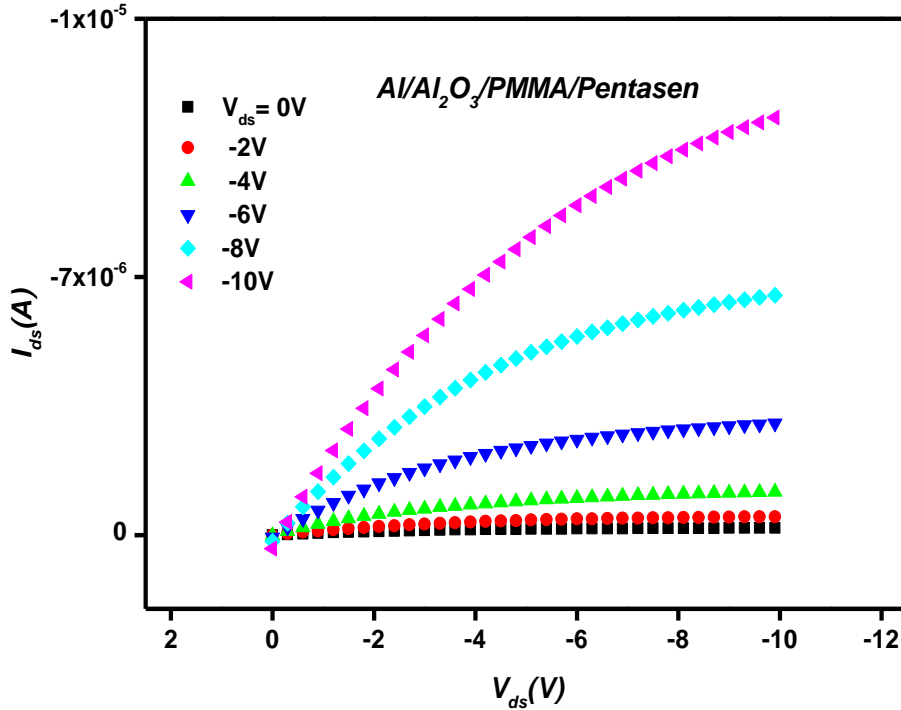
Şekil 7.21.  $Al/Al_2O_3/PVP/Pentasen$  OFET'inin çıkış karakteristiği



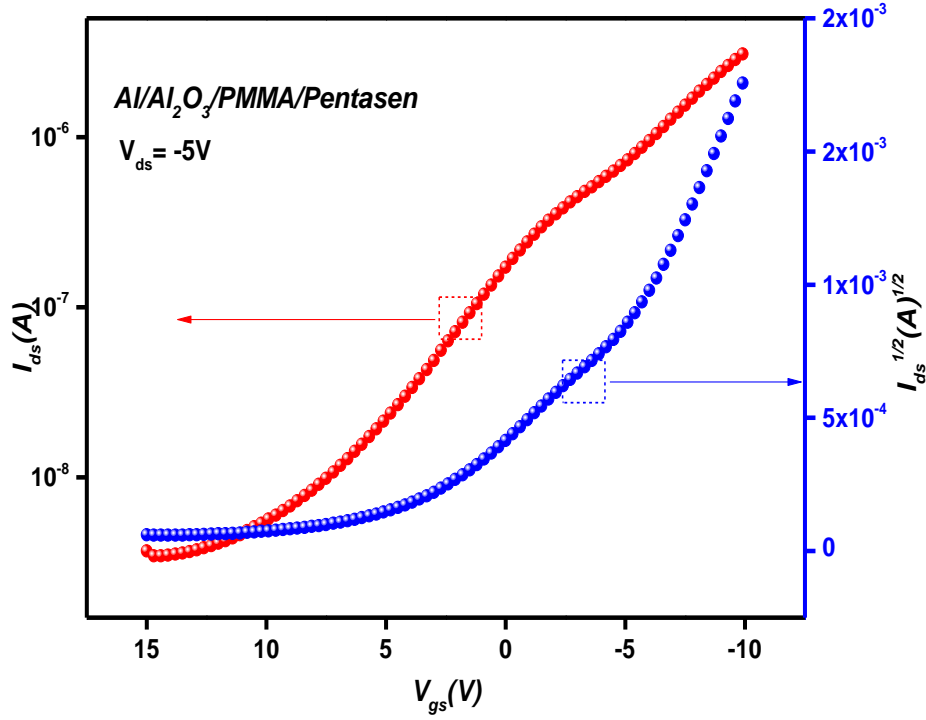
Şekil 7.22.  $Al/Al_2O_3/PVP/Pentasen$  OFET'inin transfer karakteristiği

### 7.3.4. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PMMA/Pentasen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri

Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PMMA/Pentasen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri sırasıyla Şekil 7.23 ve Şekil 7.24'de gösterilmektedir. OFET'in çıkış karakteristiği farklı kapı voltajlarına ( $V_{gs}$ ) bağlı olarak kaynak-akaç akımının ( $I_{ds}$ ), kaynak-akaç voltajına ( $V_{ds}$ ) göre değişimini göstermektedir. OFET'in çalışma voltajı 0 ile -10V arasında olup -2V aralıklarla ve 0 ile -10V arasında kapı voltajı uygulanmıştır. OFET'in akaç akımı küçük akaç voltajlarında lineer ve akaç geriliminin kapı gerilimine yaklaştığı voltajlarda ise kanalın kısıtılması nedeniyle doygunluğa ulaşmaktadır. OFET'in akaç akımı negatif kapı voltajı ile artması kanalın p-tipi yapıda olduğunu göstermektedir. Anodik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'in kullanılması ile çalışma voltajının (0-10V) tek tabaka polimer yalıtkanlı OFET'lere göre daha düşük olduğu görülmektedir. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PMMA/Pentasen OFET'inin mobilitesi, eşik voltajı ve açma/kapama oranı sırasıyla 0,14 cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>, -2V ve 2,3x10<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PMMA/Pentasen OFET te arttırma modunda çalışmaktadır. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PMMA/Pentasen OFET'ine ait SS değeri 5,4 V/decade ve arayüzey yoğunluğu 2,14x10<sup>13</sup> eV<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup> olarak hesaplanmıştır. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PMMA/Pentasen OFET'inin bütün elektriksel parametrelerinin ITO/PMMA/Pentasen OFET'e göre daha iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 7.23. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PMMA/Pentasen OFET'inin çıkış karakteristiği

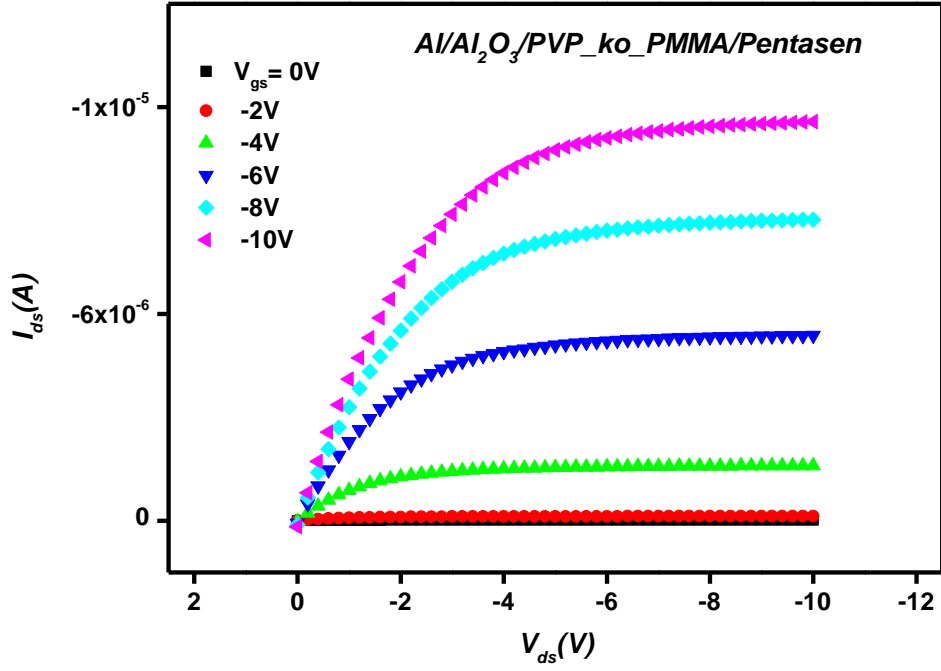


Şekil 7.24. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PMMA/Pentaseen OFET'inin transfer karakteristiği

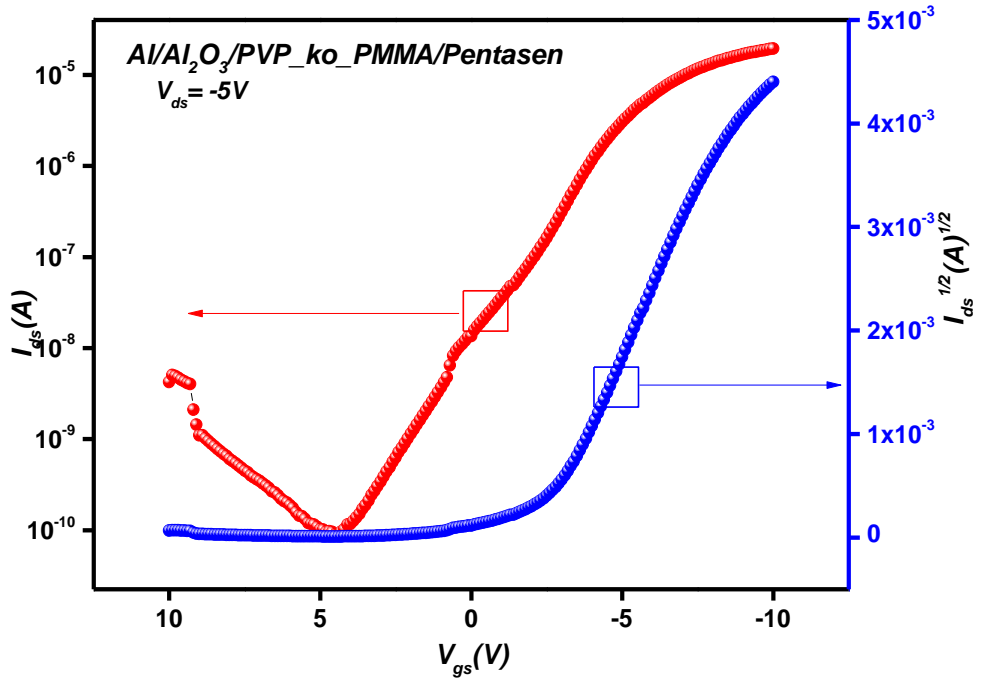
### 7.3.5. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP\_ko\_PMMA/Pentaseen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri

Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP\_ko\_PMMA/Pentaseen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri sırasıyla Şekil 7.25 ve Şekil 7.26'da gösterilmektedir. OFET'in çıkış karakteristiği farklı kapı voltajlarına ( $V_{gs}$ ) bağlı olarak kaynak-akaç akımının ( $I_{ds}$ ), kaynak-akaç voltajına ( $V_{ds}$ ) göre değişimini göstermektedir. OFET'in çalışma voltajı 0 ile -10V arasında olup -2V aralıklarla ve 0 ile -10V arasında kapı voltajı uygulanmıştır. OFET'in akaç akımı küçük akaç voltajlarında lineer ve akaç geriliminin kapı gerilimine yaklaştığı voltajlarda ise kanalın kısırılması nedeniyle doygunluğa ulaşmaktadır. OFET'in akaç akımı negatif kapı voltajı ile artması kanalın p-tipi yapıda olduğunu göstermektedir. Anodik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ün kullanılması ile çalışma voltajının (0-10V) tek tabaka polimer yalıtkanlı OFET'lere göre daha düşük olduğu görülmektedir. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP\_ko\_PMMA/Pentaseen OFET'inin mobilitesi, eşik voltajı ve açma/kapama oranı sırasıyla 0,52 cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>, -2,3V ve 2x10<sup>5</sup> olarak hesaplanmıştır. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP\_ko\_PMMA/Pentaseen OFET te arttırma modunda çalışmaktadır. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP\_ko\_PMMA/Pentaseen OFET'ine ait SS değeri 5,4 V/decade

ve arayüzey yoğunluğu  $2,14 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  olarak hesaplanmıştır. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP\_ko\_PMMA/Pentasen OFET'inin bütün elektriksel parametrelerinin ITO/PVP\_ko\_PMMA/Pentasen OFET'e göre daha iyi olduğu görülmektedir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/POLİMER ikili yalıtkan filmler ile hazırlanan OFET'lerin elektriksel parametreleri Çizelge 7.2'de verilmiştir. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP/Pentasen ve Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP\_ko\_PMMA/Pentasen OFET'lerinin mobiliteleri sırasıyla pentasen tabanlı tek tabaka PVP ( $0,45 \pm 0,06 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) ve PVP\_ko\_PMMA ( $0,37 \pm 0,03 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) OFET'lerinden daha yüksek değerlere sahiptir [218]. Choi ve ark. [219] CuPc, pentasen ve tetrasen aktif tabakalarını PVP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yalıtkanları üzerine büyüterek oluşturdukları OFET'lerden pentasen tabanlı OFET'te mobilitayı  $0,55 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  olarak hesaplamışlardır. Aynı zamanda Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP/Pentasen OFET'inin mobilitesi tek tabaka anodik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pentasen ( $\mu = 0,10 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) [220] ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PAMS/Pentasen ( $\mu = 0,51 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) [221] OFET'lerinin mobilitelerinden daha büyüktür. Zhang ve ark. [115] atomik tabaka büyütme metotları ile ürettikleri Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> üzerine spin kaplam yöntemi ile polistren, divinyltetramethyldisiloxane-bis(benzocyclobutene) ve octadecyl-trichlorosilane kaplayarak ikili yalıtkan tabakalar oluşturmuşlardır. Pentasen tabanlı bu ikili kapı yalıtkanları ile oluşturulan OFET'lerden elde edilen en yüksek performans  $0,64 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  mobilite, -3,39V eşik voltajı ve  $7,2 \times 10^5$  açma/kapama oranı ile Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/polistren kapı yalıtkanlı OFET'ten elde edilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda aktif katmanın yapısal ve morfolojik özelliklerinin OFET performansını doğrudan etkilediği rapor edilmiştir.



Şekil 7.25. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP\_ko\_PMMA/Pentaseen OFET'inin çıkış karakteristiği



Şekil 7.26. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP\_ko\_PMMA/Pentaseen OFET'inin transfer karakteristiği

**Çizelge 7.2.**  $Al_2O_3$ /Polimer İkili Tabaka Yalıtkan Filmler ile Hazırlanan OFET'lerin Elektriksel Parametreleri

OFET	$\mu$ ( $cm^2V^{-1}s^{-1}$ )	$V_{th}$ (V)	$I_{açma}/I_{kapama}$	SS (V/decade)	$N_{max}^{SS}$ ( $10^{13}eV^{-1}cm^{-2}$ )
<i>Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PS/Pentasen</i>	$2.2 \times 10^{-2}$	-0.38	$1.4 \times 10^3$	5.8	2.73
<i>Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/P4MS/Pentasen</i>	$3.2 \times 10^{-2}$	-1	$2.5 \times 10^4$	3.3	2.52
<i>Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP/Pentasen</i>	0.65	-3.8	$10^6$	2.2	0.8
<i>Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PMMA/Pentasen</i>	0.14	-2	$2.3 \times 10^3$	5.4	2.14
<i>Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP_ko_PMMA/Pentasen</i>	0.52	-2.3	$2 \times 10^5$	1.8	1.56

Çizelge 7.2'den en düşük  $N_{max}^{SS}$  değerinin  $Al_2O_3$ /PVP/Pentasen OFET'inden elde edildiği görülmektedir. Yüksek ve düşük  $N_{max}^{SS}$  değeri cihazın performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Yüksek tuzak yoğunluğu sızıntı akımını arttırması nedeniyle daha büyük alt eşik salınım değerine ve daha düşük açma/kapama oranına sebep olur. OFET'lerde tuzak yoğunluğunu azaltmak, cihaz performansını artırmak için arzu edilen bir yöntemdir. Aynı zamanda tuzak yoğunluğunda istenen azalma yarıiletken/yalıtkan arayüzeyinin kalitesinin arttığını ve kanalda daha iyi yük taşınımını açıklar [81,211]. Bu nedenle,  $Al/Al_2O_3$ /PVP/Pentasen OFET'inde gözlemlenen optimum performans, pentasen aktif tabaka ve PVP polimer dielektrik tabakası arasındaki en düşük tuzak yoğunluğuna atfedilebilir.

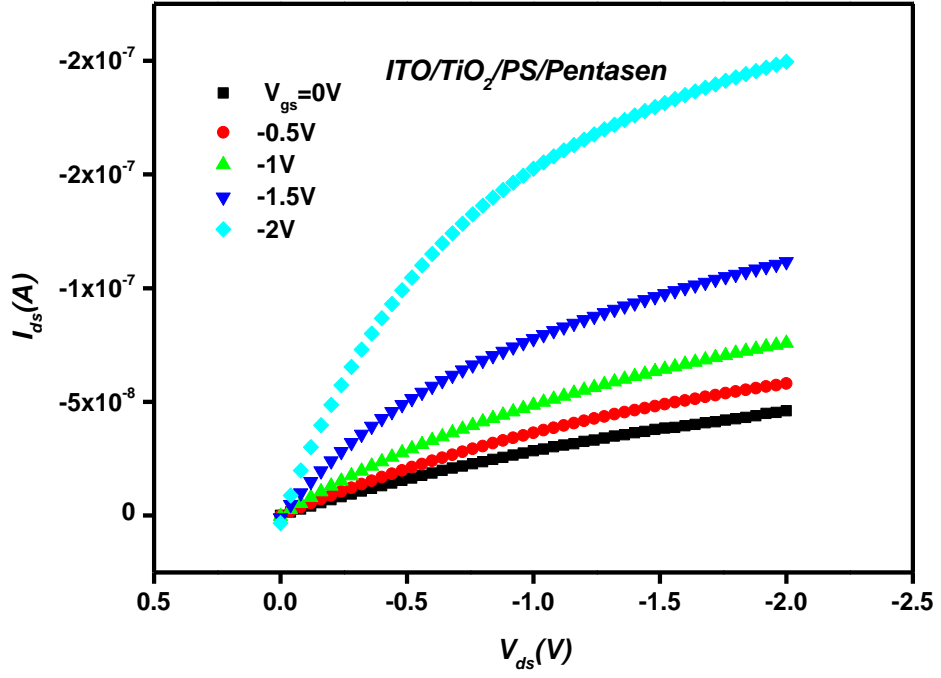
#### 7.4. $TiO_2$ /Polimer Çift Tabakalı Yalıtkanına Sahip OFET'lerin Elektriksel Ölçümleri

Kapı dielektriğinin yüzey morfolojisi, kristal yapısı, pürüzlülüğü ve dielektrik sabiti, OFET'lerin elektriksel performansını kuvvetli bir şekilde etkilemektedir. Organik yarıiletken/dielektrik arayüzeyi yük taşınmasını, dielektrik sabiti ise OFET'lerin çalışma voltajını kontrol etmektedir. Düşük voltaj OFET uygulaması için organik

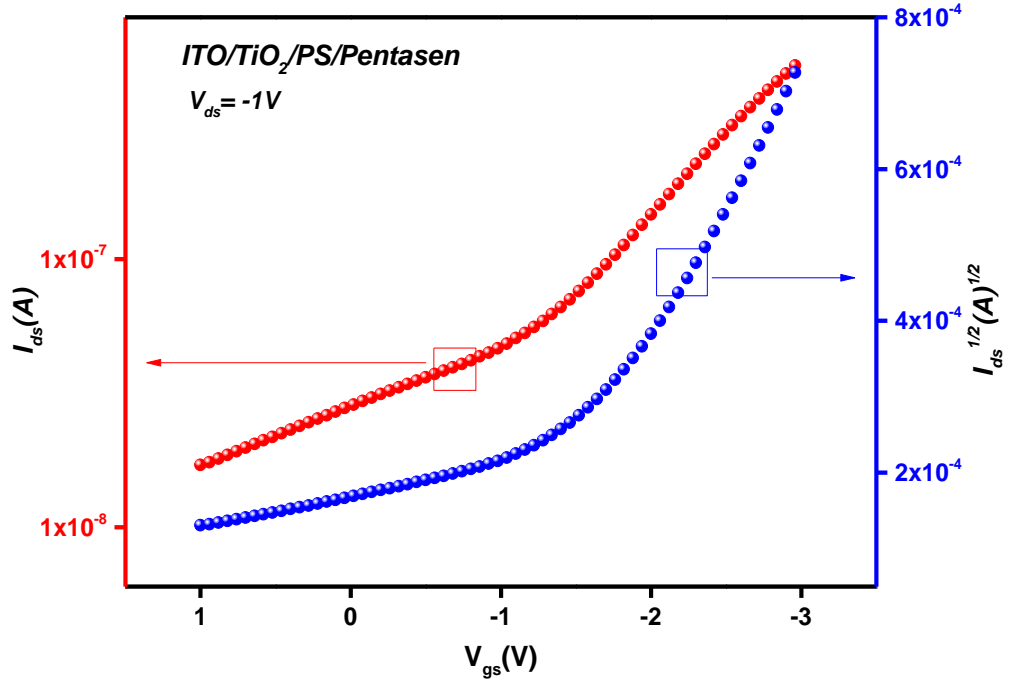
yarıiletken/dielektrik ara yüzündeki yük birikimi kapı dielektriğinin kapasitansının artırılması ile artırılabilir. OFET’lerde yüksek dielektrik sabitine sahip yalıtkanların kullanılması ve iletken kanal ile yalıtkan tabaka arasındaki ara yüzeyin pürüzsüzleştirilmesi alan etkili mobilitayı artırabilir [222-223]. Bununla beraber OFET’lerde çok yüksek dielektrik sabitine sahip yalıtkanların kullanılması çok yüksek polarizasyon nedeniyle organik yarıiletkenlerdeki yük taşıyıcı hareketliliğini kötüleştirebilmektedir [224]. Bu nedenle  $TiO_2$  gibi yüksek dielektrik sabitine sahip inorganik yalıtkanların daha düşük dielektrik sabitine sahip polimer yalıtkanlarla kaplanması yoğun bir şekilde çalışılmaktadır [225,226]. Bu kısımda sol jel spin kaplama yöntemi ile hazırlanan  $TiO_2$  yalıtkanların ince polimerlerle kaplanması ile oluşturulan kapı yalıtkanlarının OFET performansları üzerindeki etkisi incelenecektir.

#### **7.4.1. ITO/ $TiO_2$ /PS/Pentaseen OFET’inin çıkış ve transfer karakteristikleri**

ITO/ $TiO_2$ /PS/Pentaseen OFET’inin çıkış ve transfer karakteristikleri sırasıyla Şekil 7.27 ve Şekil 7.28’de gösterilmektedir. OFET’in çıkış karakteristiği farklı  $V_{gs}$  voltajlarına bağlı olarak  $I_{ds}$ ’nin  $V_{ds}$ ’ye göre değişimini göstermektedir.  $TiO_2$ /PS yalıtkan tabanlı OFET’in çalışma voltajı daha önce bahsedilen OFET’lere göre daha düşük olup 0 ile -2V arasında ölçülmüştür. OFET’in akaç akımı küçük akaç voltajlarında lineer ve akaç geriliminin kapı gerilimine yaklaştığı voltajlarda ise kanalın kısırılması nedeniyle hemen hemen doygunluğa ulaşmaktadır. ITO/ $TiO_2$ /PS/Pentaseen OFET’i p-tipi kanal yapısına sahip olup mobilitesi, eşik voltajı ve açma/kapama oranı sırasıyla  $0,18 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ , -0,9V ve 20 olarak hesaplanmıştır. Negatif eşik voltajı OFET’in arttırma modunda çalıştığını göstermektedir. ITO/ $TiO_2$ /PS/Pentaseen OFET’i için SS değeri 1,6 V/decade ve arayüzey yoğunluğu  $10^{11} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$  olarak hesaplanmıştır.



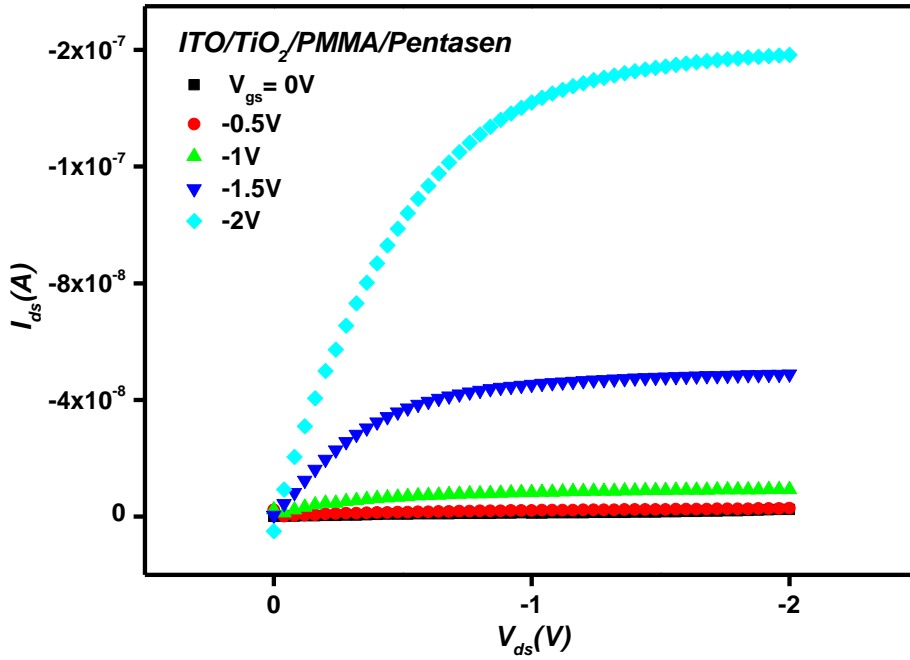
Şekil 7.27. ITO/TiO<sub>2</sub>/PS/Pentacene OFET'inin çıkış karakteristiği



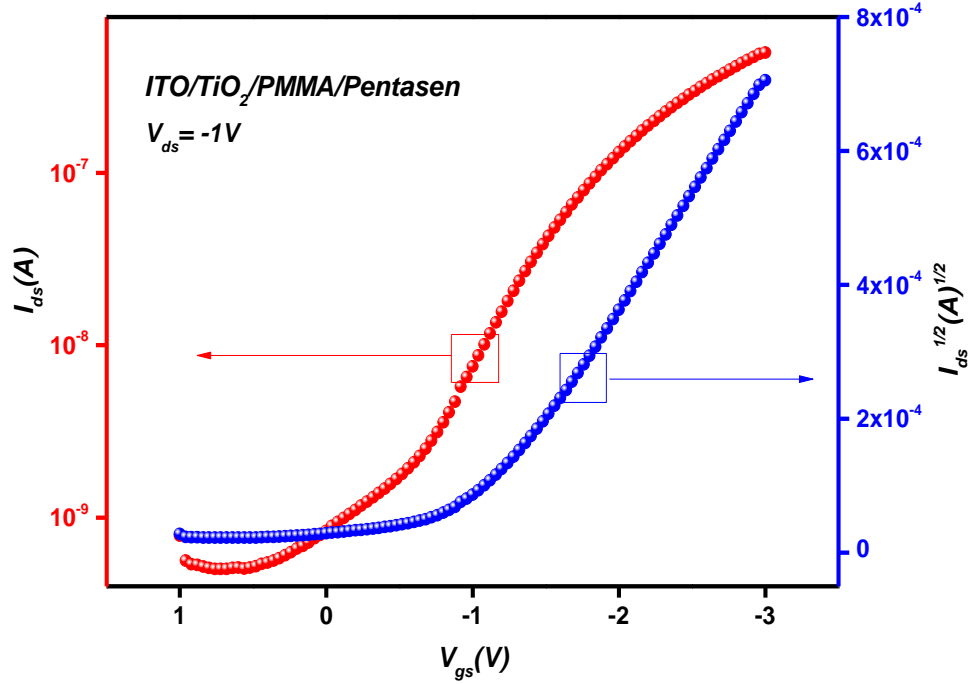
Şekil 7.28. ITO/TiO<sub>2</sub>/PS/Pentacene OFET'inin transfer karakteristiği

#### 7.4.2. ITO/TiO<sub>2</sub>/PMMA/Pentaseen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri

ITO/TiO<sub>2</sub>/PMMA/Pentaseen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri sırasıyla Şekil 7.29 ve Şekil 7.30'da gösterilmektedir. OFET'in çıkış karakteristiği farklı  $V_{gs}$  voltajlarına bağlı olarak  $I_{ds}$ 'nin  $V_{ds}$ 'ye göre değişimini göstermektedir. TiO<sub>2</sub>/PMMA yalıtkan tabanlı OFET'in çalışma voltajı da düşük olup 0 ile -2V arasında ölçülmüştür. OFET'in akaç akımı küçük akaç voltajlarında lineer ve akaç geriliminin kapı gerilimine yaklaştığı voltajlarda ise kanalın kısırılması nedeniyle doygunluğa ulaşmaktadır. ITO/TiO<sub>2</sub>/PMMA/Pentaseen OFET'i p-tipi kanal yapısına sahip olup mobilitesi, eşik voltajı ve açma/kapama oranı sırasıyla  $0,13 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ , -0,9V ve  $10^3$  olarak hesaplanmıştır. Negatif eşik voltajı OFET'in arttırma modunda çalıştığını göstermektedir. ITO/TiO<sub>2</sub>/PMMA/Pentaseen OFET'i için SS değeri 0,67 V/decade ve arayüzey yoğunluğu  $2,3 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$  olarak hesaplanmıştır.



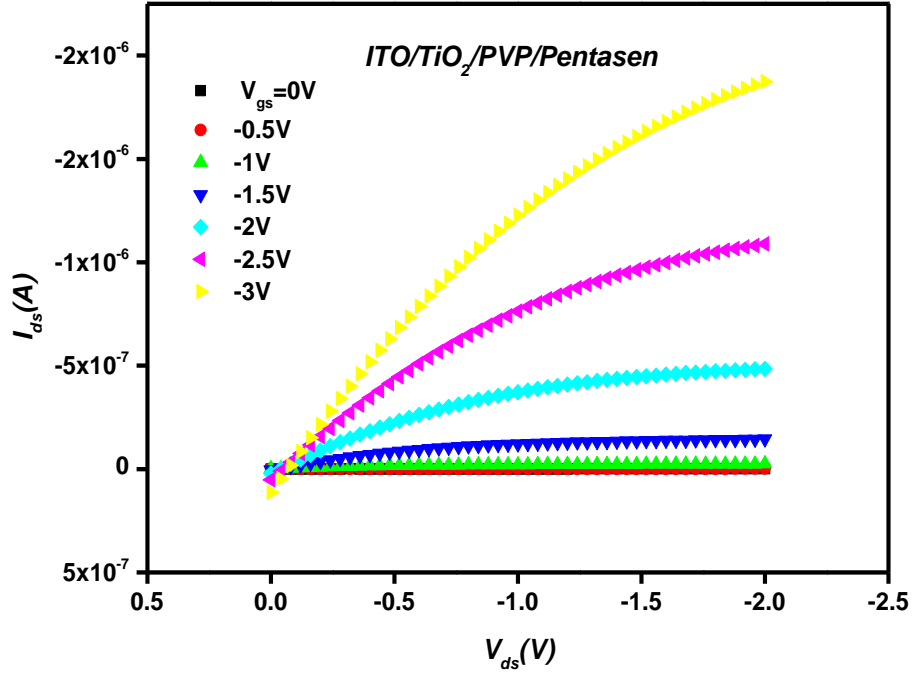
Şekil 7.29. ITO/TiO<sub>2</sub>/PMMA/Pentaseen OFET'inin çıkış karakteristiği



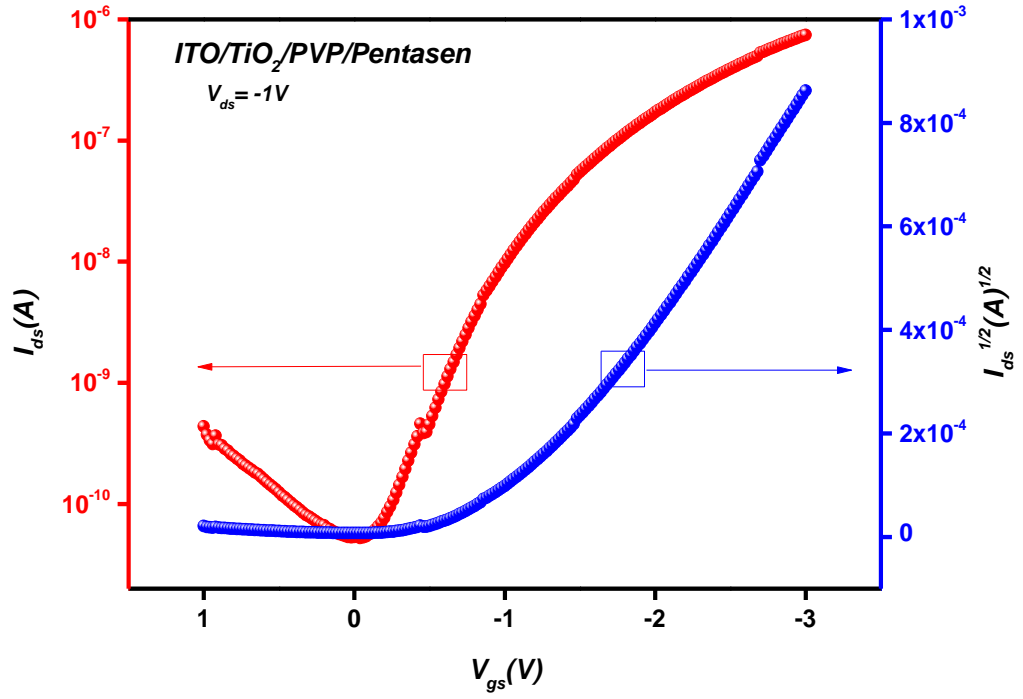
Şekil 7.30. ITO/TiO<sub>2</sub>/PMMA/Pentaseen OFET'inin transfer karakteristiği

#### 7.4.3. ITO/TiO<sub>2</sub>/PVP/Pentaseen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri

ITO/TiO<sub>2</sub>/PVP/Pentaseen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri sırasıyla Şekil 7.31 ve Şekil 7.32'de gösterilmektedir. OFET'in çıkış karakteristiği farklı  $V_{gs}$  voltajlarına bağlı olarak  $I_{ds}$ 'nin  $V_{ds}$ 'ye göre değişimini göstermektedir. TiO<sub>2</sub>/PVP yalıtkan tabanlı OFET'in çalışma voltajı TiO<sub>2</sub>/polimer tabanlı diğer OFET'lerin çalışma voltajından biraz daha yüksek olup 0 ile -3V arasında ölçülmüştür. OFET'in akaç akımı küçük akaç voltajlarında lineer ve akaç geriliminin kapı gerilimine yaklaştığı voltajlarda ise kanalın kısıtılması nedeniyle hemen hemen doygunluğa ulaşmaktadır. ITO/TiO<sub>2</sub>/PVP/Pentaseen OFET'i p-tipi kanal yapısına sahip olup mobilitesi, eşik voltajı ve açma/kapama oranı sırasıyla 0,24 cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>, -1V ve 10<sup>4</sup> olarak hesaplanmıştır. Negatif eşik voltajı OFET'in artırma modunda çalıştığını göstermektedir. ITO/TiO<sub>2</sub>/PVP/Pentaseen OFET'i için SS değeri 0,31 V/decade ve arayüzey yoğunluğu 2x10<sup>12</sup> eV<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup> olarak hesaplanmıştır.



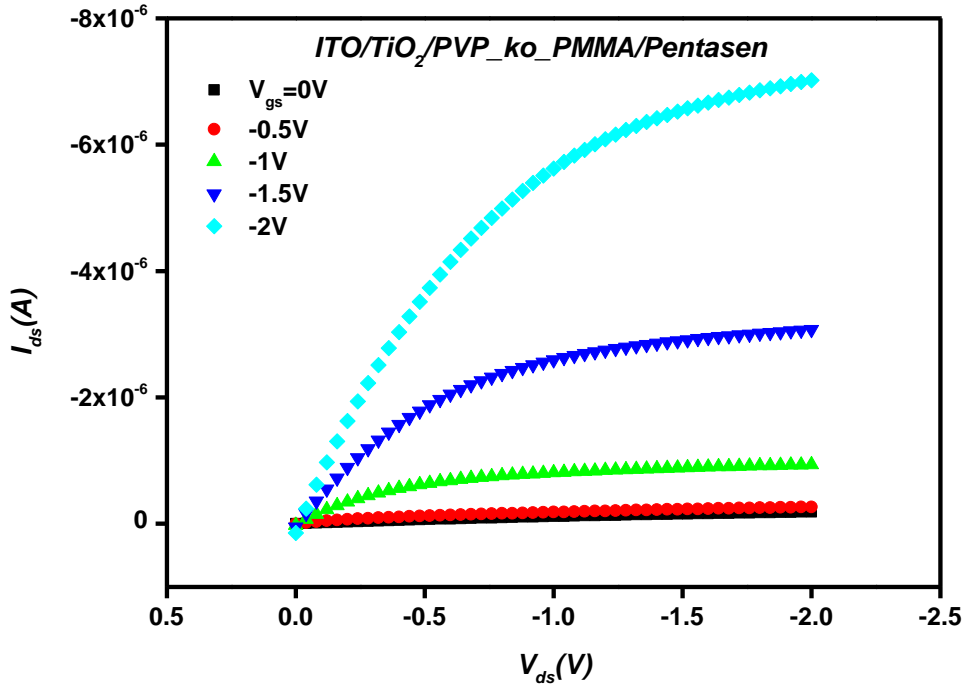
Şekil 7.31. ITO/TiO<sub>2</sub>/PVP/Pentaseen OFET'inin çıkış karakteristiği



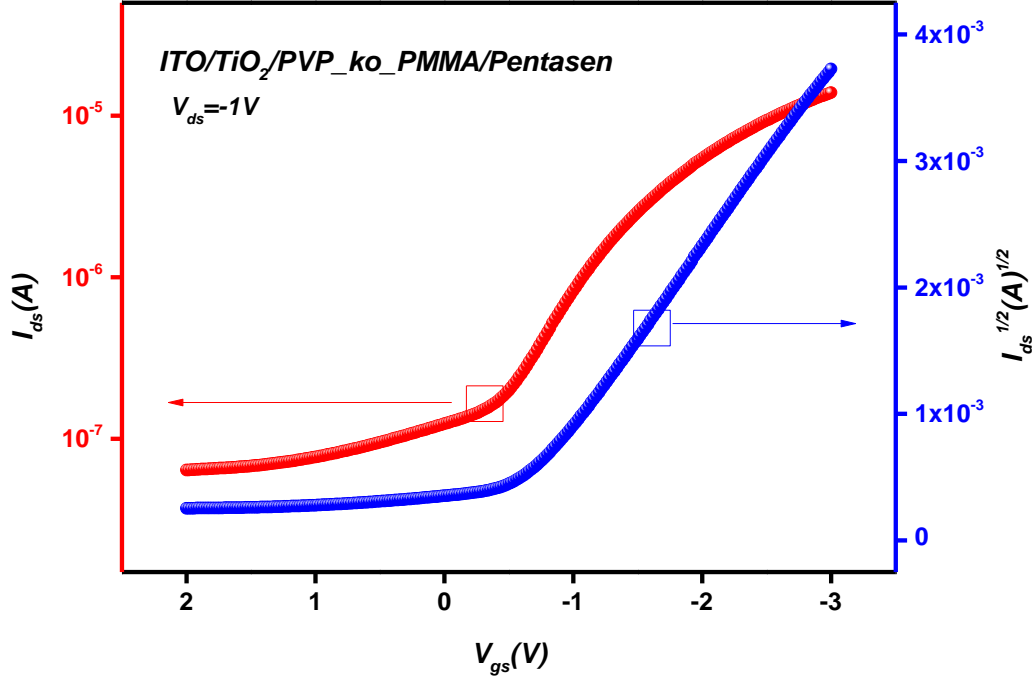
Şekil 7.32. ITO/TiO<sub>2</sub>/PVP/Pentaseen OFET'inin transfer karakteristiği

#### 7.4.4. ITO/TiO<sub>2</sub>/PVP\_ko\_PMMA/Pentasen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri

ITO/TiO<sub>2</sub>/PVP\_ko\_PMMA/Pentasen OFET'inin çıkış ve transfer karakteristikleri sırasıyla Şekil 7.33 ve Şekil 7.34'te gösterilmektedir. OFET'in çıkış karakteristiği farklı  $V_{gs}$  voltajlarına bağlı olarak  $I_{ds}$ 'nin  $V_{ds}$ 'ye göre değişimini göstermektedir. TiO<sub>2</sub>/PVP\_ko\_PMMA yalıtkan tabanlı OFET'in çalışma voltajı da düşük olup 0 ile -2V arasında ölçülmüştür. OFET'in akaç akımı küçük akaç voltajlarında lineer ve akaç geriliminin kapı gerilimine yaklaştığı voltajlarda ise kanalın kısırılması nedeniyle doygunluğa ulaşmaktadır. ITO/TiO<sub>2</sub>/PVP\_ko\_PMMA/Pentasen OFET'i p-tipi kanal yapısına sahip olup mobilitesi, eşik voltajı ve açma/kapama oranı sırasıyla  $0,92 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ , -0,4V ve  $2 \times 10^2$  olarak hesaplanmıştır. Negatif eşik voltajı OFET'in arttırma modunda çalıştığını göstermektedir. ITO/TiO<sub>2</sub>/PVP\_ko\_PMMA/Pentasen OFET'i için SS değeri 0,75 V/decade ve arayüzey yoğunluğu  $1,6 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$  olarak hesaplanmıştır. TiO<sub>2</sub>/Polimer ikili yalıtkan filmler ile hazırlanan OFET'lerin elektriksel parametreleri Çizelge 7.3'te verilmiştir.



Şekil 7.33. ITO/TiO<sub>2</sub>/PVP\_ko\_PMMA/Pentasen OFET'inin çıkış karakteristiği



Şekil 7.34. ITO/TiO<sub>2</sub>/PVP\_ko\_PMMA/Pentaseen OFET'inin transfer karakteristiği

Çizelge 7.3. TiO<sub>2</sub>/Polimer İkili Tabaka Yalıtkan Filmler ile Hazırlanan OFET'lerin Elektriksel Parametreleri

OFET	$\mu$ (cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	V <sub>th</sub> (V)	I <sub>açma</sub> /I <sub>kapama</sub>	SS (V/dec ade)	N <sub>max</sub> <sup>SS</sup> (10 <sup>13</sup> eV <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup> )
ITO/TiO <sub>2</sub> /PS/Pentaseen	0,18	-0,9	20	1,6	0,01
ITO/TiO <sub>2</sub> /PMMA/Pentaseen	0,13	-0,9	10 <sup>3</sup>	0,67	0,02
ITO/TiO <sub>2</sub> /PVP/Pentaseen	0,24	-1	10 <sup>4</sup>	0,31	0,2
ITO/TiO <sub>2</sub> /PVP_ko_PMMA/Pentaseen	0,92	-0,4	2x10 <sup>2</sup>	0,75	1,6

TiO<sub>2</sub>/polimer yalıtkan tabanlı üretilen OFET'lerin çıkış karakteristikleri incelendiğinde sol jel spin kaplama yöntemi ile hazırlanan TiO<sub>2</sub>'in ikili yalıtkan katmanda

kullanılması ile çalışma voltajlarının azaldığı görülmektedir. Burada çalışma voltajındaki azalmanın sebebi Şekil.7.3'ten de anlaşılacağı üzere yüksek dielektrik sabitli  $TiO_2$ 'in kullanılmasıyla ikili kapı yalıtkanında yükselen kapasitans değerinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, düşük dielektrik sabitine sahip polimerin ikinci tabaka olarak kullanılmasıyla  $TiO_2$ 'den kaynaklı hem enerjiktik düzensizlikler minimize edilmekte, hem de negatif dipol etkiler perdelemektedir. Bu yöntemle OFET'in akım geçidi histerizisini ortadan kaldırmak için taşıyıcı lokalizasyonu azaltılarak mobilite değeri korunmaktadır [227]. Bu strateji, düşük voltajlı ve yüksek performanslı OFET'lerin üretimi için faydalı olmaktadır.  $TiO_2$ /Polimer tabanlı üretilen OFET'lerde en yüksek mobilite  $TiO_2$ /PVP\_ko\_PMMA/Pentasen OFET'inden elde edilirken, en yüksek açma/kapama oranı ise  $TiO_2$ /PVP/Pentasen OFET'inden elde edilmiştir.  $TiO_2$ /Polimer tabanlı OFET'lerin SS değerlerinin, daha önce üretilen tek tabaka polimer ve  $Al_2O_3$ /Polimer yalıtkan tabanlı OFET'lere göre çok daha düşük olduğu görülmektedir. Bu da transistörlerin aktif tabakasında bulunan iletken kanala yakın bölgede sığ tuzak seviyelerinin oldukça azaldığını göstermektedir [206].  $TiO_2$ /Polimer tabanlı OFET'lerin elektriksel parametreleri incelendiğinde, daha önce üretilen tek tabaka polimer ve ikili tabaka  $Al_2O_3$ /Polimer yalıtkan tabanlı OFET'lerden daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Dolayısıyla düşük çalışma voltajına ve yüksek elektriksel performansa sahip OFET'lerin üretimi için ikili  $TiO_2$ /Polimer kapı yalıtkan tabakaları umut verici malzemeler olarak görülmektedir.

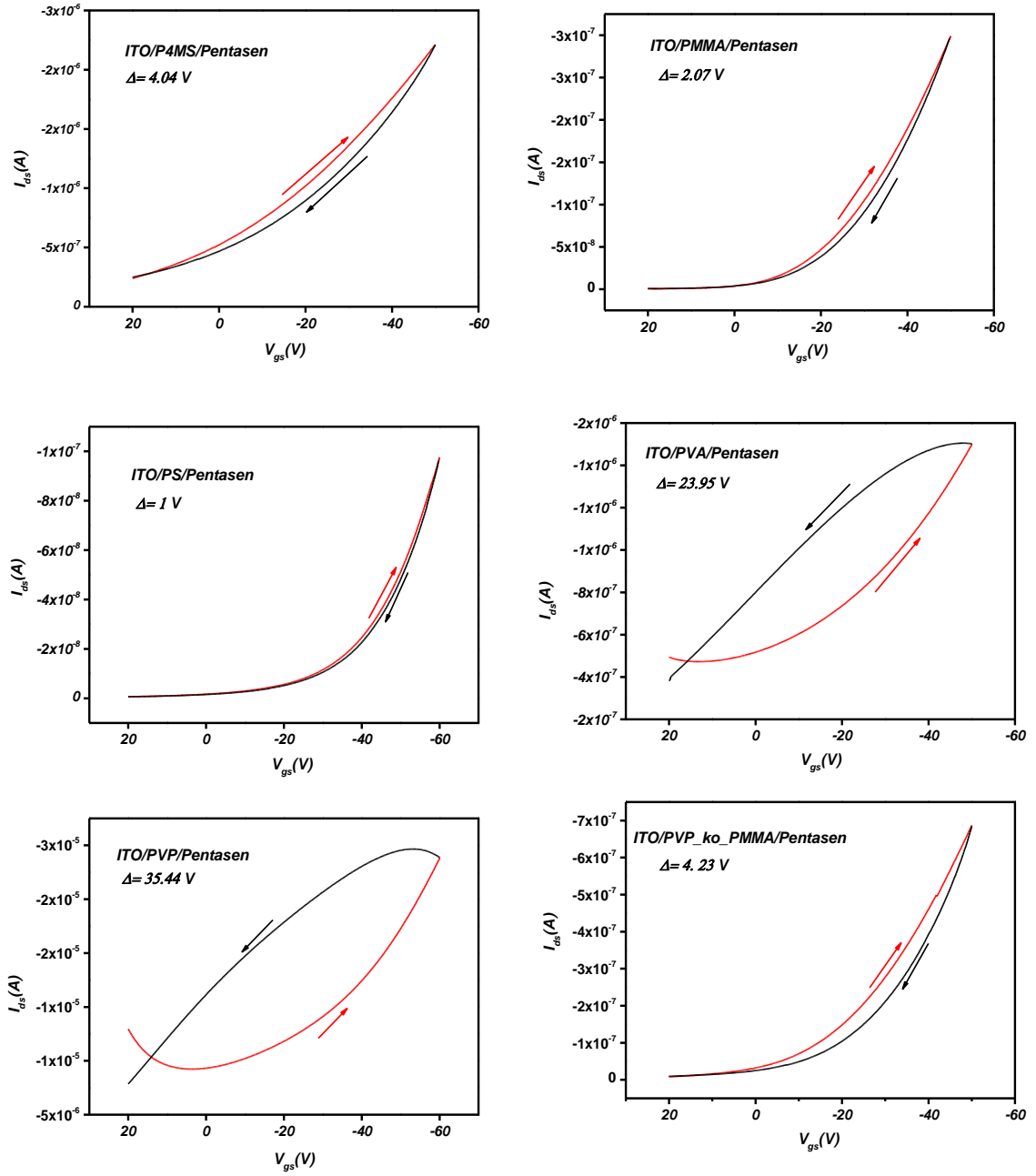
## 7.5. Üretilen OFET'lerin Histeresis Mekanizmaları

Üretilen OFET'lerin kararlılığı OFET'lerin elektriksel performansı kadar önemlidir. Bu nedenle ürettiğimiz OFET'lerin histeresis davranışları geleneksel transfer karakteristiği yardımıyla incelenmiştir. Histeresis mekanizması, kalıcı ve dinamik histeresis olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Kalıcı histeresiste eşik gerilimi önemli ölçüde değişmezken, dinamik histeresiste değişim çok büyük olmaktadır. Bu nedenle dinamik histeresis OFET'lerin tasarımında ve kararlılığında büyük bir problem oluşturmaktadır [5,228]. OFET'lerde oluşan histeresis farklı mekanizmalardan kaynaklanabilmektedir. Bu histeresis mekanizmaları; kanal ve kanal ile yalıtkan ara yüzeyindeki taşıyıcı yüklerin etkisi, kapı yalıtkanının geç polarize olma etkisi ve yüklerin kapı kontağından yalıtkan tabaka içine akma etkisi olarak sıralanabilir [229].

OFET'lerdeki histeresis transfer karakteristiğindeki geriye doğru süpürme akımı (BSC) ve ileriye doğru süpürme akımının (FSC) birbirine göre büyüklüğü ile açıklanabilir. p-tipi çalışma karakteristiğine sahip OFET'lerde BSC'nin FSC'den büyük olması durumunda histerizin doğrultusu saat yönünün tersinedir. Saat yönünün tersine olan bu histeriz kapı yalıtkanı içindeki mobil iyonlarına veya kapı yalıtkanının polarizasyonuna (ferro-elektrik etki) atfedilir [230,231]. Bununla birlikte saatin tersi yönündeki histeriz kapı kontağından kapı yalıtkanına elektron enjeksiyonuyla da gerçekleşebilmektedir [232]. Yine p-tipi çalışma karakteristiğine sahip OFET'lerde BSC'nin FSC'den küçük olması halinde ise saat yönü doğrultusunda histeriz oluşmakta ve bu doğrultudaki histeriz de çoğunlukla iletken kanala yakın yük taşıyıcıların tuzaklanmasına atfedilmektedir [205,233,234].

#### **7.5.1. Tek tabaka polimer yalıtkanına sahip ofet'lerin histeresis mekanizmaları**

Şekil 7.35'te tek tabaka polimer yalıtkanına sahip OFET'lerin transfer karakteristiğine bağlı histeriz grafikleri gösterilmektedir. Sırasıyla PS, PMMA, P4MS, PVP, PVA ve PVP\_ko\_PMMA yalıtkan tabanlı OFET'ler için anahtarlama voltajları [231,235] arasındaki gerilim farkı ( $\Delta$ ) sırasıyla 1V, 2,07V, 4,04V, 35,44V, 23,95V ve 4,23V olarak bulunmuştur. PS, PMMA, P4MS ve PVP\_ko\_PMMA yalıtkan tabanlı OFET'lerde saatin yönü doğrultusunda histeriz oluşurken, PVP ve PVA tabanlı OFET'lerde ise saatin tersi yönünde histeriz oluştuğu görülmektedir. Kısım 7.5'te açıklandığı gibi saatin tersi yönünde histeriz yalıtkan içindeki mobil iyonları, yalıtkanının polarizasyonu veya kapı kontağından kapı yalıtkanına elektron enjeksiyonuna atfedilmektedir. PS, PMMA, P4MS ve PVP\_ko\_PMMA yalıtkan tabanlı OFET'lerde görülen saatin yönündeki histeriz ise iletken kanala yakın yük taşıyıcıların tuzaklanmasına atfedilmektedir.

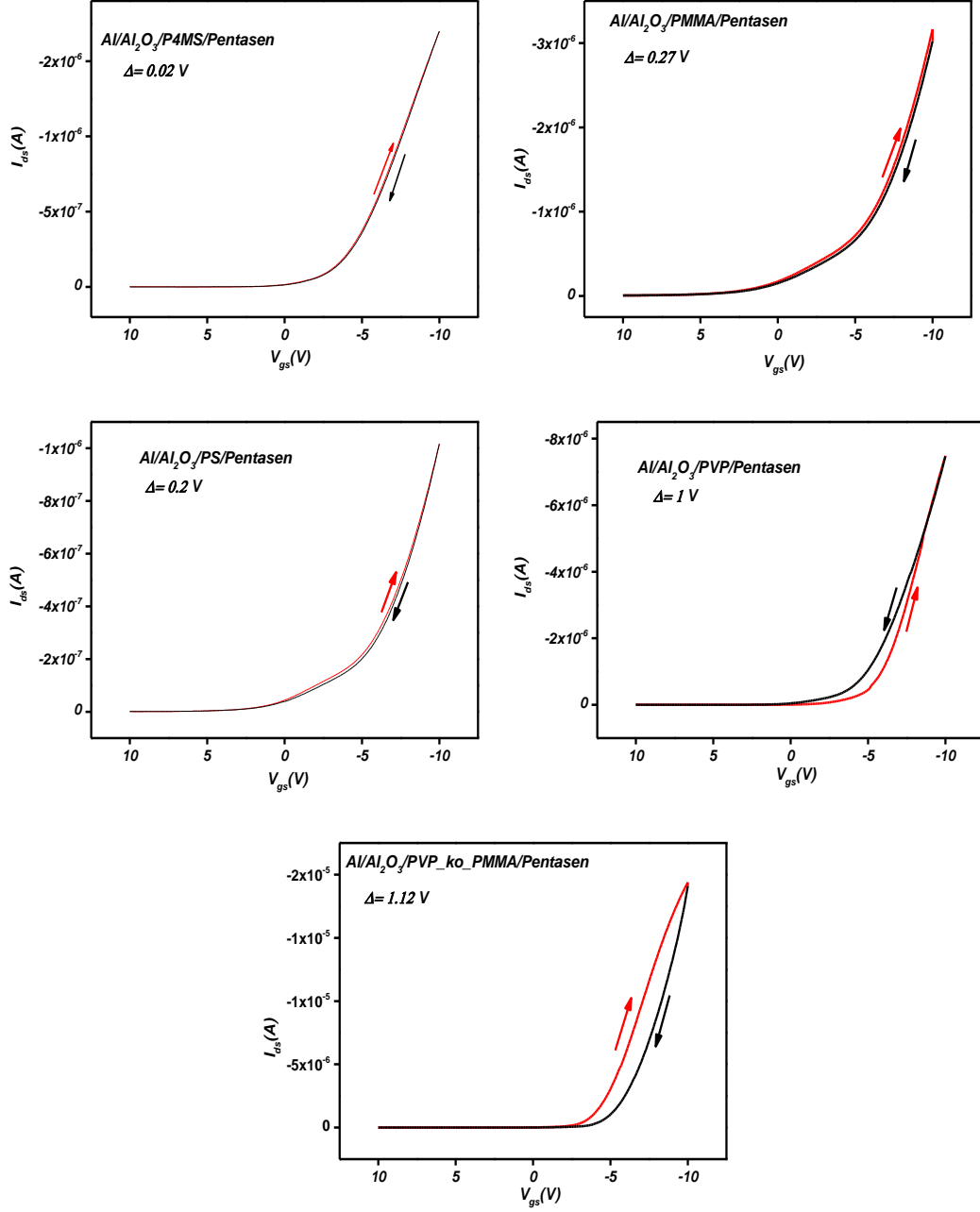


**Şekil 7.35.** Tek tabaka polimer yalıtkanına sahip OFET'lerin histeresis grafikleri

PVP ve PVA yalıtkan tabanlı OFET'ler, üretilen diğer OFET'lere göre daha yüksek histeriz göstermektedir. Yüksek histerize sahip OFET'ler kalıcı bellek (nonvolatile memory) uygulamalarında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır [236,237]. Fakat yüksek histeriz mantık devre uygulamalarında problem oluşturabilmektedir [238].

### **7.5.2. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/polimer çift tabakalı yalıtkanına sahip ofet'lerin histeresis mekanizmaları**

Şekil 7.36'da Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Polimer çift tabakalı yalıtkanına sahip OFET'lerin transfer karakteristiğine bağlı histeriz grafikleri gösterilmektedir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inorganik yalıtkanının OFET'lerde kullanılması ile histeriz'in oldukça düştüğü BSC ve FSC akımları arasındaki farktan anlaşılmaktadır. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PS, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/P4MS, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PMMA ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP\_ko\_PMMA yalıtkan tabanlı OFET'ler için  $\Delta$  değerleri sırasıyla 0,2V, 0,02V, 1V, 0,27V ve 1,12V olarak bulunmuştur. Bu OFET'lerden sadece Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP yalıtkanlı OFET saatin tersi yönünde histeriz gösterirken, diğer OFET'ler saat yönünde histeriz göstermektedirler. Kısım 7.5.1'deki histeriz kaynağı ile ilgili açıklamalar bu kısım içinde geçerlidir.

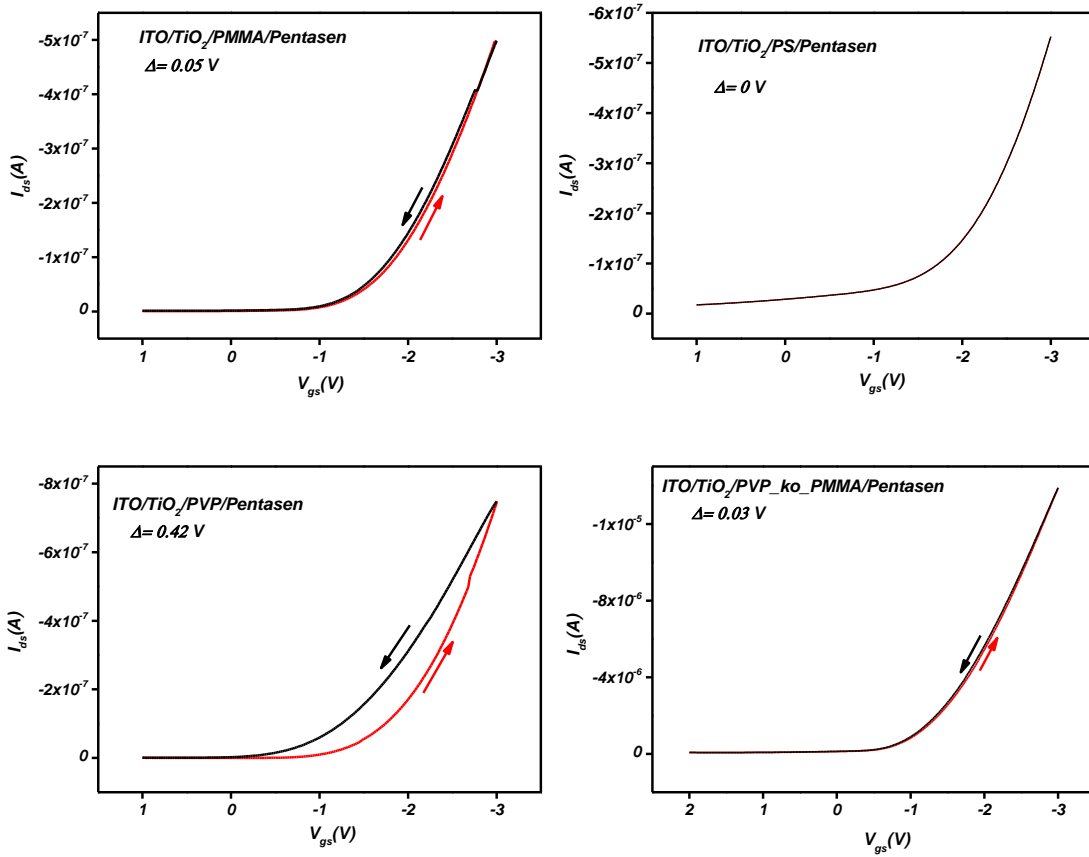


Şekil 7.36.  $Al_2O_3$ /polimer çift tabakalı yalıtkanına sahip OFET'lerin histeresis grafikleri

### 7.5.3. $TiO_2$ /polimer çift tabakalı yalıtkanına sahip ofet'lerin histeresis mekanizmaları

Şekil 7.37'de  $TiO_2$ /Polimer çift tabakalı yalıtkanına sahip OFET'lerin transfer karakteristiğine bağlı histeriz grafikleri gösterilmektedir.  $TiO_2$  inorganik yalıtkanının OFET'lerde kullanılması ile histeriz'in hem  $Al_2O_3$ 'ün kullanıldığı hem de tek tabaka

polimerlerin kullanıldığı OFET'lere göre çok daha fazla düştüğü görülmektedir. TiO<sub>2</sub>/PMMA, TiO<sub>2</sub>/PVP ve TiO<sub>2</sub>/PVP\_ko\_PMMA yalıtkan tabanlı OFET'ler için  $\Delta$  değerleri sırasıyla 0,05V, 0,42V ve 0,03V olarak bulunmuştur. TiO<sub>2</sub>/PS yalıtkan tabanlı OFET'in transfer karakteristiğinde ise histeriz oluşmamıştır. Histeriz'in az da olsa oluştuğu OFET'lerden sadece TiO<sub>2</sub>/PVP yalıtkanlı OFET saatin tersi yönünde histeriz gösterirken, diğer OFET'ler saat yönünde histeriz göstermektedirler. Kısım 7.5.1'deki histeriz kaynağı ile ilgili açıklamalar bu kısım içinde geçerlidir.



**Şekil 7.37.** TiO<sub>2</sub>/polimer çift tabakalı yalıtkanına sahip OFET'lerin histeresis grafikleri

## 7.6. Işığa Duyarlı OFET Çalışmaları

Işığa duyarlı OFET'ler, barkod tarayıcılar, güvenlik görüntü sistemleri, HD kameralar gibi çeşitli elektronik ekipmanların geliştirilmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Fotodiyotlar ve CCD-algılayıcı (Yüklenme İliştirilmiş Araçlar) cihazlarda kullanılan optik sensörlerin çoğu iyi performans gösteren inorganik yarıiletkenlerden

oluşur. Ancak yüksek üretim maliyetleri, yüksek güç tüketimleri ve düşük esneklikleri nedeniyle yeni nesil ve giyilebilir elektronik uygulamalar için inorganik yarıiletken malzemelere olan talep azalmaktadır. İdeal bir optik sensör için cihazın düşük maliyetli olması, istenilen alttaş üzerinde oluşturulabilmesi ve çok yönlü kullanıma uygun olması elektronik pazarı için arzu edilen özelliklerdir. Bu nedenle esnek alttaşlar üzerine büyütülebilme, düşük maliyet ve geniş alana kaplanabilme özellikleri sayesinde  $\pi$ -konjuge küçük moleküller ve polimer esaslı optik sensörler yoğun bir şekilde çalışılmaktadır [239,240]. Fotosensitif transistörler, optik transdüserler, fotodetektör cihazları ve optik olarak hassas görüntü sensörleri için önemli bir elektronik cihaz olarak ön plana çıkmaktadır [241]. Bir foto-OFET’te ışık, geleneksel kaynak, akaç ve kapı elektrotları dışında ek bir terminal olarak görev yapmaktadır. Dolayısıyla iletken kanalda kapı voltajından kaynaklı oluşan yüklere ek olarak ışık nedeniyle de yükler oluşur. Foto-OFET’ler organik diyotlar ile karşılaştırıldığında daha yüksek hassasiyete ve daha düşük gürültüye sahiptirler [242]. Bu nedenle foto-OFET’ler son derece hassas fotodetektör olarak kullanılabilirler. OFET, doyum bölgesinde çalıştığında, fotoakım fotovoltajik etki tarafından domine edilir. İletken kanalda oluşan fotoakım aşağıdaki denklem ile verilmektedir [243];

$$I_{ph} = G_M \Delta V_{th} = \frac{\gamma k_B T}{q} \ln \left( 1 + \frac{q \eta \lambda P_{opt}}{I_{d, dark} h c} \right) \quad (7.2)$$

Denklemden,  $G_M$ ; geçiş iletkenliğini,  $\Delta V_{th}$ ; eşik gerilimi kaymasını,  $\eta$ ; gelen foton başına yaratılan yük taşıyıcı sayısını,  $\gamma$ ; doğrulama parametresini,  $P_{opt}$ ; gelen ışık gücünü,  $I_{dark}$ ; karanlık altındaki akımı,  $h c / \lambda$  ise foton enerjisini temsil etmektedir. Kaynak gerilimi altında tuzaklanmış çok sayıda yük taşıyıcısından dolayı fotovoltajik etki ve eşik voltajı kayması oluşmaktadır [244].

OFET lineer bölgede çalıştığında ise fotoakım fotoiletkenlik tarafından domine edilir. Fotoiletkenlik aşağıdaki denklem ile verilmektedir.

$$I_{ph} = q \mu_{in} p E W d \quad (7.3)$$

Denklemden  $\mu_{in}$ ; yük taşıyıcı mobilitesi,  $p$ ; hol yoğunluğu,  $E$ ; kanalda oluşan elektrik alanı,  $W$ ; kapı genişliği ve  $d$ ; aktif tabakanın kalınlığıdır. Denklem (7.2)’de görüldüğü gibi transistör doyum bölgesinde çalıştığı zaman fotoakım cihaza gelen ışık

gücü ile doğru orantılıdır. Foto-OFET'lerin önemli bir parametresi fotoduyarlılık ( $P$ ) olup, fotoakımın ( $I_{ph}$ ) karanlık akıma ( $I_{d,dark}$ ) oranı olarak tanımlanır [244].

$$P = \frac{I_{ph}}{I_{d,dark}} = \frac{I_{d,ill} - I_{d,dark}}{I_{d,dark}} \quad (7.4)$$

Denklemden  $I_{d,ill}$  aydınlatma altındaki akaç akımıdır. Foto-OFET'ler için diğer bir önemli parametre fototepkidir ( $R_{phr}$ ). Fototepki OFET'te oluşan fotoakımın cihaza gelen ışık gücüne oranıdır [245].

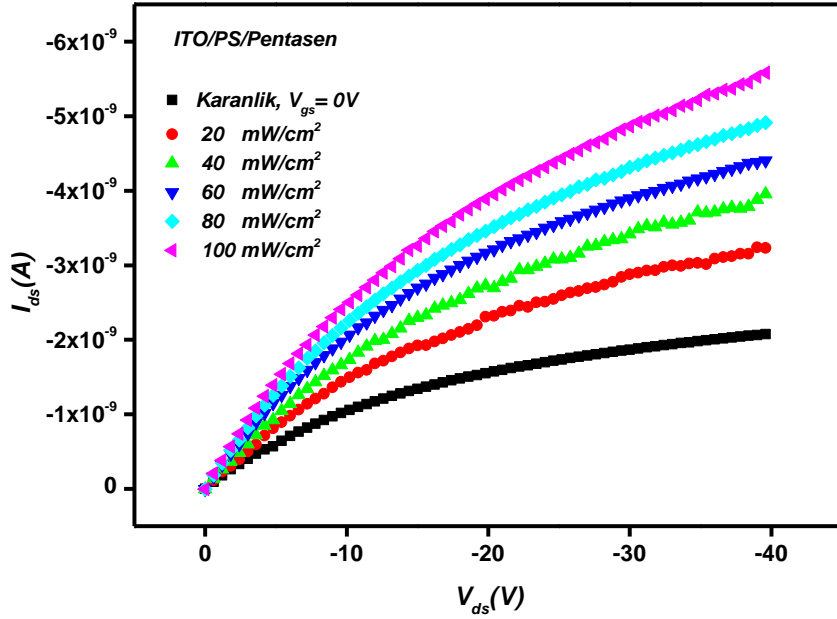
$$R_{phr} = \frac{I_{ph}}{P_{opt}} = \frac{I_{d,ill} - I_{d,dark}}{P_{in}\Lambda} \quad (7.6)$$

Denklemden  $P_{opt}$ ; kanala düşen ışığın gücü,  $\Lambda$  ise OFET'in iletken kanalının etkin alanıdır. Bant aralığı enerjisine eşit veya daha yüksek enerjili bir foton organik yarıiletken tarafından absorbe edildiğinde, fotojenerasyon sonucu yük taşıyıcıları oluşmaya başlar. Böylece OFET'in akaç-kaynak akımı artmaya başlar. Bu durum ışığın OFET'in çalışmasını kontrol eden ek bir terminal gibi rol alabileceğini göstermektedir [246]. Bu kısımda, hazırlanan tek tabaka polimer yalıtkan tabanlı OFET'lerin fotoduyarlılık ve fototepki ölçümleri 150 Watt gücüne sahip Sciencetech SF-150 marka solar simülatöre bağlı tungsten bir lamba kullanılarak 20 ile 100 mW/cm<sup>2</sup> arasında değişen ışık şiddetleri altında incelendi.

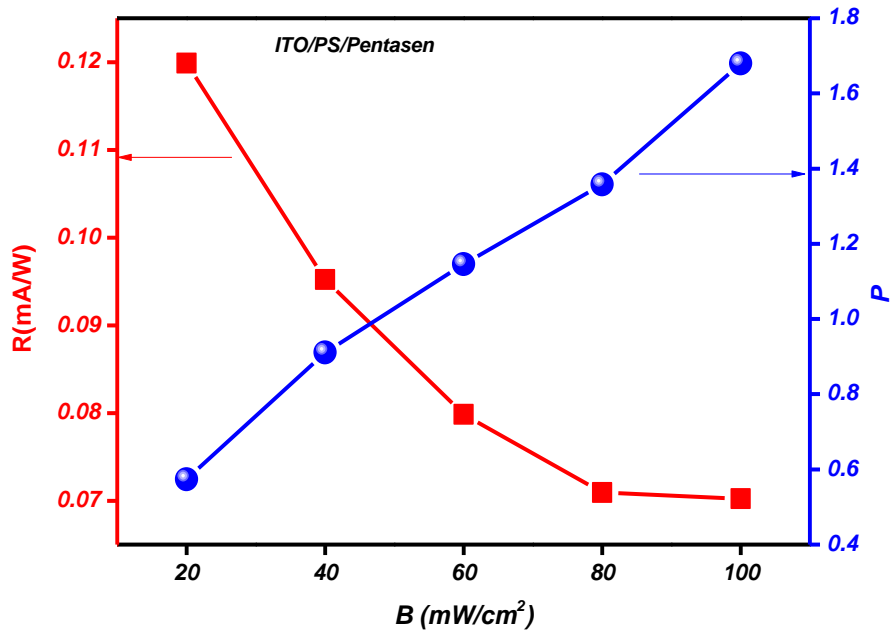
### 7.6.1. Aydınlanmanın ITO/PS/Pentaseen OFET'i üzerindeki etkisi

ITO/PS/Pentaseen OFET'inin farklı ışık şiddetleri altındaki çıkış, fotoduyarlılık ve fototepki karakteristikleri sırasıyla Şekil 7.38 ve Şekil 7.39'da verilmektedir. Şekil 7.38'de görüldüğü gibi aydınlatma şiddetine bağlı olarak fotoetkin yük oluşumu akaç gerilimi ile birlikte net olarak gözlenmektedir. Işık altında fotonlar, yük çiftlerinin (eksiton) oluşması için yarıiletken tarafından soğururlar. Bu yük çiftleri elektron ve hollere ayrılıp elektrik alan altında hareket ederek fotoakım artışına sebep olurlar. Şekil 7.39'da ITO/PS/Pentaseen OFET'inin fotoduyarlılık değeri ışık şiddeti ile birlikte  $V_{gs}=0V$  altında 0,5'den 1,6 değerine kadar arttığı görülmektedir. ITO/PS/Pentaseen OFET'inin akaç akımı kanaldaki taşıyıcıların hem kapı gerilimi hem de ışık şiddeti ile arttığını göstermektedir. Bu durum ışığın OFET'lerde ek bir kutup gibi davrandığını göstermektedir. ITO/PS/Pentaseen OFET'inin fototepki karakteristiği incelendiğinde artan

ışık şiddeti ile azaldığı görülmektedir. Optik güç ile fototepkinin azalması MoS<sub>2</sub> [247], koloidal kuantum noktaları [248] gibi nanoyapılı malzemelerin kullanıldığı dedektörlerde yaygın bir şekilde gözlenmektedir [249]. Bu etki yüksek foton akışı altında mevcut foto-üretim yüklerinin Auger işlemi veya rekombinasyon/tuzak durumlarının doyumundan dolayı azalması ile ilişkilendirilebilir. Auger işlemi veya rekombinasyon/tuzak durumlarının doyumu yük taşıyıcılarının yaşam ömrünü etkilemektedir [250].



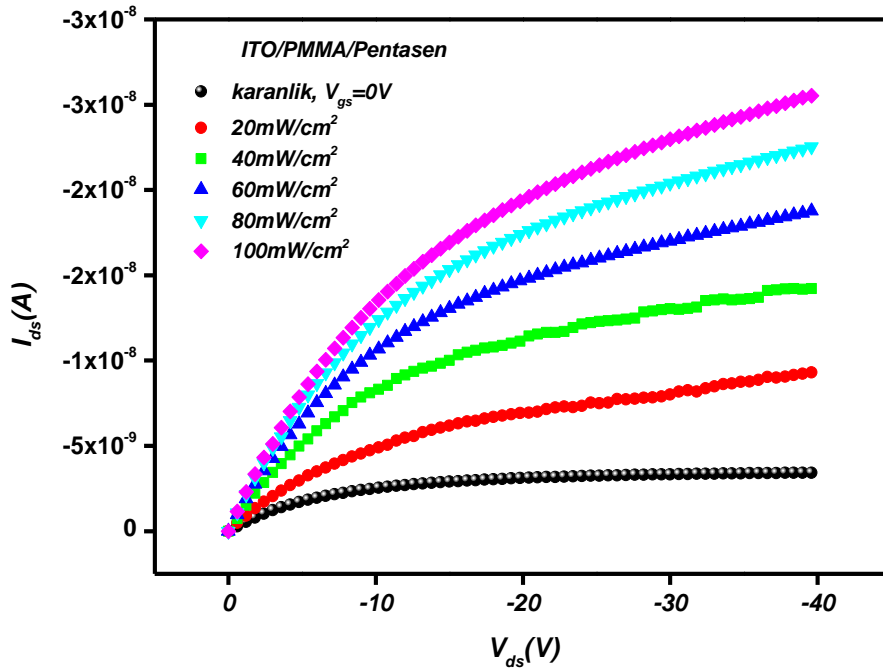
Şekil 7.38. ITO/PS/Pentacene OFET'in farklı aydınlatma şiddetleri altında çıkış karakteristiği



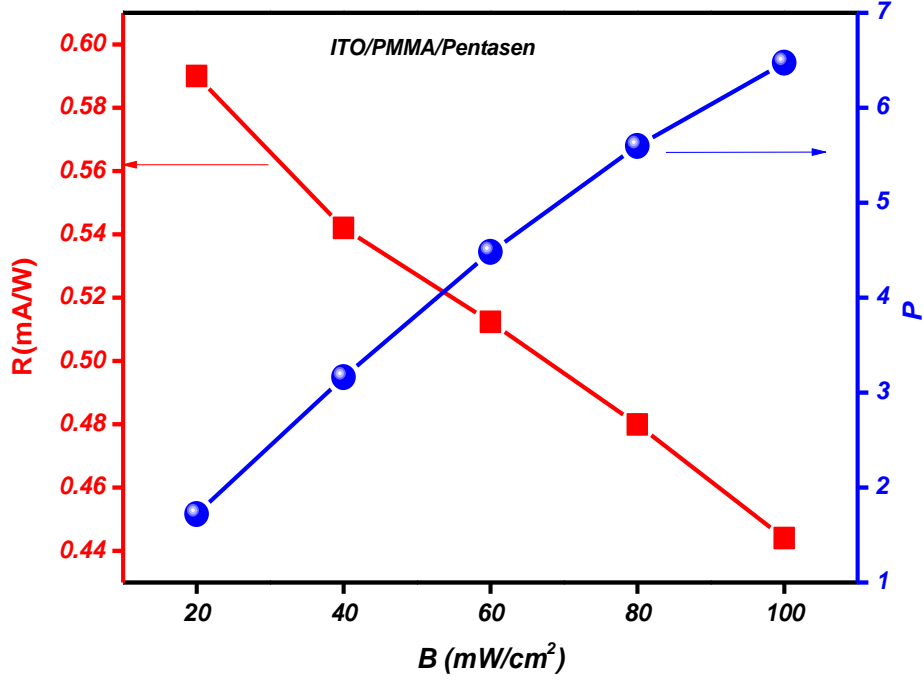
Şekil 7.39. ITO/PS/Pentacene OFET'in farklı aydınlatma şiddetleri altında fototepki ve fotoduyarluluk değerleri

### 7.6.2. Aydınlanmanın ITO/PMMA/Pentasen OFET'i üzerindeki etkisi

ITO/PMMA/Pentasen OFET'inin farklı ışık şiddetleri altındaki çıkış, fotoduyarlılık ve fototepki karakteristikleri sırasıyla Şekil 7.40 ve Şekil 7.41'de verilmektedir. Şekil 7.40'ta görüldüğü gibi aydınlatma şiddetine bağlı olarak fotoetkin yük oluşumu akaç gerilimi ile birlikte net olarak gözlenmektedir. Aydınlatmanın kapı gerilimi gibi OFET'te ek bir kutup olarak görev yapmaktadır. Şekil 7.40'ta ışık şiddeti ile birlikte akaç akımının da yavaş yavaş arttığı görülmektedir. ITO/PMMA/Pentasen OFET'inin fotoduyarlılık değeri ışık şiddeti ile birlikte  $V_{gs}=0V$  altında 1,7 'den 6,5 değerine kadar artarken, fototepki değerleri ise 0,59 mA/W değerinden 0,44 mA/W değerine kadar düşmektedir. Fototepkinin ışık şiddeti ile azalması yüksek konsantrasyonda yük taşıyıcıların rekombinasyon artışından kaynaklanırken, fotoduyarlılığın ışık şiddeti ile artması ise fotoakımın artışı ile açıklanabilir [251,252].



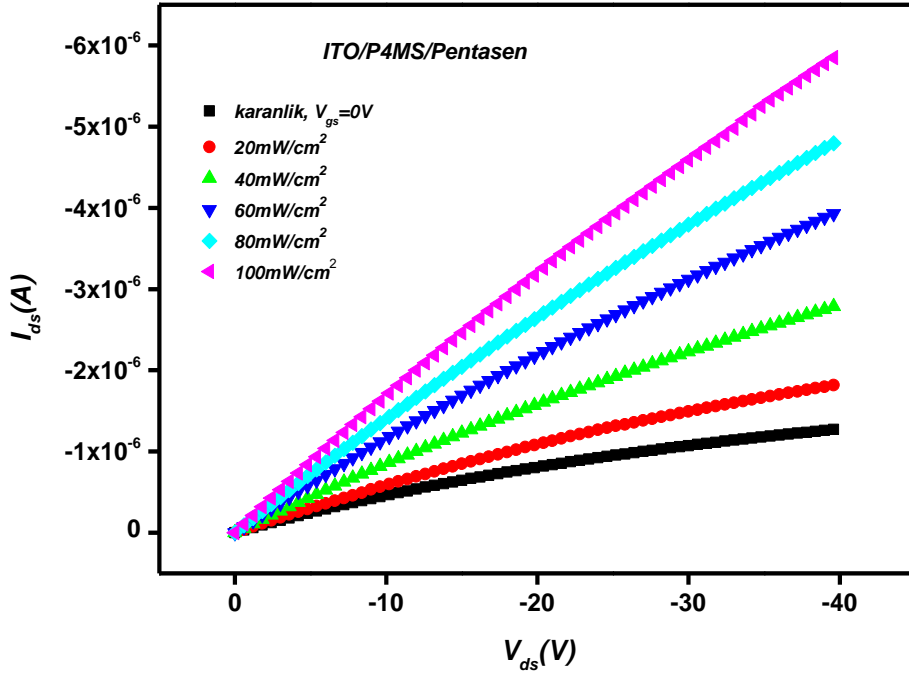
Şekil 7.40. ITO/PMMA/Pentasen OFET'in farklı aydınlatma şiddetleri altında çıkış karakteristiği



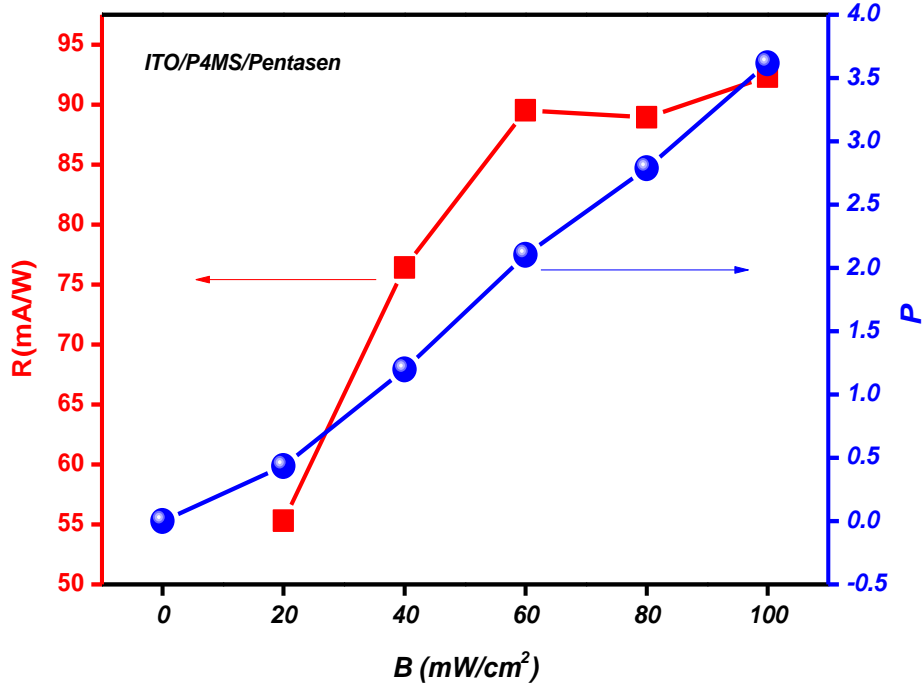
Şekil 7.41. ITO/PMMA/Pentasen OFET'in farklı aydınlatma şiddetleri altında fototepki ve fotoduyarlılık değerleri

### 7.6.3. Aydınlanmanın ITO/P4MS/Pentasen OFET'i üzerindeki etkisi

ITO/P4MS/Pentasen OFET'inin farklı ışık şiddetleri altındaki çıkış, fotoduyarlılık ve fototepki karakteristikleri sırasıyla Şekil 7.42 ve Şekil 7.43'de verilmektedir. Şekil 7.42'de ışık şiddeti ile birlikte akımın arttığı görülmektedir. ITO/P4MS/Pentasen OFET'inin fotoduyarlılık değeri ışık şiddeti ile birlikte  $V_{gs}=0V$  altında 0,4'ten 3,6 değerine kadar artarken, fototepki değerleri ise 55 mA/W değerinden 92 mA/W değerine kadar artmaktadır. Fototepkinin ışık şiddeti ile artması foto-üretim sonucu oluşan yüklerin artışına ve bu yüklerin rekombinasyona uğramaması olarak açıklanabilir [252,253]. Fototepkinin yüksek ışık şiddeti altında doyuma ulaşması yük taşınım mekanizmasının doğal sınırları ve yüksek ışık şiddetleri altında eksiton-eksiton yıkımından dolayı foto-üretim yüklerinin fotoakıma katkıda bulunmaması ile açıklanabilir [254]. Fotoduyarlılığın ışık şiddeti ile artması ise doğrudan fotoakımın artışı ile açıklanmaktadır.



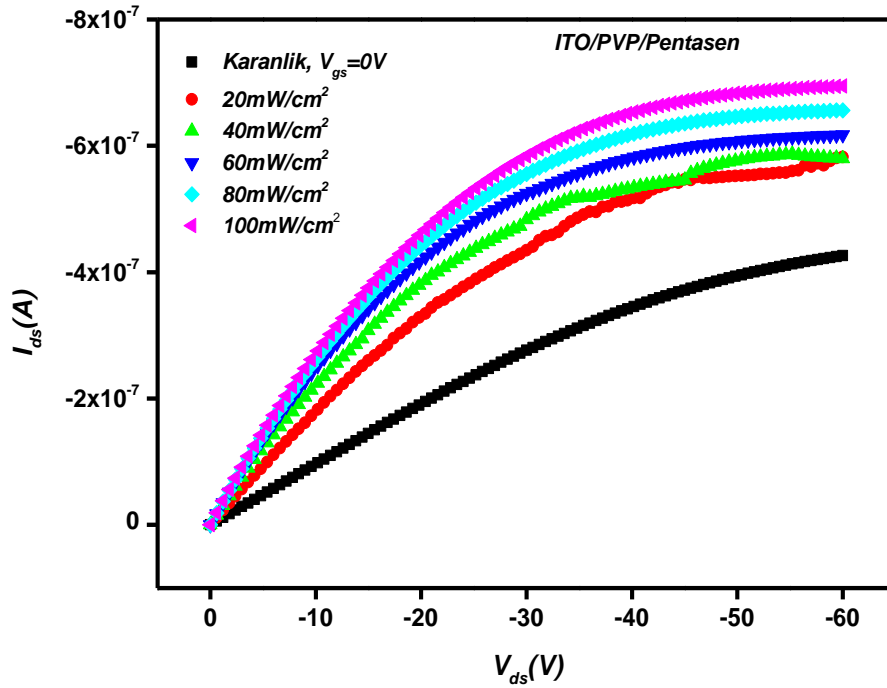
Şekil 7.42. ITO/P4MS/Pentaseen OFET'in farklı aydınlatma şiddetleri altında çıkış karakteristiği



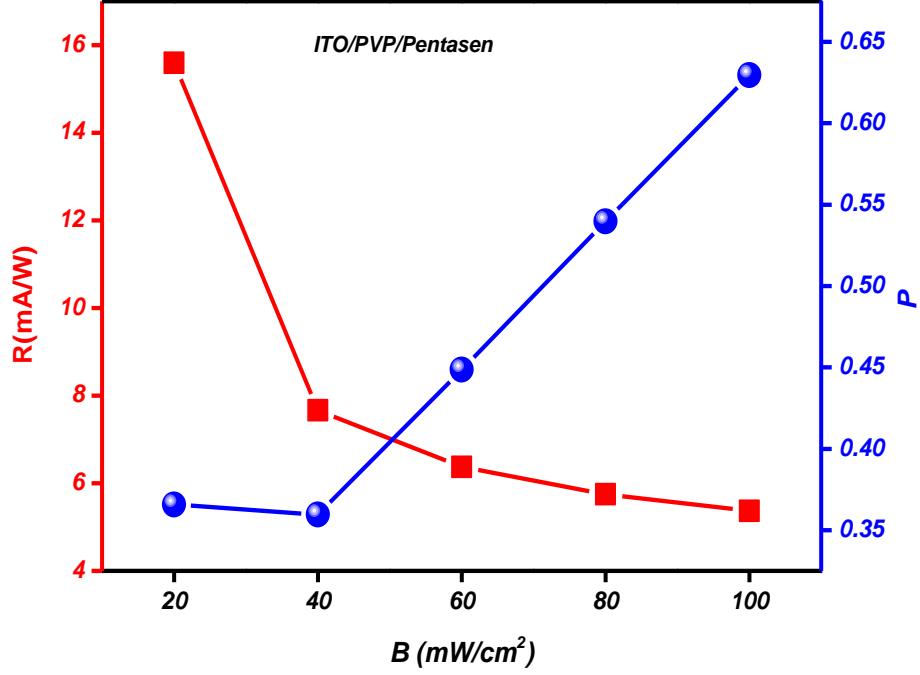
Şekil 7.43. ITO/P4MS/Pentaseen OFET'in farklı aydınlatma şiddetleri altında fototepki ve fotoduyarluluk değerleri

#### 7.6.4. Aydınlanmanın ITO/PVP/Pentasen OFET’i üzerindeki etkisi

ITO/PVP/Pentasen OFET’inin farklı ışık şiddetleri altındaki çıkış, fotoduyarlılık ve fototepki karakteristikleri sırasıyla Şekil 7.44 ve Şekil 7.45’te verilmektedir. Şekil 7.44’te OFET’in ışık şiddetine bağlı çıkış karakteristiğinde akımın arttığı görülmektedir. ITO/PVP/Pentasen OFET’inin fotoduyarlılık değeri ışık şiddeti ile birlikte  $V_{gs}=0V$  altında 0,3’ten 0,65 değerine kadar artarken, fototepki değerleri ise 15 mA/W değerinden 5 mA/W değerine kadar düşmektedir. Fotoduyarlılık artışı ve fototepki azalışı için daha önceki OFET’lerde yapılan yorumlar bu OFET içinde geçerlidir.



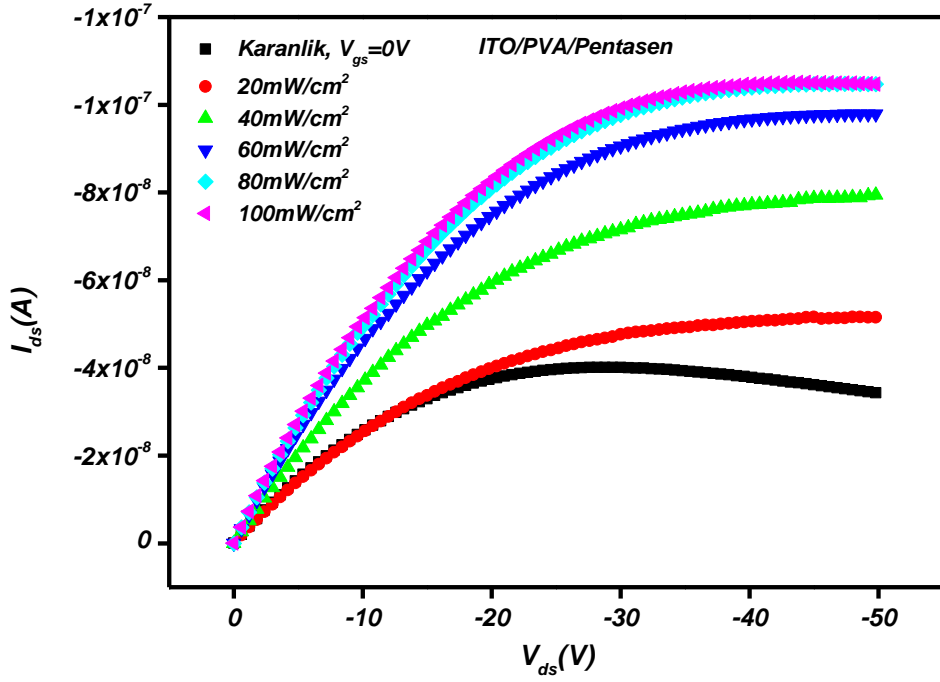
Şekil 7.44. ITO/PVP/Pentasen OFET’in farklı aydınlatma şiddetleri altında çıkış karakteristiği



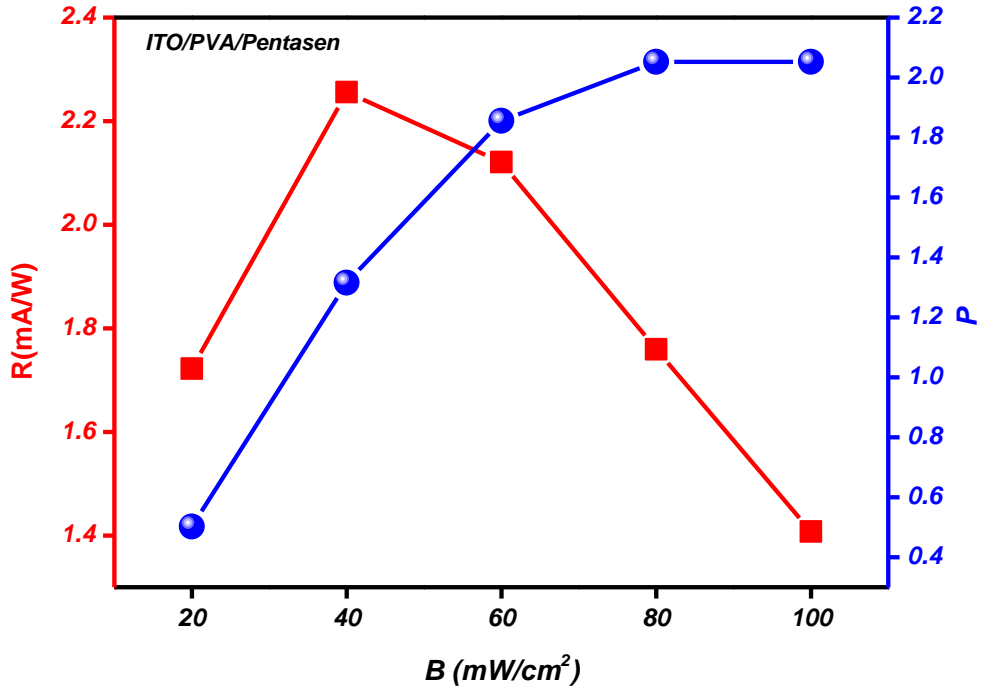
Şekil 7.45. ITO/PVP/Pentaseen OFET'in farklı aydınlatma şiddetleri altında fototepki ve fotoduyarlılık değerleri

#### 7.6.5. Aydınlanmanın ITO/PVA/Pentaseen OFET'i üzerindeki etkisi

ITO/PVA/Pentaseen OFET'inin farklı ışık şiddetleri altındaki çıkış, fotoduyarlılık ve fototepki karakteristikleri sırasıyla Şekil 7.46 ve Şekil 7.47'de verilmektedir. Şekil 7.46'da OFET'in ışık şiddetine bağlı çıkış karakteristiğinde akımın arttığı görülmektedir. ITO/PVA/Pentaseen OFET'inin fotoduyarlılık değeri ışık şiddeti ile birlikte  $V_{gs} = 0V$  altında 0,5'ten 2 değerine kadar artarken, fototepki değerleri ise  $40 \text{ mW/cm}^2$ 'de maksimum değeri olan  $2,2 \text{ mA/W}$  değerine ulaştıktan sonra azalarak  $1,4 \text{ mA/W}$  değerine kadar düşmektedir. Fotoduyarlılık artışı ise doğrudan foto-üretim sayesinde oluşan ek yüklerden kaynaklanmaktadır. Fototepki ölçümünde ise artış bölgesinde foto-üretim baskın iken azalış aşamasında ise rekombinasyon veya Auger etkisi daha baskın hale gelmiştir [244,250].



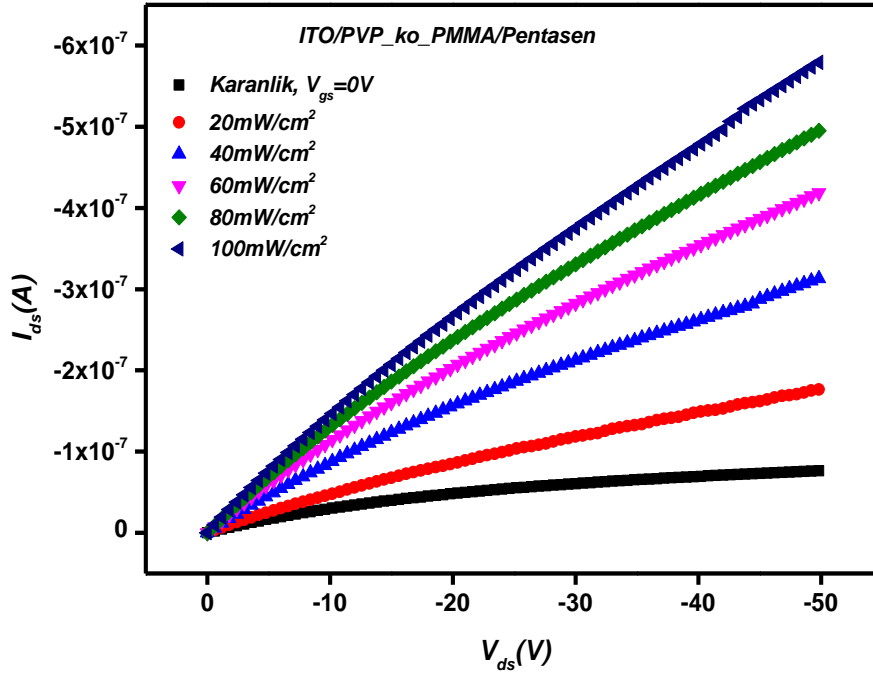
Şekil 7.46. ITO/PVA/Pentacene OFET'in farklı aydınlatma şiddetleri altında çıkış karakteristiği



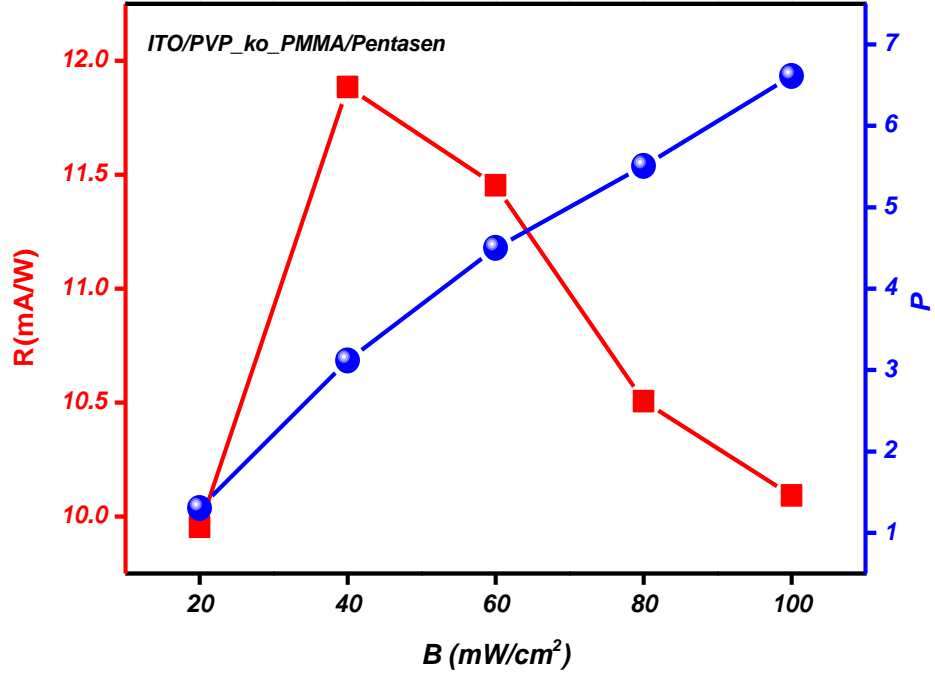
Şekil 7.47. ITO/PVA/Pentacene OFET'in farklı aydınlatma şiddetleri altında fototepki ve fotoduyarluluk değerleri

### 7.6.6. Aydınlanmanın ITO/PVP\_ko\_PMMA/Pentasen OFET'i üzerindeki etkisi

ITO/PVP\_ko\_PMMA/Pentasen OFET'inin farklı ışık şiddetleri altındaki çıkış, fotoduyarlılık ve fototepki karakteristikleri sırasıyla Şekil 7.48 ve Şekil 7.49'da verilmektedir. Şekil 7.48'de OFET'in ışık şiddetine bağlı çıkış karakteristiğinde akımın arttığı görülmektedir. ITO/ PVP\_ko\_PMMA/Pentasen OFET'inin fotoduyarlılık değeri ışık şiddeti ile birlikte  $V_{gs}=0V$  altında 1,3'ten 6,6 değerine kadar artmaktadır. Fototepki değerleri ITO/PVA/Pentasen OFET'inde olduğu gibi  $40 \text{ mW/cm}^2$ 'de maksimum değeri olan  $12 \text{ mA/W}$  değerine ulaştıktan sonra azalarak  $10 \text{ mA/W}$  değerine kadar düşmektedir. ITO/PVA/Pentasen OFET'inde fotoduyarlılık ve fototepki grafikleri ile ilgili açıklama ITO/PVP\_ko\_PMMA/Pentasen OFET'i için de geçerlidir.



Şekil 7.48. ITO/PVP\_ko\_PMMA/Pentasen OFET'in farklı aydınlatma şiddetleri altında çıkış karakteristiği



**Şekil 7.49.** ITO/PVP\_ko\_PMMA/Pentaseen OFET'in farklı aydınlatma şiddetleri altında fototepki ve fotoduyarlılık değerleri

Foto-OFET yukarıda da bahsedildiği gibi üç terminalli bir optoelektronik cihazdır. Foto-OFET'te ışık kapı gerilimi tarafından indüklenen taşıyıcılara ek olarak yeni yük taşıyıcılarının oluşması için ek bir kontrol terminali olarak görev yapar. Foto-OFET'ler organik fotodiyotlar ile karşılaştırıldıklarında daha düşük gürültüye, daha ışık hassasiyetine sahiptirler [239,242,254]. Farklı organik tek tabaka yalıtkanların kullanıldığı OFET'lerde ışığın pentaseen aktif tabakalı OFET'ler üzerindeki etkisi incelendi. Elde edilen sonuçlarda tek tabaka organik yalıtkanların Foto-OFET'lerin çıkış, fotoduyarlılık ve fototepki karakteristikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu gösterdi. Üretilen altı farklı OFET'te farklı beyaz ışık şiddetleri altında en yüksek fototepki ITO/P4MS/Pentaseen OFET'inde en yüksek fotoduyarlılık ise ITO/PVP\_ko\_PMMA/Pentaseen OFET'inde elde edilmiştir.

## 8. TARTIŞMA VE SONUÇ

OFET'lerde yalıtkan tabakanın kalitesi en az yarıiletken aktif tabaka kadar önemlidir. OFET'ler ile ilgili ilk çalışmalarda kararlılığı ve çok kolay temin edilebilmesi nedeniyle termal olarak büyütülen SiO<sub>2</sub> yalıtkan tabakaları kullanılıyordu. Bununla beraber OFET'lerin ekonomik geniş alanlı elektronik uygulamalar için esnek alttaşlar üzerine oluşturulabilmesi, üretim sıcaklığının ve maliyetinin düşürülmesi gerekmektedir. Bu nedenle, termal olarak büyütülen SiO<sub>2</sub> yüksek üretim sıcaklığı ve yüksek işlem maliyeti nedeniyle gelecekteki uygulamalar için uygun bir aday olarak görülmemektedir. Düşük sıcaklık ve düşük maliyetle yüksek kaliteli dielektrik tabakalar üretmek için yeni yaklaşımlar gerekmektedir. Buna ek olarak, aktif tabaka yarıiletkenlerin sınırlı yük taşıma mobiliteleri nedeniyle OFET'lerde yeterli büyüklükte akım elde edilebilmesi için genellikle yüksek çalışma voltajları gerekmektedir. Bu durum OFET'lerin gelecekteki uygulama alanlarını sınırlamaktadır. Aktif tabakanın performansını düşürmeden OFET'lerin çalışma voltajlarını düşürmek için düşük yüzey pürüzlülüğüne ve yüksek dielektrik sabitine sahip yalıtkan tabakalar gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, termal buharlaştırma yöntemi ile pentasen aktif tabakası farklı kapı yalıtkanları üzerine büyütülerek alt geçit ve üst kontak geometrisi ile organik ince film transistörler üretilmiştir. Kullanılan kapı yalıtkanının üretilen OFET'lerin elektriksel performansı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla ticari olarak satın alınan PMMA, PVA, PVP, polistren PS, P4MS ve PVP\_co\_PMMA organik yalıtkanları sol jel spin kaplama metodu ile hazırlandı. Bu polimer tek katman kapı yalıtkanlarının yanında ikili oluşturulan inorganik/organik kapı yalıtkanları da hazırlandı. İnorganik kapı yalıtkanı kapsamında TiO<sub>2</sub>, sol jel spin kaplama yöntemi ile Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yalıtkanı ise anodizasyon yöntemi ile oluşturuldu. Hazırlanan pentasen tabanlı OFET'lerin karanlıkta elektriksel karakterizasyonu yapıldı. Daha sonra bu transistörlerin farklı beyaz ışık şiddetleri altında elektriksel karakterizasyonu da yapıldı. Böylece farklı polimer tek tabaka yalıtkanlara sahip foto-OFET'lerin AM 1,5 spektral dağılım altında farklı ışık şiddetlerine bağlı olarak elde edilen akım-gerilim verileriyle sensör özellikleri incelendi.

Hazırlanan OFET'lerin çıkış karakteristikleri incelendiğinde, OFET'lerin akaç akımının küçük akaç voltajlarında lineer ve akaç geriliminin kapı gerilimine yaklaştığı voltajlarda ise kanalın kısırılması nedeniyle doygunluğa ulaştığı görülmüştür. OFET'lerin akaç akımının negatif kapı voltajı ile artması kanalların p-tipi yapıda olduğunu göstermektedir. Tek tabaka organik yalıtkan temelli OFET'lerde çalışma voltajları 0-60V arasında, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/polimer ikili yalıtkan temelli OFET'lerde da çalışma voltajları 0-10V arasında ve TiO<sub>2</sub>/polimer ikili yalıtkan temelli OFET'lerde da çalışma voltajları 0-3V arasında değişmektedir. OFET'lerde kullanılan yalıtkan tabakanın çalışma voltajları üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir. Şekil 7.3'ten de görüleceği üzere en yüksek kapasitans değerleri sırasıyla TiO<sub>2</sub>/polimer tabanlı OFET'lerden elde edilirken en düşük kapasitans değerleri de tek tabaka polimer tabanlı OFET'lerden elde edilmiştir. Bu kapasitans değerleri de OFET'lerin çalışma voltaj aralığını doğrudan etkilemiştir. Literatürle de uyumlu bir şekilde daha büyük dielektrik sabitine sahip TiO<sub>2</sub> yalıtkanın kullanıldığı OFET'lerde iletken kanal daha düşük voltajlarda oluşturulduğundan dolayı çalışma voltajları da daha düşük olmuştur [91,255].

Hazırlanan OFET'lerin transfer karakteristikleri incelendiğinde farklı yalıtkan tabakaları ile üretilen OFET'lerin elektriksel parametreleri üzerinde etkili olduğu görüldü. Polimer tek tabaka yalıtkanların kullanıldığı OFET'lerde en yüksek mobilite  $6,6 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  değeri ile ITO/PVP/Pentasen OFET'inden elde edildi. En düşük eşik voltajı (-1,2 V) ve alt eşik salınım değeri (17 V/decade) ile en yüksek açma/kapama ( $10^3$ ) oranı hidrofobik PMMA yalıtkanının kullanıldığı ITO/PMMA/Pentasen OFET'inden elde edildi. OFET'lerde dielektrik tabaka ile aktif yarıiletken tabakanın yüzey enerjilerinin birbirine yakın değerlerde olması OFET performansında artışı da beraberinde getirmektedir. Bununla birlikte yalıtkan yüzey enerjisinin azaltılması yüzeyde daha büyük tanecik boyutlarında sahip pentasen'in oluşmasını sağlamaktadır [35].

Daha büyük tanecik boyutlarına sahip aktif tabakalar ve hidrofobik tabakanın yüzeyi ile aktif tabaka arasındaki etkileşimin azaltılması, alan etkili mobilitiyi arttırmaktadır [76]. Kapı yalıtkanlarının yüzey özelliklerinden olan yüzey pürüzlülüğü OFET'ler için özellikle önemlidir. Çünkü yük taşıyıcıların hareketi aktif tabakanın üzerine büyütüldüğü yalıtkan tabakanın pürüzlülüğünde doğrudan etkilenmektedir. Bu nedenle daha sonra yapılacak olan çalışmalarda hazırlanan bu yalıtkan tabakaların atomik

kuvvet mikroskobu görüntüleri de alınmalıdır. Aynı zamanda p-tipi yarıiletken tabanlı OFET'lerde negatif eşik voltajı OFET'in arttırma modunda çalıştığını göstermektedir. Yalıtkan tabaka ile aktif tabaka arasında oluşan arayüzey durumları cihaz performansını doğrudan etkilemektedir. Polimer tek tabaka OFET'lerde en düşük arayüzey durum yoğunluğu ise  $4 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  değeri ile ITO/PS/Pentasen OFET'inden elde edilmiştir.

Hazırlanan  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /polimer ikili yalıtkan temelli OFET'lerin transfer karakteristikleri incelendiğinde en yüksek mobilite  $0,65 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  değeri ile tek tabaka polimer temelli OFET'lerde olduğu gibi PVP yalıtkanının kullanıldığı Al/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ /PVP/Pentasen OFET'inden elde edilmiştir. Al/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ /PVP/Pentasen OFET'inden elde edilen mobilite değeri ITO/PVP/Pentasen OFET'inden elde edilen mobilite değeri ile karşılaştırıldığında ( $6,6 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) yaklaşık 10 kat arttığı görülmektedir. Bu durum yalıtkan tabakanın modifikasyonu ile OFET performansının arttırılabileceğinin açık bir göstergesidir. Mobilitedeki bu artış OFET'te yüksek dielektrik sabiti  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'in kullanılması ile iletken kanaldaki yük artışı ve yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinin iyileştirilmesine atfedilebilir. Arayüzey durumlarının bir göstergesi olan arayüzey durum yoğunluğunun ITO/PVP/Pentasen OFET'inde  $37 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  iken bu değer Al/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ /PVP/Pentasen OFET'inde  $8 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  değerine düştüğü görülmektedir. Dolayısıyla arayüzey durumlarındaki azalma da mobilitedeki artışta rol oynamaktadır. OFET'ler için önemli olan bir diğer parametre açma/kapama oranıdır. OFET'in pratik uygulamalarda iyi bir anahtarlama özelliği gösterebilmesi için açma/kapama oranının yüksek olması istenen bir durumdur. Çizelge.7.2'den de görüldüğü gibi en yüksek açma/kapama oranı  $10^6$  değeri ile yine Al/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ /PVP/Pentasen OFET'inden elde edilmiştir. Bu değerler ışığında Al/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ /PVP/Pentasen OFET'inin pratik elektronik uygulamaları için potansiyel aday olabileceği düşünülmektedir.

Üçüncü kısım OFET'lerden  $\text{TiO}_2$ /polimer ikili yalıtkan temelli OFET'lerin transfer karakteristikleri incelendiğinde en yüksek mobilite  $0,92 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  değeri ile ITO/ $\text{TiO}_2$ /PVP\_ko\_PMMA/Pentasen OFET'inden elde edilmiştir. Buna karşın en yüksek açma/kapama oranı ( $10^4$ ) ve en düşük alt eşik salınım değeri ( $0,31 \text{ V/decade}$ ) ITO/ $\text{TiO}_2$ /PVP/Pentasen OFET'inden elde edilmiştir.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yalıtkanına göre daha yüksek dielektrik sabitine sahip  $\text{TiO}_2$ 'in OFET'lerde kullanılması iletken kanaldaki yük artışı daha da artmaktadır. Bu nedenle OFET'in çalışma gerilimi 2-3V arasına kadar çekilirken mobilitenin artışı da beraberinde gelmektedir [256]. Mobil cihazlar ve

tamamlayıcı entegre devreler gibi düşük güç tüketen elektronik cihazları üretimi için düşük çalışma voltajına sahip OFET'lerin üretimi gereklidir. Bu nedenle yüksek dielektrik sabitine sahip TiO<sub>2</sub> düşük çalışma voltajlarına sahip OFET'lerin üretimi için uygun bir adaydır. Çözelti temelli hazırlanan TiO<sub>2</sub> kolay işlenebilir ve düşük sıcaklıklarda tavlansak yalıtkan tabaka olarak kullanılabilir. Bu yöntem OFET'lerin esnek alttaşlar üzerine oluşturulmasına olanak sağlamakta ve daha pahalı yöntemlere (sputter, moleküler beam epitaksi vb. ) nazaran elektronik teknoloji pazarı için daha az maliyet oluşturmaktadır. Aynı şekilde anodizasyon yöntemi ile büyüttüğümüz Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dielektrik tabakası için de aynı avantajlar söz konusudur.

ITO/TiO<sub>2</sub>/PVP\_ko\_PMMA/Pentasek OFET'i, tek tabaka PVP\_ko\_PMMA polimerinin kullanıldığı ITO/PVP\_ko\_PMMA/Pentasek OFET'i ile karşılaştırıldığında mobilitenin 167 kat arttığı görülmektedir. Bu durum yüksek dielektrik sabitine sahip inorganik ve düşük dielektrik sabitine sahip polimer yalıtkanların birlikte kullanılması ile ortaya çıkabilecek avantajların da göstergesidir. İnorganik TiO<sub>2</sub> yalıtkanının düşük dielektrik sabitine sahip polimerlerle kaplanması daha pürüzsüz TiO<sub>2</sub> yalıtkan yüzeyini sağlarken TiO<sub>2</sub> filminin tane sınırları arasından meydana gelebilecek sızıntı akımlarını da bastırabilmektedir [201].

Bunlara ek olarak Çizelge 7.1, Çizelge 7.2 ve Çizelge. 7.3'ten de görüleceği üzere ikili yalıtkan tabakalara sahip OFET'lerde arayüzey tuzak durumlarının azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Çizelgelerden OFET mobiliteleri tuzak durum sayıları arasında bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Arayüzey tuzakları doğası gereği kuşkusuz yarıiletken ve dielektrik tabakalar arasındaki etkileşimin mikro yapısal detaylarına bağlı olsa da arayüzey tuzak yoğunlukları kimyasal açıdan nitel olarak da anlaşılabilir. Yalıtkan tabakaların H<sub>2</sub>O absorplaması ve dış kaynaklı karbon kirlilikleri gibi kimyasal kusurlar, meydana getirdikleri tuzak seviyeleri veya saçılma mekanizmaları sayesinde yarıiletken-yalıtkan arayüzündeki taşıyıcı hareketlerini etkilemektedir. Bu tuzakların kimyasal/fiziksel kusurlardan kaynaklandığı ve yarıiletken tane sınırlarında veya yarıiletken/dielektrik arayüzünde lokalize olduğu düşünülmektedir [257,258].

Üretilen OFET'lerin kararlılığı OFET'lerin elektriksel performansı kadar önemlidir. Bu nedenle ürettiğimiz OFET'lerin histeresis davranışları geleneksel transfer karakteristiği yardımıyla incelenmiştir. OFET'lerde histeriz davranışı I<sub>ds</sub>-V<sub>gs</sub> grafiğinin

iki yönlü taranması sonucunda BSC akım değeri ile FSC akım değerinin büyüklüklerinin birbirinden farklı çıkmasıyla açıklanmaktadır. Histeriz davranışı gösteren transistörlerin BSC ve FSC akım değerleri incelendiğinde, iki farklı histeriz mekanizması gözlenmiştir. ITO/PVP/Pentasen ( $\Delta=35,44V$ ), ITO/PVA/Pentasen ( $\Delta=23,95V$ ), Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP/Pentasen ( $\Delta=1V$ ) ve ITO/TiO<sub>2</sub>/PVP/Pentasen ( $\Delta=0,42V$ ) OFET'lerinde BSC akımı FSC akımından büyük olup, histeriz davranışları yalıtkan içindeki mobil iyonları, yalıtkanının polarizasyonu veya kapı kontağında kapı yalıtkanına elektron enjeksiyonundan kaynaklandığı düşünülmektedir. ITO/PS/Pentasen ( $\Delta=1V$ ), ITO/P4MS/Pentasen ( $\Delta=4,04V$ ), ITO/PMMA/Pentasen ( $\Delta=2,07V$ ), ITO/PVP\_ko\_PMMA/Pentasen ( $\Delta=4,23V$ ), Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVP\_ko\_PMMA/Pentasen ( $\Delta=1,12V$ ), Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PMMA/Pentasen ( $\Delta=0,27V$ ) ve Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PS/Pentasen ( $\Delta=1V$ ) transistörlerinde ise FSC akımı BSC akımından büyük olup, histeriz davranışları iletken kanala yakın yük taşıyıcıların tuzaklanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Üretilen tek tabaka polimer tabanlı OFET'lerin AM 1,5 spektral dağılımına sahip beyaz ışığın farklı aydınlatma şiddetleri altında çıkış karakteristikleri, foto-duyarlılıkları ve foto-tepkileri incelenmiştir. Bütün transistörlerin aydınlatma şiddetine bağlı olarak ışığa tepki verdiği, bu tepkinin OFET'in aktif tabakasında yer aldığı ve optik sinyallerin elektrik sinyaline dönüştürüldüğü görülmüştür. 100 mW/cm<sup>2</sup> ışık şiddeti altında en yüksek fotoduyarlılık (~6,6) ITO/PVP\_ko\_PMMA/Pentasen OFET'inde, en yüksek fototepki (92 mA/W) ise ITO/P4MS/Pentasen OFET'inde elde edildi. Katı organik yarıiletkenlerde dört temel foto-taşıyıcı üretim mekanizması bulunmaktadır. Bu mekanizmalar OFET'in iletken kanalında taşıyıcı yoğunluğunun artmasına katkıda bulunurlar [244]. Bunlar;

- 1- Elektrik alanın, yüzeyin veya kirliliklerin sebep olduğu eksiton oluşumu ve bu eksitonların serbest taşıyıcılara ayrılması,
- 2- Elektronların banttan banda uyarılması,
- 3- Metal (kaynak/akaç) elektrotlarından polimer içine taşıyıcıların foto-enjeksiyonu,
- 4- Organik yarıiletken içinde taşıyıcıların lokalize tuzak durumlarından kurtulması olarak sıralanabilir.

Ürettiğimiz foto-OFET'lerin farklı ışık şiddetleri altında akaç akımlarındaki artış foto-üretim sürecinin eksiton oluşumuna atfedilebilir. Yeterli enerjiye sahip fotonlar aktif tabakada absorbe edilerek eksiton (elektron-hol çifti) oluşumuna sebep olurlar. Bu elektron ve hol çiftleri uygulanan bir elektrik alan altında ayrışarak ( $V_{ds}$  veya  $V_{gs}$ ) kanal içinde zıt yönlerde hareket ederler. Foto-üretim sonucu oluşan holler akaç elektrotunda toplanırlar (akaç elektrotundan organik yarıiletkenin valans bandına bir elektronun iletimine karşılık). Bu şekilde aktif tabakanın iletim kanalında taşıyıcı yoğunluğunda, dolayısıyla akaç akımında artış gerçekleşmektedir. Üretilen tek tabaka polimer tabanlı OFET'lerin tamamı da ışığa tepki verdiklerinden dolayı bu OFET'lerin foto-OFET olarak elektronik teknolojisinde ışığa duyarlı sensör uygulamalarında kullanılabileceği düşünülmektedir.

Bu çalışmanın sol-jel spin kaplama, anodizasyon ve termal buharlaştırma yöntemi ile yalıtkan ve yarıiletken film büyütme, organik alan etkili transistör ve ışığa duyarlı sensör üretimi konuları üzerine çalışma yapan araştırmacılar için önemli bilimsel katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

## KAYNAKÇA

- [1] Arias, A. C., MacKenzie, J. D., McCulloch, I., Rivnay, J., and Salleo, A. (2010). Materials and applications for large area electronics: solution-based approaches. *Chemical reviews*, 110(1), 3-24.
- [2] Roberts, M. E., Mannsfeld, S. C., Queralto, N., Reese, C., Locklin, J., Knoll, W., and Bao, Z. (2008). Water-stable organic transistors and their application in chemical and biological sensors. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(34), 12134-12139.
- [3] Braga, D., and Horowitz, G. (2009). High-Performance Organic Field-Effect Transistors. *Advanced materials*, 21(14-15), 1473-1486.
- [4] Cho, J. H., Lee, J., Xia, Y., Kim, B., He, Y., Renn, M. J., Lodge, T.P., and Frisbie, C. D. (2008). Printable ion-gel gate dielectrics for low-voltage polymer thin-film transistors on plastic. *Nature materials*, 7(11), 900.
- [5] Klauk, H. (Ed.). (2006). *Organic electronics: materials, manufacturing, and applications*. John Wiley and Sons.
- [6] CR Kagan and P. Andry. (2003). *Thin Film Transistors*. CRC Press
- [7] Sze, S. M., and Ng, K. K. (2006). *Physics of semiconductor devices*. John wiley and sons.
- [8] Bardeen, J., and Brattain, W. H. (1948). The transistor, a semi-conductor triode. *Physical Review*, 74(2), 230.
- [9] Fortunato, E., Barquinha, P., and Martins, R. (2012). Oxide semiconductor thin-film transistors: a review of recent advances. *Advanced materials*, 24(22), 2945-2986.
- [10] J. E. Lilienfield, (1930) *U.S. Patent* 1745175.
- [11] O. Heil, (1935) *U.K. Patent* 439457.
- [12] J. E. Lilienfield, (1933) *U.S. Patent* 1900018.
- [13] A. C. Tickle (1969) *Thin-Film Transistors - A New Approach to Microelectronics*, Wiley , New York.

- [14] Horowitz, G. (1998). Organic field-effect transistors. *Advanced Materials*, 10(5), 365-377.
- [15] Barbe, D. F., and Westgate, C. R. (1970). Surface state parameters of metal-free phthalocyanine single crystals. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 31(12), 2679-2687.
- [16] Ebisawa, F., Kurokawa, T., and Nara, S. (1983). Electrical properties of polyacetylene/polysiloxane interface. *Journal of Applied Physics*, 54(6), 3255-3259.
- [17] Tsumura, A., Koezuka, H., and Ando, T. (1988). Polythiophene field-effect transistor: Its characteristics and operation mechanism. *Synthetic Metals*, 25(1), 11-23.
- [18] Reese, C., Roberts, M., Ling, M. M., and Bao, Z. (2004). Organic thin film transistors. *Materials today*, 7(9), 20-27.
- [19] Fujisaki, Y., Koga, H., Nakajima, Y., Nakata, M., Tsuji, H., Yamamoto, T., Kurita, T., Nogi, M. and Shimidzu, N. (2014). Transparent Nanopaper-Based Flexible Organic Thin-Film Transistor Array. *Advanced Functional Materials*, 24(12), 1657-1663.
- [20] Hyun, W. J., Secor, E. B., Rojas, G. A., Hersam, M. C., Francis, L. F., and Frisbie, C. D. (2015). All-Printed, Foldable Organic Thin-Film Transistors on Glassine Paper. *Advanced Materials*, 27(44), 7058-7064.
- [21] Zang, Y., Zhang, F., Huang, D., Gao, X., Di, C. A., and Zhu, D. (2015). Flexible suspended gate organic thin-film transistors for ultra-sensitive pressure detection. *Nature communications*, 6, 6269.
- [22] Algarni, S. A., Althagafi, T. M., Al Naim, A., and Grell, M. (2016). A water-gated organic thin film transistor as a sensor for water-borne amines. *Talanta*, 153, 107-110.

- [23] Yi, M., Shu, J., Wang, Y., Ling, H., Song, C., Li, W., Xie, L. and Huang, W. (2016). The effect of porous structure of PMMA tunneling dielectric layer on the performance of nonvolatile floating-gate organic field-effect transistor memory devices. *Organic Electronics*, 33, 95-101.
- [24] Fiore, V., Battiato, P., Abdinia, S., Jacobs, S., Chartier, I., Coppard, R., Klink, G., Cantatore, E., Ragonese, E. and Palmisano, G. (2015). An integrated 13.56-MHz RFID tag in a printed organic complementary TFT technology on flexible substrate. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 62(6), 1668-1677.
- [25] <http://phome.postech.ac.kr/user/indexSub.action?codyMenuSeq=69391&siteId=lamp&menuUIType=sub> (Erişim Tarihi:25.08.2016)
- [26] Shaw, J. M., and Seidler, P. F. (2001). Organic electronics: introduction. *IBM Journal of Research and Development*, 45(1), 3-9.
- [27] Yi, M., Guo, J., Li, W., Xie, L., Fan, Q., and Huang, W. (2015). High-mobility flexible pentacene-based organic field-effect transistors with PMMA/PVP double gate insulator layers and the investigation on their mechanical flexibility and thermal stability. *RSC Advances*, 5(115), 95273-95279.
- [28] Ficker, J., Ullmann, A., Fix, W., Rost, H., and Clemens, W. (2003). Stability of polythiophene-based transistors and circuits. *Journal of applied physics*, 94(4), 2638-2641.
- [29] Schön, J. H., Berg, S., Kloc, C., and Batlogg, B. (2002). Ambipolar pentacene field-effect transistors and inverters (vol 287, pg 1022, 2000). *Science*, 298(5595), 961-961.
- [30] Heremans, P., Tripathi, A. K., de Jamblinne de Meux, A., Smits, E. C., Hou, B., Pourtois, G., and Gelinck, G. H. (2016). Mechanical and Electronic Properties of Thin-Film Transistors on Plastic, and Their Integration in Flexible Electronic Applications. *Advanced Materials*, 28(22), 4266-4282.
- [31] Li, F., Nathan, A., Wu, Y., and Ong, B. S. (2011). *Organic thin film transistor integration: A hybrid approach*. John Wiley & Sons.

- [32] Jiang, J. (2006). *Design, Synthesis, and Properties of New Derivatives of Pentacene and New Blue Emitters* (Doctoral dissertation, Bowling Green State University).
- [33] Kim, K., Yoon, Y. K., Mun, M. O., Park, S. P., Kim, S. S., Im, S., and Kim, J. H. (2002). Optical properties of solid pentacene. *Journal of superconductivity*, 15(6), 595-598.
- [34] Afzali, A., Dimitrakopoulos, C. D., and Breen, T. L. (2002). High-performance, solution-processed organic thin film transistors from a novel pentacene precursor. *Journal of the American Chemical Society*, 124(30), 8812-8813.
- [35] Lin, Y. Y., Gundlach, D. I., Nelson, S. F., and Jackson, T. N. (1997). Pentacene-based organic thin-film transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 44(8), 1325-1331.
- [36] Yang, H., Shin, T. J., Ling, M. M., Cho, K., Ryu, C. Y., and Bao, Z. (2005). Conducting AFM and 2D GIXD studies on pentacene thin films. *Journal of the American Chemical Society*, 127(33), 11542-11543.
- [37] Zhang, X. H., Tiwari, S. P., Kim, S. J., and Kippelen, B. (2009). Low-voltage pentacene organic field-effect transistors with high- $\kappa$ HfO<sub>2</sub> gate dielectrics and high stability under bias stress. *Applied Physics Letters*, 95(22), 223302.
- [38] Shirakawa, H., Louis, E. J., MacDiarmid, A. G., Chiang, C. K., and Heeger, A. J. (1977). Synthesis of electrically conducting organic polymers: halogen derivatives of polyacetylene, (CH)<sub>x</sub>. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, (16), 578-580.
- [39] So, F. (Ed.). (2009). *Organic electronics: materials, processing, devices and applications*. CRC press.
- [40] Hang, C. C. (2009). *Charge Injection, Transport and Thin Film Transistor Applications of Phenylamine-Based Organic Semiconductors* (Doctoral dissertation, Hong Kong Baptist University).
- [41] Deng, L., and 邓林峰. (2011). *A study on pentacene organic thin-film transistors with Hf-based oxides gate dielectric*. HKU Theses Online (HKUTO).

- [42] Massimi, M. (2005). *Pauli's exclusion principle: the origin and validation of a scientific principle*. Cambridge University Press.
- [43] Lin, W. Y. (2012). *Anodized Aluminum Oxide and its Application for Organic Transistors and Sensors* (Geanodiseerd aluminiumoxide voor organische transistor-en sensortoepassingen).
- [44] Bredas, J. L., and Street, G. B. (1985). Polarons, bipolarons, and solitons in conducting polymers. *Accounts of Chemical Research*, 18(10), 309-315.
- [45] Zhang, S. (2015). *Analysis of phase transitions and crystal structures of novel benzothiophene derivatives* (Doctoral dissertation, The University of Akron).
- [46] Ibach, H., and Lüth, H. (2003). *Solid-state physics: an introduction to principles of material science. Advanced Texts in Physics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- [47] Shuai, Z., Wang, L., and Song, C. (2012). *Theory of charge transport in carbon electronic materials*. Springer Science & Business Media. ISO 690.
- [48] Karl, N., and Marktanner, J. (2001). Electron and hole mobilities in high purity anthracene single crystals. *Molecular crystals and liquid crystals*, 355(1), 149-173.
- [49] da Silva Filho, D. A., Kim, E. G., and Brédas, J. L. (2005). Transport properties in the rubrene crystal: electronic coupling and vibrational reorganization energy. *Advanced Materials*, 17(8), 1072-1076.
- [50] Cheng, Y. C., Silbey, R. J., da Silva Filho, D. A., Calbert, J. P., Cornil, J., and Brédas, J. L. (2003). Three-dimensional band structure and bandlike mobility in oligoacene single crystals: A theoretical investigation. *The Journal of chemical physics*, 118(8), 3764-3774.
- [51] Uçurum, C. (2013). *Understanding and Modeling the Hysteresis in Current-Voltage (I-V) and Capacitance-Voltage (C-V) Characteristics of Organic Thin-Film Transistors*. (Doctoral dissertation, Von der Fakultät für Elektrotechnik der Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg zur Erlangung des akademischen Grades eines).

- [52] Kalb, W. L., Haas, S., Krellner, C., Mathis, T., and Batlogg, B. (2010). Trap density of states in small-molecule organic semiconductors: A quantitative comparison of thin-film transistors with single crystals. *Physical Review B*, 81(15), 155315.
- [53] Xie, W. (2013). *Charge transport in single crystal organic semiconductors* (Doctoral dissertation, University of Minnesota).
- [54] Monroe, D. (1985). Hopping in exponential band tails. *Physical Review Letters*, 54(2), 146.
- [55] Mott, N. F., and Davis, E. A. (2012). *Electronic processes in non-crystalline materials*. OUP Oxford.
- [56] Shklovskii, B. I., and Efros, A. L. (2013). *Electronic properties of doped semiconductors* (Vol. 45). Springer Science & Business Media.
- [57] Bao, Z., and Locklin, J. (Eds.). (2007). *Organic field-effect transistors*. CRC press.
- [58] Shur, M., and Hack, M. (1984). Physics of amorphous silicon based alloy field-effect transistors. *Journal of Applied Physics*, 55(10), 3831-3842.
- [59] Horowitz, G., Hajlaoui, R., and Delannoy, P. (1995). Temperature dependence of the field-effect mobility of sexithiophene. Determination of the density of traps. *Journal de Physique III*, 5(4), 355-371.
- [60] Horowitz, G., Hajlaoui, M. E., and Hajlaoui, R. (2000). Temperature and gate voltage dependence of hole mobility in polycrystalline oligothiophene thin film transistors. *Journal of Applied Physics*, 87(9), 4456-4463.
- [61] Locci, S. (2009). *Modeling of physical and electrical characteristics of organic thin film transistors* (Doctoral dissertation, Università degli Studi di Cagliari).
- [62] Chiang, C. K., Fincher Jr, C. R., Park, Y. W., Heeger, A. J., Shirakawa, H., Louis, E. J., Gau, S.C. and MacDiarmid, A. G. (1977). Electrical conductivity in doped polyacetylene. *Physical review letters*, 39(17), 1098.
- [63] Rahimi, R. (2012). *Investigation of structural properties of organic thin films for solar cell and transistor applications*. West Virginia University.

- [64] Farchioni, R., and Grosso, G. (Eds.). (2013). *Organic electronic materials: conjugated polymers and low molecular weight organic solids* (Vol. 41). Springer Science & Business Media.
- [65] Zscheschang, U., Ante, F., Kälblein, D., Yamamoto, T., Takimiya, K., Kuwabara, H., Ikeda, M., Sekitani, T., Someya, T., Blochwitz-Nimoth, J. and Klauk, H. (2011). Dinaphtho [2, 3-b: 2', 3'-f] thieno [3, 2-b] thiophene (DNTT) thin-film transistors with improved performance and stability. *Organic Electronics*, 12(8), 1370-1375.
- [66] Kumaki, D., Yahiro, M., Inoue, Y., and Tokito, S. (2007). Air stable, high performance pentacene thin-film transistor fabricated on SiO<sub>2</sub> gate insulator treated with beta-phenethyltrichlorosilane. *Applied physics letters*, 90(13), 3511.
- [67] Wasikiewicz, J. M., Abu-Sen, L., Horn, A. B., Koelewijn, J. M., Parry, A. V., Morrison, J. J., and Yeates, S. G. (2016). Towards solution processable air stable p-type organic semiconductors: synthesis and evaluation of mono and di-fluorinated pentacene derivatives. *Journal of Materials Chemistry C*, 4(30), 7309-7315
- [68] Nabok, D., Puschnig, P., Ambrosch-Draxl, C., Werzer, O., Resel, R., and Smilgies, D. M. (2007). Crystal and electronic structures of pentacene thin films from grazing-incidence x-ray diffraction and first-principles calculations. *Physical Review B*, 76(23), 235322.
- [69] Marien, H., Steyaert, M. S., van Veenendaal, E., and Heremans, P. (2012). Analog building blocks for organic smart sensor systems in organic thin-film transistor technology on flexible plastic foil. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 47(7), 1712-1720.
- [70] Natelson, D. (2016). Precise Layering of Organic Semiconductors. *Physics*, 9, 1.
- [71] Wang, J. Z., Wu, K. H., Yang, W. S., Wang, X. J., Sadowski, J. T., Fujikawa, Y., and Sakurai, T. (2005). Structural transition of pentacene monolayer on Ga bilayer: From brick-wall structure to herringbone pattern of molecular dimers. *Surface science*, 579(1), 80-88.

- [72] Gross, L., Mohn, F., Moll, N., Liljeroth, P., and Meyer, G. (2009). The chemical structure of a molecule resolved by atomic force microscopy. *Science*, 325(5944), 1110-1114.
- [73] Drummy §, L. F., Kübel, C., and Martin, D. C. (2004). Molecular vacancies in herringbone crystals. *Philosophical Magazine*, 84(19), 1955-1976.
- [74] Drummy, L. F., and Martin, D. C. (2005). Thickness-Driven Orthorhombic to Triclinic Phase Transformation in Pentacene Thin Films. *Advanced Materials*, 17(7), 903-907.
- [75] Cheng, H. L., Mai, Y. S., Chou, W. Y., Chang, L. R., and Liang, X. W. (2007). Thickness-Dependent Structural Evolutions and Growth Models in Relation to Carrier Transport Properties in Polycrystalline Pentacene Thin Films. *Advanced Functional Materials*, 17(17), 3639-3649.
- [76] Park, Y. D., Lim, J. A., Lee, H. S., and Cho, K. (2007). Interface engineering in organic transistors. *Materials today*, 10(3), 46-54.
- [77] Jackson, T.N., Lin, Y.-Y., Gundlach, D.J., and Klauk, H. (1998) Organic thin-film transistors for organic light-emitting flat-panel display backplanes. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 4 (1), 100.
- [78] Bao, Z., Dadabalapur, A., Katz, H.E., Raju, R.V., and Rogers, J.A. (2001) *Organic semiconductors for plastic electronics*. IEEE-TAB New Technology Directions Committee (NTDC), 2001 IEEE Workshop on New and Emerging Technologies.
- [79] Kawasaki, M., Ando, M., Imazeki, S., Sekiguchi, Y., Hirota, S., Sasaki, H., Uemura, S. and Kamata, T. (2005, August). *Printable organic TFT technologies for FPD applications*. In Proc. SPIE-5940 (Organic Field-Effect Transistors IV) (p. 59400P).
- [80] Everaerts, K. (2013). *High capacitance hybrid organic-inorganic gate dielectrics for solution-processable electronic technologies* (Doctoral dissertation, Northwestern University)

- [81] Oh, J. D., Kim, D. K., Kim, J. W., Ha, Y. G., and Choi, J. H. (2016). Low-voltage pentacene thin-film transistors using Hf-based blend gate dielectrics. *Journal of Materials Chemistry C*, 4(4), 807-814.
- [82] Subbarao, N. V., Gedda, M., Iyer, P. K., and Goswami, D. K. (2015). Enhanced environmental stability induced by effective polarization of a polar dielectric layer in a trilayer dielectric system of organic field-effect transistors: a quantitative study. *ACS applied materials & interfaces*, 7(3), 1915-1924.
- [83] Liu, A., Liu, G. X., Zhu, H. H., Xu, F., Fortunato, E., Martins, R., and Shan, F. K. (2014). Fully Solution-Processed Low-Voltage Aqueous In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Thin-Film Transistors Using an Ultrathin ZrO<sub>x</sub> Dielectric. *ACS applied materials & interfaces*, 6(20), 17364-17369.
- [84] Esro, M., Vourlias, G., Somerton, C., Milne, W. I., and Adamopoulos, G. (2015). High-Mobility ZnO Thin Film Transistors Based on Solution-processed Hafnium Oxide Gate Dielectrics. *Advanced Functional Materials*, 25(1), 134-141.
- [85] Maex, K., Baklanov, M. R., Shamiryan, D., Lacopi, F., Brongersma, S. H., and Yanovitskaya, Z. S. (2003). Low dielectric constant materials for microelectronics. *Journal of Applied Physics*, 93(11), 8793-8841.
- [86] Shinriki, H. I. R. O. S. H. I., Kisu, T. E. R. U. A. K. I., Kimura, S. I., Nishioka, Y. A. S. U. S. H. I. R. O., Kawamoto, Y. O. S. H. I. F. U. M. I., and Mukai, K. I. I. C. H. I. R. O. U. (1990). Promising storage capacitor structures with thin Ta/sub 2/O/sub 5/film for low-power high-density DRAMs. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 37(9), 1939-1947.
- [87] Lee, K. H., Lee, K., Oh, M. S., Choi, J. M., Im, S., Jang, S., and Kim, E. (2009). Flexible high mobility pentacene transistor with high-k/low-k double polymer dielectric layer operating at -5V. *Organic Electronics*, 10(1), 194-198.
- [88] Wilk, G. D., Wallace, R. M., and Anthony, J. M. (2001). High-κ gate dielectrics: Current status and materials properties considerations. *Journal of applied physics*, 89(10), 5243-5275.
- [89] (a) Moore, G. E. *Electronics* 1965, 38, 114. (b) Moore, G. E. *IEEE IEDM Tech. Dig.* 1975, 11

- [90] Zaumseil, J., and Sirringhaus, H. (2007). Electron and ambipolar transport in organic field-effect transistors. *Chemical reviews*, 107(4), 1296-1323.
- [91] Ortiz, R. P., Facchetti, A., and Marks, T. J. (2009). High-k organic, inorganic, and hybrid dielectrics for low-voltage organic field-effect transistors. *Chemical reviews*, 110(1), 205-239.
- [92] Zeng, J., and Jensen, P. B. (2013). *Organic light-emitting transistors with optimized gate dielectric*. (M.S. Thesis, University of Southern Denmark)
- [93] Chua, L. L., Zaumseil, J., Chang, J. F., Ou, E. C. W., Ho, P. K. H., Sirringhaus, H., and Friend, R. H. (2005). General observation of n-type field-effect behaviour in organic semiconductors. *Nature*, 434(7030), 194-199.
- [94] Oswal, R. R. (2014). *Investigation of Different Dielectric Materials as Gate Insulator for MOSFET* (Doctoral dissertation, University of Central Florida Orlando, Florida).
- [95] Zaraska, L., Brudzisz, A., Wierzbicka, E., and Sulka, G. D. (2016). The effect of electrolyte change on the morphology and degree of nanopore order of porous alumina formed by two-step anodization. *Electrochimica Acta*, 198, 259-267.
- [96] Hwang, J. C. C., Yang, C. H., Veldhorst, M., Hendrickx, N., Fogarty, M. A., Huang, W., Hudson, F.E., Morello, A. and Dzurak, A. S. (2017). Impact of g-factors and valleys on spin qubits in a silicon double quantum dot. *Physical Review B*, 96(4), 045302.
- [97] Law, C. S., Santos, A., Nemati, M., and Losic, D. (2016). Structural engineering of nanoporous anodic alumina photonic crystals by sawtooth-like pulse anodization. *ACS applied materials & interfaces*, 8(21), 13542-13554.
- [98] Ootera, Y., Shimada, T., and Nakamura, S. (2016). *U.S. Patent No. 9,396,811*. Washington, DC: *U.S. Patent and Trademark Office*.
- [99] Ren, X., Pei, K., Peng, B., Zhang, Z., Wang, Z., Wang, X., and Chan, P. K. (2016). A Low-Operating-Power and Flexible Active-Matrix Organic-Transistor Temperature-Sensor Array. *Advanced Materials*, 28(24), 4832-4838.

- [100] Ha, W. H., Choo, M. H., and Im, A. S. (2002). Electrical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film deposited at low temperatures. *Journal of non-crystalline solids*, 303(1), 78-82.
- [101] Shin, K., Yang, C., Yang, S. Y., Jeon, H., and Park, C. E. (2006). Effects of polymer gate dielectrics roughness on pentacene field-effect transistors. *Applied physics letters*, 88(7), 072109.
- [102] Noh, H. Y., Seol, Y. G., Kim, S. I., and Lee, N. E. (2008). Mechanically flexible low-leakage nanocomposite gate dielectrics for flexible organic thin-film transistors. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 11(8), H218-H221.
- [103] Duenas, S., Castán, H., García, H., San Andrés, E., Toledano-Luque, M., Mártil, I., González-Díaz, G., Kukli, K., Uustare, T. and Aarik, J. (2005). A comparative study of the electrical properties of TiO<sub>2</sub> films grown by high-pressure reactive sputtering and atomic layer deposition. *Semiconductor science and technology*, 20(10), 1044.
- [104] Ebraheem, S., and El-Saied, A. (2013). Band gap determination from diffuse reflectance measurements of irradiated lead borate glass system doped with TiO<sub>2</sub> by using diffuse reflectance technique. *Materials Sciences and Applications*, 4(05), 324.
- [105] Wang, G., Moses, D., Heeger, A. J., Zhang, H. M., Narasimhan, M., and Demaray, R. E. (2004). Poly (3-hexylthiophene) field-effect transistors with high dielectric constant gate insulator. *Journal of applied physics*, 95(1), 316-322
- [106] Kim, J., Lim, S. H., and Kim, Y. S. (2010). Solution-Based TiO<sub>2</sub>-Polymer Composite Dielectric for Low Operating Voltage OTFTs. *Journal of the American Chemical Society*, 132(42), 14721-14723.
- [107] Maliakal, A., Katz, H., Cotts, P. M., Subramoney, S., and Mirau, P. (2005). Inorganic oxide core, polymer shell nanocomposite as a high K gate dielectric for flexible electronics applications. *Journal of the American Chemical Society*, 127(42), 14655-14662.

- [108] Lee, W. H., Wang, C. C., and Ho, J. C. (2009). Improved performance of pentacene field-effect transistors using a nanocomposite gate dielectric. *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 27(2), 601-605.
- [109] Park, J., Lee, J. W., Kim, D. W., Park, B. J., Choi, H. J., and Choi, J. S. (2009). Pentacene thin-film transistor with poly (methyl methacrylate-co-methacrylic acid)/TiO<sub>2</sub> nanocomposite gate insulator. *Thin Solid Films*, 518(2), 588-590.
- [110] Alam, A. U., Howlader, M. M. R., and Deen, M. J. (2014). The effects of oxygen plasma and humidity on surface roughness, water contact angle and hardness of silicon, silicon dioxide and glass. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 24(3), 035010.
- [111] Nigam, A., Schwabegger, G., Ahmed, R., Simbrunner, C., Sitter, H., Premaratne, M., and Rao, V. R. (2014, December). *Impact of morphology on charge carrier mobility in top gate C60 organic field effect transistors*. In *Emerging Electronics (ICEE), 2014 IEEE 2nd International Conference on* (pp. 1-3). IEEE.
- [112] Peng, X., Horowitz, G., Fichou, D., and Garnier, F. (1990). All-organic thin-film transistors made of alpha-sexithienyl semiconducting and various polymeric insulating layers. *Applied physics letters*, 57(19), 2013-2015.
- [113] Halik, M., Klauk, H., Zschieschang, U., Schmid, G., Radlik, W., and Weber, W. (2002). Polymer gate dielectrics and conducting-polymer contacts for high-performance organic thin-film transistors. *Advanced materials-deerfield beach then weinheim-*, 14(23), 1717-1722.
- [114] Jung, C., Maliakal, A., Sidorenko, A., and Siegrist, T. (2007). Pentacene-based thin film transistors with titanium oxide-polystyrene/polystyrene insulator blends: High mobility on high K dielectric films. *Applied physics letters*, 90(6), 062111.
- [115] Zhang, X. H., Tiwari, S. P., and Kippelen, B. (2009). Pentacene organic field-effect transistors with polymeric dielectric interfaces: Performance and stability. *Organic Electronics*, 10(6), 1133-1140.

- [116] Ge, F., Wang, X., Zhang, Y., Song, E., Zhang, G., Lu, H., Cho, K. and Qiu, L. (2017). Modulating the Surface via Polymer Brush for High-Performance Inkjet-Printed Organic Thin-Film Transistors. *Advanced Electronic Materials*, 3(1).
- [117] Kutz, M. (2002). *Handbook of materials selection*. John Wiley & Sons.
- [118] Jin, S. H., Yu, J. S., Lee, C. A., Kim, J. W., Park, B. G., and Lee, J. D. (2004). Pentacene OTFTs with PVA gate insulators on a flexible substrate. *Journal-Korean Physical Society*, 44, 181-184.
- [119] Yun, Y., Pearson, C., and Petty, M. C. (2009). Pentacene thin film transistors with a poly (methyl methacrylate) gate dielectric: Optimization of device performance. *Journal of Applied Physics*, 105(3), 034508.
- [120] Xiang, L., Wang, W., and Gao, F. (2016). Improving Mobility and Stability of Organic Field-Effect Transistors by Employing a Tetratetracontane Modifying PMMA Dielectric. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 63(11), 4440-4444.
- [121] Ye, X., Lin, H., Yu, X., Han, S., Shang, M., Zhang, L., Jiang, Q. and Zhong, J. (2015). High performance low-voltage organic field-effect transistors enabled by solution processed alumina and polymer bilayer dielectrics. *Synthetic Metals*, 209, 337-342.
- [122] Demana, A. L., Erouela, M., Lallemanda, D., Phaner-Goutorbea, M., Langc, P., and Tardya, J. (2005, August). Correlation between structural properties and stability of pentacene field effect transistors with a polymer/high-k oxide two layer gate dielectric. *In Optics & Photonics 2005* (pp. 59400E-59400E). International Society for Optics and Photonics.
- [123] Caironi, M., and Noh, Y. Y. (2015). *Large area and flexible electronics*. John Wiley & Sons.
- [124] Kim, C., Facchetti, A., and Marks, T. J. (2007). Gate Dielectric Microstructural Control of Pentacene Film Growth Mode and Field-Effect Transistor Performance. *Advanced Materials*, 19(18), 2561-2566.

- [125] Nunes Jr, G., Zane, S. G., and Meth, J. S. (2005). Styrenic polymers as gate dielectrics for pentacene field-effect transistors. *Journal of applied physics*, 98(10), 104503.
- [126] Norrman, K., Ghanbari-Siahkali, A., and Larsen, N. B. (2005). 6 Studies of spin-coated polymer films. *Annual Reports Section "C" (Physical Chemistry)*, 101, 174-201.
- [127] Basu, S., Adriyanto, F., and Wang, Y. H. (2014). Blending effect of 6, 13-bis (triisopropylsilylethynyl) pentacene–graphene composite layers for flexible thin film transistors with a polymer gate dielectric. *Nanotechnology*, 25(8), 085201.
- [128] Yang, S. Y., Shin, K., and Park, C. E. (2005). The effect of gate-dielectric surface energy on pentacene morphology and organic field-effect transistor characteristics. *Advanced functional materials*, 15(11), 1806-1814.
- [129] Kwon, J. H., Chung, M. H., Oh, T. Y., Bae, H. S., Park, J. H., Ju, B. K., and Yakuphanoglu, F. (2009). High-mobility pentacene thin-film phototransistor with poly-4-vinylphenol gate dielectric. *Sensors and Actuators A: Physical*, 156(2), 312-316.
- [130] Hwang, M., Lee, H. S., Jang, Y., Cho, J. H., Lee, S., Kim, D. H., and Cho, K. (2009). Effect of curing conditions of a poly (4-vinylphenol) gate dielectric on the performance of a pentacene-based thin film transistor. *Macromolecular research*, 17(6), 436-440.
- [131] Ruzgar, S., and Caglar, M. (2015). Copper (II) Phthalocyanine Based Field Effect Transistors with Organic/Inorganic Bilayer Gate Dielectric. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 10(6), 717-722.
- [132] Wang, W., Ma, D., Pan, S., and Yang, Y. (2012). Hysteresis mechanism in low-voltage and high mobility pentacene thin-film transistors with polyvinyl alcohol dielectric. *Applied Physics Letters*, 101(3), 033303.
- [133] Feng, L., Tang, W., Zhao, J., Cui, Q., Jiang, C., and Guo, X. (2014). All-solution-processed low-voltage organic thin-film transistor inverter on plastic substrate. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 61(4), 1175-1180.

- [134] Jiang, L. (2010). *Enhancement of field-effect mobility of organic thin film transistors*. (Doctoral dissertation, University of Illinois at Chicago)
- [135] Li, J., Liu, D., Miao, Q., and Yan, F. (2012). The application of a high-k polymer in flexible low-voltage organic thin-film transistors. *Journal of Materials Chemistry*, 22(31), 15998-16004.
- [136] Li, J., Du, J., Xu, J., Chan, H. L., and Yan, F. (2012). The influence of gate dielectrics on a high-mobility n-type conjugated polymer in organic thin-film transistors. *Applied physics letters*, 100(3), 21.
- [137] Cornil, J., Beljonne, D., Calbert, J. P., and Brédas, J. L. (2001). Interchain interactions in organic  $\pi$ -conjugated materials: impact on electronic structure, optical response, and charge transport. *Advanced materials*, 13(14), 1053-1067.
- [138] Bao, Z., Lovinger, A. J., and Dodabalapur, A. (1997). Highly ordered vacuum-deposited thin films of metallophthalocyanines and their applications in field-effect transistors. *Advanced Materials*, 9(1), 42-44.
- [139] Shtein, M., Mapel, J., Benziger, J. B., and Forrest, S. R. (2002). Effects of film morphology and gate dielectric surface preparation on the electrical characteristics of organic-vapor-phase-deposited pentacene thin-film transistors. *Applied physics letters*, 81(2), 268-270.
- [140] Kish, E. R., Nahm, R. K., Woll, A. R., and Engstrom, J. R. (2016). When the sequence of thin film deposition matters: Examination of organic-on-organic heterostructure formation using molecular beam techniques and in situ real time x-ray synchrotron radiation. *The Journal of Physical Chemistry C*, 120(11), 6165-6179.
- [141] Novotný, M., Šebera, J., Bensalah-Ledoux, A., Guy, S., Bulíř, J., Fitl, P., Vlček, J., Zákutná, D., Marešová, E., Hubík, P. and Kratochvílová, I. (2016). The growth of zinc phthalocyanine thin films by pulsed laser deposition. *Journal of Materials Research*, 31(01), 163-172.
- [142] Liu, D. (2014). *Interface Engineering of Organic Thin Film Transistors with Self-assembled Organophosphonic Acids* (Doctoral dissertation, The Chinese University of Hong Kong (Hong Kong)).

- [143] Smith, D. L., and Hoffman, D. W. (1996). *Thin-Film Deposition: Principles and Practice*. (Doctoral dissertation, University of Illinois at Chicago)
- [144] Shao, W., Dong, H., Jiang, L., and Hu, W. (2011). Morphology control for high performance organic thin film transistors. *Chemical Science*, 2(4), 590-600.
- [145] Bae, J. H., Lee, S. D., and Yu, C. J. (2013). Deposition rate dependent mobility of an organic transistor with an anisotropic polymeric insulator. *Solid-State Electronics*, 79, 98-103.
- [146] Zocco, A. T., You, H., Hagen, J. A., and Steckl, A. J. (2014). Pentacene organic thin-film transistors on flexible paper and glass substrates. *Nanotechnology*, 25(9), 094005
- [147] Hutchins, D. O., Weidner, T., Baio, J., Polishak, B., Acton, O., Cernetic, N., Ma, H. and Jen, A. K. Y. (2013). Effects of self-assembled monolayer structural order, surface homogeneity and surface energy on pentacene morphology and thin film transistor device performance. *Journal of Materials Chemistry C*, 1(1), 101-113.
- [148] Markov, I., and Milchev, A. (1985). Theory of epitaxy in a Frank-van der Merwe model with anharmonic interactions. *Thin Solid Films*, 126(1-2), 83-93.
- [149] Baskaran, A., and Smereka, P. (2012). Mechanisms of stranski-krastanov growth. *Journal of Applied Physics*, 111(4), 044321.
- [150] Abd-Elnaiem, A. M., Mebed, A. M., Gaber, A., and Abdel-Rahim, M. A. (2016). Tailoring the porous nanostructure of porous anodic alumina membrane with the impurity control. *Journal of Alloys and Compounds*, 659, 270-278.
- [151] Jia, Q. X., McCleskey, T. M., Burrell, A. K., Lin, Y., Collis, G. E., Wang, H., Li, A.D.Q and Foltyn, S. R. (2004). Polymer-assisted deposition of metal-oxide films. *nature materials*, 3(8), 529-532.
- [152] Gusev, E. (Ed.). (2006). *Defects in high-k gate dielectric stacks: nano-electronic semiconductor devices* (Vol. 220). Springer Science & Business Media.

- [153] Zaraska, L., Wierzbicka, E., Kurowska-Tabor, E., and Sulka, G. D. (2015). Synthesis of Nanoporous Anodic Alumina by Anodic Oxidation of Low Purity Aluminum Substrates. In *Nanoporous Alumina* (pp. 61-106). Springer International Publishing.
- [154] Katwal, G., Paulose, M., Rusakova, I. A., Martinez, J. E., and Varghese, O. K. (2016). Rapid growth of zinc oxide nanotube–nanowire hybrid architectures and their use in breast cancer-related volatile organics detection. *Nano letters*, 16(5), 3014-3021.
- [155] Kozma, L., and Olefjord, I. (1987). Basic processes of surface preparation and bond formation of adhesively joined aluminium. *Materials Science and Technology*, 3(10), 860-874.
- [156] Masuda, H., and Fukuda, K. (1995). Ordered metal nanohole arrays made by a two-step replication of honeycomb structures of anodic alumina. *science*, 268(5216), 1466.
- [157] Majewski, L. A., Grell, M., Ogier, S. D., and Veres, J. (2003). A novel gate insulator for flexible electronics. *Organic Electronics*, 4(1), 27-32.
- [158] Shingubara, S., Okino, O., Sayama, Y., Sakaue, H., and Takahagi, T. (1997). Ordered two-dimensional nanowire array formation using self-organized nanoholes of anodically oxidized aluminum. *Japanese journal of applied physics*, 36(12S), 7791.
- [159] Robertson, J. (2000). Band offsets of wide-band-gap oxides and implications for future electronic devices. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 18(3), 1785-1791.
- [160] Canulescu, S., Rechendorff, K., Borca, C. N., Jones, N. C., Bordo, K., Schou, J., Pleth Nielsen, L., Hoffmann, S.V. and Ambat, R. (2014). Band gap structure modification of amorphous anodic Al oxide film by Ti-alloying. *Applied Physics Letters*, 104(12), 121910.

- [161] Mankotia, D., Sharma, Y. C., and Sharma, S. K. (2014). Review of Highly Ordered Anodic Porous Alumina Membrane Development. *International Journal of Recent Research Aspects*, 1(2), 171-176.
- [162] Hunter, M. S., and Fowle, P. (1954). Determination of barrier layer thickness of anodic oxide coatings. *Journal of the Electrochemical Society*, 101(9), 481-485.
- [163] Habazaki, H., Nishimura, R., Okitsu, K., Inoue, H., Kiriyama, I., Kataoka, F., Sakairi, M. and Takahashi, H. (2014). The effects of film thickness and incorporated anions on pitting corrosion of aluminum with barrier-type oxide films formed in neutral borate and phosphate electrolytes. *Journal of solid state electrochemistry*, 18(2), 369-376.
- [164] Thompson, G. E., Furneaux, R. C., Wood, G. C., Richardson, J. A., and Goode, J. S. (1978). Nucleation and growth of porous anodic films on aluminium. *Nature*, 272(5652), 433-435.
- [165] Diggle, J. W., Downie, T. C., and Goulding, C. W. (1969). Anodic oxide films on aluminum. *Chemical Reviews*, 69(3), 365-405.
- [166] Schaur, S., and Stadler, D. P. (2010). *Electrochemical doping of organic field-effect transistors to improve contact resistances*. na. (M.S. Thesis, Johannes Kepler University)
- [167] D. R. Lide, editor. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Press, 82nd edition, 2001
- [168] Brodie, I., and Muray, J. J. (2013). *The physics of micro/nano-fabrication*. Springer Science & Business Media.
- [169] Xicheng J. (2015). *Self-supported PANI/WO<sub>3</sub> Hybrid Photocatalyst for Dye Remediation* (M.S. Thesis, SUNY Stony Brook).
- [170] Nuermaimaiti, A. (2010). *Studies on the Self-organization of Colloidal Nanoparticles at Interfaces* (Diploma Thesis, Uppsala University)
- [171] Spin Coating: A Guide to Theory and Techniques. (n.d.). Retrieved April 27, 2017, from <http://www.ossila.com/pages/spin-coating> (Erişim Tarih:2.10.2017)

- [172] Shockley, W., Sparks, M., and Teal, G. K. (1951). p–n Junction Transistors. *Physical Review*, 83(1), 151.
- [173] Lilienfeld J. E., (1926) "Method and Apparatus for Controlling Electric Currents," *U.S. Patent*, 1,745,175, granted. 1930
- [174] Lilienfeld J. E., "Amplifier for Electric Currents,( 1928)" *US. Patent* 1,877,140, granted 1932.
- [175] Heil, O. (1935). Improvements in or relating to electrical amplifiers and other control arrangements and devices. *British Patent*, 439(457), 10-14.
- [176] Kahng, D. (1976). A historical perspective on the development of MOS transistors and related devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 23(7), 655-657.
- [177] Sarace, J. C., Kerwin, R. E., Klein, D. L., and Edwards, R. (1968). Metal-nitride-oxide-silicon field-effect transistors, with self-aligned gates. *Solid-State Electronics*, 11(7), 653-660.
- [178] Yang, Y., and Wudl, F. (2009). Organic electronics: from materials to devices. *Advanced Materials*, 21(14-15), 1401-1403.
- [179] Tang, C. W. (1986). Two-layer organic photovoltaic cell. *Applied Physics Letters*, 48(2), 183-185.
- [180] Tang, C. W., VanSlyke, S. A., and Chen, C. H. (1989). Electroluminescence of doped organic thin films. *Journal of Applied Physics*, 65(9), 3610-3616.
- [181] Han, S., Zhuang, X., Shi, W., Yang, X., Li, L., and Yu, J. (2016). Poly (3-hexylthiophene)/polystyrene (P3HT/PS) blends based organic field-effect transistor ammonia gas sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 225, 10-15.
- [182] Sankaran, S., Glaser, K., Gärtner, S., Rödlmeier, T., Sudau, K., Hernandez-Sosa, G., and Colsmann, A. (2016). Fabrication of polymer solar cells from organic nanoparticle dispersions by doctor blading or ink-jet printing. *Organic Electronics*, 28, 118-122.
- [183] Fakher, S. J. (2014). *Advanced Study of Pentacene-based Organic Memory Structures* (Doctoral dissertation, Bangor University).

- [184] Tsumura, A., Koezuka, H., and Ando, T. (1986). Macromolecular electronic device: Field-effect transistor with a polythiophene thin film. *Applied Physics Letters*, 49(18), 1210-1212.
- [185] Ostroverkhova, O. (Ed.). (2013). *Handbook of organic materials for optical and (opto) electronic devices: properties and applications*. Elsevier.
- [186] Fjeldly, T. A., Shur, M., and Ytterdal, T. (1997). *Introduction to device modeling and circuit simulation*. John Wiley & Sons, Inc.
- [187] Dimitrakopoulos, C. D., Kymissis, I., Purushothaman, S., Neumayer, D. A., Duncombe, P. R., and Laibowitz, R. B. (1999). Low-Voltage, High-Mobility Pentacene Transistors with Solution-Processed High Dielectric Constant Insulators. *Advanced Materials*, 11(16), 1372-1375
- [188] Dimitrakopoulos, C. D., and Mascaro, D. J. (2001). Organic thin-film transistors: A review of recent advances. *IBM Journal of research and development*, 45(1), 11-27.
- [189] Yip, G. (2008). *Development of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Gate Dielectrics for Organic Thin-film Transistors* (Doctoral dissertation, University of Toronto).
- [190] Li, F. M., Vygranenko, Y., Koul, S., and Nathan, A. (2006). Photolithographically defined polythiophene organic thin-film transistors. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 24(3), 657-662.
- [191] Bittle, E. G., Basham, J. I., Jackson, T. N., Jurchescu, O. D., and Gundlach, D. J. (2016). Mobility overestimation due to gated contacts in organic field-effect transistors. *Nature communications*, 7.
- [192] Marks, T. J., Ha, Y. G., and Facchetti, A. (2016). *U.S. Patent No. 9,385,332*. Washington, DC: *U.S. Patent and Trademark Office*.
- [193] Ahn, C. H., Bhattacharya, A., Di Ventra, M., Eckstein, J. N., Frisbie, C. D., Gershenson, M. E., Goldman, A.M., Inoue, I.H., Mannhart, J., Millis, A.J. and Morpurgo, A. F. (2006). Electrostatic modification of novel materials. *Reviews of Modern Physics*, 78(4), 1185.

- [194] Ueno, K., Inoue, I. H., Akoh, H., Kawasaki, M., Tokura, Y., and Takagi, H. (2003). Field-effect transistor on SrTiO<sub>3</sub> with sputtered Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gate insulator. *Applied Physics Letters*, 83(9), 1755-1757.
- [195] Veres, J., Ogier, S., Lloyd, G., and De Leeuw, D. (2004). Gate insulators in organic field-effect transistors. *Chemistry of Materials*, 16(23), 4543-4555.
- [196] Wong, W. S., and Salleo, A. (Eds.). (2009). *Flexible electronics: materials and applications* (Vol. 11). Springer Science & Business Media.
- [197] Kaltenbrunner, M., Stadler, P., Schwödianer, R., Hassel, A. W., Sariciftci, N. S., and Bauer, S. (2011). Anodized Aluminum Oxide Thin Films for Room-Temperature-Processed, Flexible, Low-Voltage Organic Non-Volatile Memory Elements with Excellent Charge Retention. *Advanced Materials*, 23(42), 4892-4896.
- [198] Majewski, L. A., Schroeder, R., and Grell, M. (2005). One volt organic transistor. *Advanced Materials*, 17(2), 192-196.
- [199] Park, J., Park, S. Y., Shim, S. O., Kang, H., and Lee, H. H. (2004). A polymer gate dielectric for high-mobility polymer thin-film transistors and solvent effects. *Applied physics letters*, 85(15), 3283-3285
- [200] Ferrari, S., Perissinotti, F., Peron, E., Fumagalli, L., Natali, D., and Sampietro, M. (2007). Atomic layer deposited Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as a capping layer for polymer based transistors. *Organic electronics*, 8(4), 407-414.
- [201] Yang, F. Y., Chang, K. J., Hsu, M. Y., and Liu, C. C. (2008). Low-operating-voltage polymeric transistor with solution-processed low-k polymer/high-k metal-oxide bilayer insulators. *Organic Electronics*, 9(5), 925-929.
- [202] Card, H. C., and Rhoderick, E. H. (1971). Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4(10), 1589.
- [203] Yüksel, Ö. F., Ocak, S. B., and Selcuk, A. B. (2008). High frequency characteristics of tin oxide thin films on Si. *Vacuum*, 82(11), 1183-1186.

- [204] Shekar, B. C., Veeravazhuthi, V., Sakthivel, S., Mangalaraj, D., and Narayandass, S. K. (1999). Growth, structure, dielectric and AC conduction properties of solution grown PVA films. *Thin Solid Films*, 348(1), 122-129.
- [205] Ruzgar, S., and Caglar, M. (2017). Use of bilayer gate insulator to increase the electrical performance of pentacene based transistor. *Synthetic Metals*, 232, 46-51.
- [206] Newman, C. R., Frisbie, C. D., da Silva Filho, D. A., Brédas, J. L., Ewbank, P. C., and Mann, K. R. (2004). Introduction to organic thin film transistors and design of n-channel organic semiconductors. *Chemistry of Materials*, 16(23), 4436-4451.
- [207] Facchetti, A. (2007). Semiconductors for organic transistors. *Materials Today*, 10(3), 28-37.
- [208] Cui, Z., Zhou, C., Chen, Z., Ma, C., Zhao, J., and Su, W. (2016). *Printed electronics: Materials, technologies and applications*. John Wiley & Sons.
- [209] Rolland, A., Richard, J., Kleider, J. P., and Mencaraglia, D. (1993). Electrical properties of amorphous silicon transistors and MIS-devices: comparative study of top nitride and bottom nitride configurations. *Journal of the Electrochemical Society*, 140(12), 3679-3683.
- [210] McDowell, M., Hill, I. G., McDermott, J. E., Bernasek, S. L., and Schwartz, J. (2006). Improved organic thin-film transistor performance using novel self-assembled monolayers. *Applied Physics Letters*, 88(7), 073505.
- [211] Nugraha, M. I., Roger H., Satria Z. Bisri, H. Matsui, M. S., Wolfgang H., Jun T., and Maria A. L.. (2015) High mobility and low density of trap states in dual-solid-gated PbS nanocrystal field-effect transistors. *Advanced Materials*, 27(12) 2107-2112.
- [212] Campbell, J. C., and Tsang, W. E. (1985). *Semiconductors and Semimetal*, vol. 22D. Academic, New York.
- [213] Lee, S. W., Kim, D. W., Shin, H., Choi, J. S., Bae, J. H., Zhang, X., and Park, J. (2014). Effects of Polystyrene Gate Dielectrics with Various Molecular Weights on Electrical Characteristics of Pentacene Thin-Film Transistors. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 598(1), 129-134.

- [214] Puigdollers, J., Voz, C., Orpella, A., Quidant, R., Martin, I., Vetter, M., and Alcubilla, R. (2004). Pentacene thin-film transistors with polymeric gate dielectric. *Organic Electronics*, 5(1), 67-71.
- [215] Kang, G. W., Park, K. M., Song, J. H., Lee, C. H., and Hwang, D. H. (2005). The electrical characteristics of pentacene-based organic field-effect transistors with polymer gate insulators. *Current Applied Physics*, 5(4), 297-301.
- [216] Liu, C., Xu, Y., and Noh, Y. Y. (2015). Contact engineering in organic field-effect transistors. *Materials today*, 18(2), 79-96.
- [217] Wang, C. H., Islam, A. M., Yang, Y. W., Wu, T. Y., Lue, J. W., Hsu, C. H., Sinha, S. and Mukherjee, M. (2013). Crystalline Growth of Rubrene Film Enhanced by Vertical Ordering in Cadmium Arachidate Multilayer Substrate. *Langmuir*, 29(12), 3957-3967.
- [218] Kim, S. H., Jang, J., Jeon, H., Yun, W. M., Nam, S., and Park, C. E. (2008). Hysteresis-free pentacene field-effect transistors and inverters containing poly (4-vinyl phenol-co-methyl methacrylate) gate dielectrics. *Applied Physics Letters*, 92(18), 166.
- [219] Choi, J. M., Hwang, D. K., Jeong, S. H., Park, J. H., Kim, E., Kim, J. H., and Im, S. (2007). Polymer/AIO<sub>x</sub> bilayer dielectrics for low-voltage organic thin-film transistors. *Journal of The Electrochemical Society*, 154(5), H331-H335.
- [220] Majewski, L. A., Schroeder, R., and Grell, M. (2003). Flexible high capacitance gate insulators for organic field effect transistors. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 37(1), 21.
- [221] Majewski, L. A., Schroeder, R., Voigt, M., and Grell, M. (2004). High performance organic transistors on cheap, commercial substrates. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 37(24), 3367.
- [222] Aoki, Y., and Kunitake, T. (2004). Solution-based Fabrication of High- $\kappa$  Gate Dielectrics for Next-Generation Metal-Oxide Semiconductor Transistors. *Advanced Materials*, 16(2), 118-123.

- [223] Schwieger, T., Liu, X., Peisert, H., Adolphi, B., Kiriy, N., and Knupfer, M. (2005). Electronic properties of interfaces between different sexithiophenes and gold. *Journal of applied physics*, 97(12), 123712.
- [224] Yadav, S., and Ghosh, S. (2016). Amorphous strontium titanate film as gate dielectric for higher performance and low voltage operation of transparent and flexible organic field effect transistor. *ACS applied materials & interfaces*, 8(16), 10436-10442.
- [225] Park, B. J., Park, J. H., Choi, J. S., and Choi, H. J. (2010). Layer-by-layer structured polymer/TiO<sub>2</sub> thin film and its gate dielectric application. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 10(7), 4758-4761.
- [226] Chen, F. C., Chu, C. W., He, J., Yang, Y., and Lin, J. L. (2004). Organic thin-film transistors with nanocomposite dielectric gate insulator. *Applied Physics Letters*, 85(15), 3295-3297.
- [227] Tang, W., Li, J., Zhao, J., Zhang, W., Yan, F., and Guo, X. (2015). High-performance solution-processed low-voltage polymer thin-film transistors with low- $\kappa$ /high- $\kappa$  bilayer gate dielectric. *IEEE Electron Device Letters*, 36(9), 950-952.
- [228] Hwang, D. K., Oh, M. S., Hwang, J. M., Kim, J. H., and Im, S. (2008). Hysteresis mechanisms of pentacene thin-film transistors with polymer/oxide bilayer gate dielectrics. *Applied Physics Letters*, 92(1), 47.
- [229] Egginger, M., Bauer, S., Schwödianer, R., Neugebauer, H., and Sariciftci, N. S. (2009). Current versus gate voltage hysteresis in organic field effect transistors. *Monatshefte für Chemie-Chemical Monthly*, 140(7), 735-750
- [230] Wang, Y., Wang, D., Qing, X., and Kim, H. (2017). Synthesis and characterization of hysteresis-free zirconium oligosiloxane hybrid materials for organic thin film transistors. *Synthetic Metals*, 223, 226-233.
- [231] Lee, C. A., Park, D. W., Jung, K. D., Kim, B. J., Kim, Y. C., Lee, J. D., and Park, B. G. (2006). Hysteresis mechanism in pentacene thin-film transistors with poly(4-vinyl phenol) gate insulator. *Applied physics letters*, 89(26), 262120.

- [232] Kitamura, M., and Arakawa, Y. (2007). Low-voltage-operating complementary inverters with C 60 and pentacene transistors on glass substrates. *Applied Physics Letters*, 91(5), 053505.
- [233] Padma, N. (2016). Hydrophobic dielectric surface influenced active layer thickness effect on hysteresis and mobility degradation in organic field effect transistors. *Superlattices and Microstructures*, 90, 198-206.
- [234] Padma, N. (2015). Channel length influenced contribution of hole and electron trapping effect to threshold voltage stability in organic field effect transistors. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 39, 384-389.
- [235] Meijer, E. J., Tanase, C., Blom, P. W. M., Van Veenendaal, E., Huisman, B. H., De Leeuw, D. M., and Klapwijk, T. M. (2002). Switch-on voltage in disordered organic field-effect transistors. *Applied Physics Letters*, 80(20), 3838-3840.
- [236] Nam, S., Seo, J., Kim, H., and Kim, Y. (2015). 5 V driving organic non-volatile memory transistors with poly (vinyl alcohol) gate insulator and poly (3-hexylthiophene) channel layers. *Applied Physics Letters*, 107(15), 97\_1.
- [237] Baeg, K. J., Noh, Y. Y., Ghim, J., Lim, B., and Kim, D. Y. (2008). Polarity effects of polymer gate electrets on non-volatile organic field-effect transistor memory. *Advanced Functional Materials*, 18(22), 3678-3685.
- [238] Huang, W., Shi, W., Han, S., and Yu, J. (2013). Hysteresis mechanism and control in pentacene organic field-effect transistors with polymer dielectric. *AIP Advances*, 3(5), 052122.
- [239] Dey, A., Singh, A., Das, D., and Iyer, P. K. (2016). Photosensitive organic field effect transistors: the influence of ZnPc morphology and bilayer dielectrics for achieving a low operating voltage and low bias stress effect. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 18(47), 32602-32609.
- [240] Peng, Y., Lv, W., Yao, B., Fan, G., Chen, D., Gao, P., Zhou, M and Wang, Y. (2013). High performance near infrared photosensitive organic field-effect transistors realized by an organic hybrid planar-bulk heterojunction. *Organic Electronics*, 14(4), 1045-1051.

- [241] Saragi, T. P., Onken, K., Suske, I., Fuhrmann-Lieker, T., and Salbeck, J. (2007). Ambipolar organic phototransistor. *Optical Materials*, 29(11), 1332-1337.
- [242] Saragi, T. P. I., Pudzich, R., Fuhrmann, T., and Salbeck, J. (2004). Organic phototransistor based on intramolecular charge transfer in a bifunctional spiro compound. *Applied physics letters*, 84(13), 2334-2336.
- [243] Kang, H. S., Choi, C. S., Choi, W. Y., Kim, D. H., and Seo, K. S. (2004). Characterization of phototransistor internal gain in metamorphic high-electron-mobility transistors. *Applied physics letters*, 84(19), 3780-3782.
- [244] Hamilton, M. C., Martin, S., and Kanicki, J. (2004). Thin-film organic polymer phototransistors. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 51(6), 877-885.
- [245] Mansouri, S., Jouili, A., El Mir, L., Al-Ghamdi, A. A., and Yakuphanoglu, F. (2015). Studies of photosensitivity and photo-induced negative differential resistance (NDR) of TIPS-pentacene-poly (3-hexyl) thiophene blend organic thin film transistor. *Synthetic Metals*, 207, 1-12.
- [246] Romero, M. A., Martinez, M. A. G., and Herczfeld, P. R. (1996). An analytical model for the photodetection mechanisms in high-electron mobility transistors. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 44(12), 2279-2287.
- [247] Lopez-Sanchez, O., Lembke, D., Kayci, M., Radenovic, A., and Kis, A. (2013). Ultrasensitive photodetectors based on monolayer MoS<sub>2</sub>. *Nature nanotechnology*, 8(7), 497-501.
- [248] Prins, F., Buscema, M., Seldenthuis, J. S., Etaki, S., Buchs, G., Barkelid, M., Zwiller, V., Gao, Y., Houtepen, A.J., Siebbeles, L.D. and van der Zant, H. S. (2012). Fast and efficient photodetection in nanoscale quantum-dot junctions. *Nano letters*, 12(11), 5740-5743.
- [249] Buscema, M., Groenendijk, D. J., Blanter, S. I., Steele, G. A., van der Zant, H. S., and Castellanos-Gomez, A. (2014). Fast and broadband photoresponse of few-layer black phosphorus field-effect transistors. *Nano letters*, 14(6), 3347-3352.
- [250] Bube, R. H. (1992). *Photoelectronic properties of semiconductors*. Cambridge University Press

- [251] Rauch, T., Böberl, M., Tedde, S. F., Fürst, J., Kovalenko, M. V., Hesser, G., Lemmer, U., Heiss, W. and Hayden, O. (2009). Near-infrared imaging with quantum-dot-sensitized organic photodiodes. *nature photonics*, 3(6), 332-336.
- [252] Peng, Y., Huang, F., Zhang, J., Luo, X., Xu, K., Lv, W., Xu, S., Wang, Y., Tang, Y., Wei, Y. and Xu, Z. (2017). Broad spectral response photosensitive organic field-effect transistors realized by the hybrid planar-bulk heterojunction composed of three molecules with complementary optical absorption. *Organic Electronics*, 43, 27-32.
- [253] Marjanović, N., Singh, T. B., Dennler, G., Günes, S., Neugebauer, H., Sariciftci, N. S., Schwödiauer, R. and Bauer, S. (2006). Photoresponse of organic field-effect transistors based on conjugated polymer/fullerene blends. *Organic electronics*, 7(4), 188-194.
- [254] Labram, J. G., Wöbkenberg, P. H., Bradley, D. D. C., and Anthopoulos, T. D. (2010). Low-voltage ambipolar phototransistors based on a pentacene/PC 61 BM heterostructure and a self-assembled nano-dielectric. *Organic Electronics*, 11(7), 1250-1254.
- [255] Majewski, L. A., Schroeder, R., and Grell, M. (2005). Low-voltage, high-performance organic field-effect transistors with an ultra-thin TiO<sub>2</sub> layer as gate insulator. *Advanced Functional Materials*, 15(6), 1017-1022.
- [256] Deman, A. L., and Tardy, J. (2006). Stability of pentacene organic field effect transistors with a low-k polymer/high-k oxide two-layer gate dielectric. *Materials Science and Engineering: C*, 26(2), 421-426.
- [257] Wang, A., Kymissis, I., Bulovic, V., and Akinwande, A. I. (2006). Engineering density of semiconductor-dielectric interface states to modulate threshold voltage in OFETs. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 53(1), 9-13.
- [258] Hancock, J. M., Gifford, A. P., Champion, R. D., and Jenekhe, S. A. (2008). Block Co-oligomers for Organic Electronics and Optoelectronics: Synthesis, Photophysics, Electroluminescence, and Field-Effect Charge Transport of Oligothiophene-b-oligoquinoline-b-oligothiophene Triblock Co-oligomers.