

**EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**(DOKTORA TEZİ)**

**YENİ PERİLEN VE NAFTALEN TÜREVİ ORGANİK  
YARIİLETKENLERİN ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖR  
UYGULAMALARINDA KARAKTERİSTİK  
ÖZELLİKLERİNİN ANALİZİ**

**Cem TOZLU**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Sıddık İÇLİ**

**İkinci Danışmanı : Prof. Dr. Şener OKTİK**

**Güneş Enerjisi Anabilim Dalı**

**Bilim Dalı Kodu : 625.05.04**

**Sunuş Tarihi : 09.07.2010**

**Bornova-İZMİR**

**2010**



Cem TOZLU tarafından doktora tezi olarak sunulan “Yeni Perilen ve Naftalen Türevi Organik Yarıiletkenlerin Alan Etkili Transistör Uygulamalarında Karakteristik Özelliklerinin Analizi” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 09.07.2010 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

**Jüri Üyeleri:**

**İmza**

**Jüri Başkanı : Prof. Dr. Sıddık İÇLİ**  
**Raportör Üye : Yrd. Doç. Dr. Ceylan ZAFER**  
**Üye : Prof. Dr. Şener OKTİK**  
**Üye : Prof. Dr. Serdar ÖZÇELİK**  
**Üye : Doç. Dr. Canan VARLIKLI**



## ÖZET

**YENİ PERİLEN VE NAFTALEN TÜREVİ ORGANİK  
YARIİLETKENLERİN ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖR  
UYGULAMALARINDA KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİNİN  
ANALİZİ**

TOZLU, Cem

Doktora Tezi, Güneş Enerjisi Enstitüsü

Tez Yöneticisi: Prof. Dr. Sıddık İÇLİ

Haziran 2010, 99 sayfa

Bu tez çalışmasında farklı moleküler yapıdaki perilen ve naftalen organik yarıiletkenlerin aktif tabaka olarak kullanılan alan etkili organik transistör (OFET) yapısında farklı yüzey enerjilerine sahip polimer yalıtkan tabakalara bağlı elektriksel parametreleri çıkartılmıştır. Yapılan çalışmalarda kullanılan organik yarıiletkenler; çekirdek yapılarına etil-hekzil ve benzimidazol fonksiyonel gruplarının bağlı olduğu naftalen ve perilen moleküler yapılarıdır. Arilen bisimid yapıları olarak da isimlendirilen aynı fonksiyonel grupların bağlı olduğu bu molekül yapıların kullanılması ile OFET uygulamalarında aralarındaki performans farklılıkları ve sebepleri ortaya çıkartılmıştır. Etil hekzil perilen diimid organik yarıiletkeninden  $1,72 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ , etil hekzil naftalen diimid organik yarıiletkeninden  $9,06 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  maksimum elektron mobiliteleri elde edilmiştir.

Ayrıca absorpsiyon bandları görünür bölgeye doğru kaydırılmış naftalen bis-benzimidazol organik yarıiletkenin AM 1,5 spektral dağılımına sahip ışımada foto-OFET uygulaması yapılarak, optiksel sinyalin elektriksel sinyale çevrimi incelenmiştir. Foto-OFET yapısının ışımada foto-duyarlılığı tükenim bölgesinde ve yığınım bölgesinde sırasıyla 93,5 ve 1,82 dir. Foto-OFET'in tükenim ve yüksek yığınım bölgesinde foto-tepki değerleri sırasıyla 14,3 mA/W and 32,7 mA/W olarak bulunmuştur.

**Anahtar sözcükler:** Organik yarıiletken temelli alan etkili transistör, perilen, naftalen, foto-OFET, polimer yalıtkan



**ABSTRACT****CHARACTERISTIC PROPERTY ANALYSES OF NOVEL  
PERYLENE AND NAPHTHALENE DERIVATIVE ORGANIC  
SEMICONDUCTORS ON APPLICATION OF FIELD EFFECT  
TRANSISTORS**

TOZLU, Cem

PhD in Solar Energy Institute

Supervisor: Prof. Dr. Sıddık İÇLİ

June 2010, 99 pages

In this thesis, the electrical parameters of perylene and naphthalene organic semiconductors with different molecular structures used as active layers in organic field-effect transistor (OFET) devices were extracted depending on polymeric insulators with different surface energies. The organic semiconductors used in the studies are perylene and naphthalene molecular structures substituted with ethyl-hexyl and benziimidazole functional groups. The differences on performances and reasons between these molecular structures also called as arylene bisimides with same substitutions were investigated in OFET applications. The maximum electron mobilities were found to be  $1,72 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  for ethyl-hexyl perylene diimide (EHPDI) and  $9,06 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  for ethyl-hexyl naphthalene diimides (EHNDI).

Furhermore, the conversion of optical signal to electrical signal was investigated for photo-OFET application by using naphthalene bis-benzimidazole (NBBI) organic semiconductor that the absorption bands were shifted to visible region under AM 1,5 illumination conditions. The photosensitivity of photo-OFET was found to be 93,5 and 1,82 at depletion and strong accumulation regions, respectively. The photo-responsivity of photo-OFET was found to be 14,3 mA/W and 32,7 mA/W at depletion and strong accumulation regions, respectively.

**Keywords:** Field-effect transistor based on organic semiconductor, perylene, naphthalene, photo-OFET, polymeric insulator.





**TEŞEKKÜR**

Doktora eğitimimde bana yeni bir bilimsel çalışma alanı sağlayan, ufkumu genişleten ve verdiği çalışma olanakları ile doktora eğitimimi tamamlamada yardımcı olan saygıdeğer hocam ve danışmanım Prof. Dr. Sıddık İÇLİ'ye en içten duygularıyla teşekkürü borç bilirim.

Bilim adamı olma yolunda bana verdiği imkânlar ile bu yolda ilk adımımı atmamı sağlayan, bilimsel ahlak ve engin bilgileri ile bilimsel yolda doğru hedeflere yönelmemi sağlayan ve doktora eğitimim boyunca bana verdiği desteğinden dolayı saygıdeğer hocam Prof. Dr. Şener OKTİK'e teşekkürü borç bilirim.

Doktora çalışmalarımda güncel gelişmeleri ve teknolojik imkanları bana sunarak çalışmalarına ışık tutan Prof. Dr. N. Serdar SARIÇİFTÇİ'ye ve Prof. Dr. Th. Birendra Singh'e teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarda sentezlemiş oldukları maddeler ile tezime katkıda bulunan Doç. Dr. Şule ERTEN ELA'ya ve Yrd. Doç. Dr. Mahmut KUŞ'a, bu tezin oluşumu sırasında bana karşı destek ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Doç. Dr. Canan VARLIKLI, Yrd. Doç. Dr. Şerafettin DEMİÇ, Yrd. Doç. Dr. Ceylan ZAFER, Ar. Gör. Mustafa CAN, Ar. Gör. Burak GÜLTEKİN, Cihan ÖZSOY, Emre AKIN ve fotokimya grubundaki diğer tüm arkadaşlarıma sonsuz teşekkürler.

Son olarak hayatım boyunca her türlü maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen Anne ve Baba'ma, her zaman yanımda olduğunu bildiğim ve varlığından güç aldığım Dedem'e, yaşamı boyunca benim için hep dua eden ve varlığını hissettiğim Anneannem'e ve saygılarını eksik etmeyen kardeşlerime sonsuz teşekkürler.

Bu tezi rahmetli Anneannem'e ithaf ediyorum.

Temmuz, 2010

İZMİR



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------|-----|
| ÖZET .....                                                          | V   |
| ABSTRACT .....                                                      | VII |
| TEŞEKKÜR .....                                                      | IX  |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                               | XIV |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                             | XIX |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....                                | XX  |
| 1. GİRİŞ .....                                                      | 1   |
| 2. ORGANİK YARIİLETKENLERİN FİZİĞİ .....                            | 4   |
| 2.1. Organik Yarıiletkenler .....                                   | 4   |
| 2.2. Organik Yarıiletkenlerde Enerji Bandlarının Oluşumu .....      | 5   |
| 2.3. Organik Yarıiletkenlerde Yük Taşıyıcı Transferi .....          | 7   |
| 3. ALAN ETKİLİ ORGANİK TRANSİSTÖR (OFET) .....                      | 9   |
| 3.1. Alan Etkili Organik Transistörlerin Yapısı .....               | 9   |
| 3.2. Alan Etkili Organik Transistörün (OFET) Çalışma Prensibi ..... | 11  |
| 3.3. OFET Yapılarında Kullanılan Kapı Yalıtkan Malzemeler .....     | 19  |
| 3.4. OFET Yapılarında Kullanılan Organik Yarıiletkenler .....       | 22  |
| 3.4.1. p – Tipi Organik Yarıiletkenler .....                        | 22  |

|        |                                                                   |    |
|--------|-------------------------------------------------------------------|----|
| 3.4.2. | n-Tipi Organik Yarıiletkenler .....                               | 26 |
| 3.4.3. | Perilen ve Naftalen Organik Yarıiletkenler .....                  | 28 |
| 4.     | DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....                                         | 33 |
| 4.1.   | Alan Etkili Organik Transistör Yapısı .....                       | 33 |
| 4.1.1. | Altlık Hazırlanması .....                                         | 33 |
| 4.1.2. | Polimerik Yalıtkan filmlerin hazırlanması .....                   | 33 |
| 4.1.3. | Yarıiletken katmanların hazırlanması .....                        | 35 |
| 4.1.4. | Metal Kontakların Hazırlanması .....                              | 36 |
| 4.1.5. | Alan etkili organik transistörlerin Karakterizasyonu .....        | 37 |
| 5.     | SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER .....                                | 40 |
| 5.1.   | Organik yarıiletkenler .....                                      | 40 |
| 5.1.1. | Perilen Diimid türevleri .....                                    | 40 |
| 5.1.2. | Naftalen Diimid türevleri .....                                   | 43 |
| 5.2.   | Yalıtkan Malzemeler .....                                         | 47 |
| 5.2.1. | Polivinil Alkol Polimerik Yalıtkan Film Özellikleri .....         | 47 |
| 5.2.2. | Benzocyclobutene (BCB) Polimerik Yalıtkan Film Özellikleri ...    | 49 |
| 5.3.   | Alan etkili organik transistör (OFET) Sonuçları .....             | 52 |
| 5.3.1. | Polimer Yalıtkan Tabakaların OFET Performansı Üzerindeki Etkileri | 52 |
| 5.3.2. | Alkil Grupların OFET Yapıları Üzerindeki Etkileri .....           | 62 |

### XIII

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| 5.3.3. Işık Duyarlı OFET (Foto-OFET) Çalışmaları ..... | 70 |
| 6. SONUÇLAR .....                                      | 81 |
| KAYNAKLAR DİZİNİ.....                                  | 84 |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                          | 96 |



## ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>Şekil</u>                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <u>Sayfa</u> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 1.1.OLED ve OFET yapılarının kullanıldığı esnek yapıdaki aktif matris ışık yayan organik diyod (AMOLED) görüntüleme örneği .....                                                                                                                                                              | 2            |
| Şekil 1.2. Alan etkili organik transistörlerden elde edilen yük taşıyıcı mobilite değerlerinin yıllara göre gelişimi.....                                                                                                                                                                           | 2            |
| Şekil 2.1. Etilen molekülündeki a) $\sigma$ ve $\pi$ bağları oluşumu, b) moleküler orbital enerji seviyeleri.....                                                                                                                                                                                   | 6            |
| Şekil 2.2. (a) atom, (b) iki atomlu bir molekül ve (c) polimer yapıdaki moleküllerin orbital enerjileri ve enerji bandlarının oluşumu. ....                                                                                                                                                         | 6            |
| Şekil 2.3. Polimer molekülün iki rezonans durumu. ....                                                                                                                                                                                                                                              | 7            |
| Şekil 2.4. Politiyofen polimer yapısında (a) pozitif polaron (radikal katyonu) ve (b) negatif polaron (radikal anyonu) oluşumu ve band aralığında oluşan yeni enerji seviyeleri.....                                                                                                                | 8            |
| Şekil 3.1. Temel ince film transistör yapıları. ....                                                                                                                                                                                                                                                | 10           |
| Şekil 3.2. OFET bağlantı şeması ve geometrik parametreleri.....                                                                                                                                                                                                                                     | 11           |
| Şekil 3.3. OFET yapısının a) $V_{gs}$ , $V_{ds} = 0$ V değerinde ideal enerji seviyesi diyagramı, b) elektron yığılma bölgesinde çalışma prensibinin gösterimi, c) boşluk yığılması, d) elektron yük taşıyıcılarının hareketi e) boşluk yük taşıyıcılarının hareketi .....                          | 12           |
| Şekil 3.4. n-Kanal alan etkili transistörün farklı $V_{gs}$ gerilimlerine karşı çalışma eğrisi .....                                                                                                                                                                                                | 13           |
| Şekil 3.5. Alan etkili organik transistörde yük taşıyıcı konsantrasyonun uygulanan gerilimlere bağlı olarak kanal boyunca değişimi (a) Lineer bölge ( $V_{ds} < V_{gs} - V_{th}$ ) (b) kısırılma bölgesi ( $V_{ds} \approx V_{gs} - V_{th}$ ) (c) doyum bölgesi ( $V_{ds} > V_{gs} - V_{th}$ )..... | 15           |

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

|                                                                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.6. n-kanal alan etkili organik transistörün sabit $V_{ds}$ gerilim değerinde transfer eğrisi. ....                                                                                     | 16 |
| Şekil 3.7. Farklı dielektrik tabakalar üzerinde fonksiyonel grupların elektron tuzaklama verimliliklerinin şematik gösterimi. ....                                                             | 20 |
| Şekil 3.8. Alan etkili organik transistörlerde kullanılan bazı polimer dielektrik malzemeler.....                                                                                              | 22 |
| Şekil 3.9. p-Tipi polimer yarıiletkenlerin molekül yapıları a) Polihekziltiyofen (P3HT), b) Policarbazole türevleri, c) Fluoren-trifenil (kopolimer) amin türevi ..                            | 24 |
| Şekil 3.10. Asen türevleri .....                                                                                                                                                               | 25 |
| Şekil 3.11. Temel oligomer yapıları .....                                                                                                                                                      | 26 |
| Şekil 3.12. n-Tipi yarıiletken özelliği gösteren organik yarıiletkenlerin molekül yapıları (a) metal fitalosiyanın türevlerinden $F_{16}CuPc$ , $Cl_{16}Pc$ (b) $C_{60}$ ve PCBM               | 28 |
| Şekil 3.13. Perilen diimid molekülünün (a) hidrokarbon düz zincirli ve (b) floroalkil düz zincirli türevlerinin moleküller arası boşluk doldurma modeli.....                                   | 30 |
| Şekil 3.14. OFET yapılarında kullanılan (a) Perilen diimid türevleri (b) naftalen diimid türevleri (c) NDI türevinin kullanıldığı saydam ve esnek organik ince film transistör görüntüsü ..... | 32 |
| Şekil 4.1. Deneysel çalışmalarda hazırlanan alan etkili organik transistörün kesit yapısı.....                                                                                                 | 33 |
| Şekil 4.2. Polivinil alkol polimer yalıtkanın molekül yapısı. ....                                                                                                                             | 34 |
| Şekil 4.3. Döndürme kaplama sistemi .....                                                                                                                                                      | 34 |
| Şekil 4.4. BCB monomerin ve polimerin moleküler yapıları.....                                                                                                                                  | 35 |
| Şekil 4.5. Termal buharlaştırma sistemi. ....                                                                                                                                                  | 36 |



## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

|                                                                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.6. Metal/yalıtkan/metal yapısının şematik gösterimi.....                                                                                                                                               | 37 |
| Şekil 4.7. Elektriksel ölçümlerin yapıldığı glove box sistemi.....                                                                                                                                             | 37 |
| Şekil 4.8. Kapasitans-gerilim (C-V) ölçüm düzeneği .....                                                                                                                                                       | 38 |
| Şekil 5.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan perilen diimid türevlerinin molekül yapıları .....                                                                                                                 | 40 |
| Şekil 5.2. a) EHPDI ve b) PBBI organik yarıiletkenlerin $5 \times 10^{-5} \text{M}$ kloroform çözeltilislerinin oda sıcaklığında absorpsiyon spektrumları.....                                                 | 41 |
| Şekil 5.3. a) EHPDI ve b) PBBI organik yarıiletkenlerin döngüsel voltametri ile alınan elektro kimyasal indirgenme ve yükseltgenme potansiyelleri. ....                                                        | 43 |
| Şekil 5.4. Deneysel çalışmalarda kullanılan naftalen diimid türevlerinin molekül yapıları .....                                                                                                                | 44 |
| Şekil 5.5. a) EHNDI ve b) NBBI organik yarıiletkenlerin $6 \times 10^{-5} \text{M}$ kloroform çözeltilislerinin oda sıcaklığında alınmış absorpsiyon spektrumları. ....                                        | 45 |
| Şekil 5.6. a) EHNDI ve b) NBBI organik yarıiletkenlerin döngüsel voltametri ile alınan elektro kimyasal indirgenme ve yükseltgenme potansiyelleri. ....                                                        | 47 |
| Şekil 5.7. PVA temelli MIM yapısının kapasitans-gerilim grafiği.....                                                                                                                                           | 48 |
| Şekil 5.8. PVA yalıtkan filmin a) iki ve b)üç boyutlu AFM görüntüleri .....                                                                                                                                    | 49 |
| Şekil 5.9. BCB temelli MIM yapısının kapasitans-gerilim grafiği.....                                                                                                                                           | 50 |
| Şekil 5.10. BCB yalıtkan filmin a)iki ve b)üç boyutlu AFM görüntüleri .....                                                                                                                                    | 51 |
| Şekil 5.11. Farklı $V_{gs}$ gerilimlerde NBBI ve PBBI organik yarıiletken temelli OFET yapıların BCB ve PVA yalıtkan üzerindeki çalışma karakteristikleri a) NBBI-I, b) PBBI-I, c) NBBI-II ve d) PBBI-II. .... | 54 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

|                                                                                                                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5.12. Üretilen OFET yapıların transfer karakteristikleri a) NBBI-I, b) PBBI-I, c) NBBI-II, d) PBBI-II. ....                                                                                                    | 57 |
| Şekil 5.13. a) NBBI b) PBBI yarıiletken filmlerin BCB yalıtkan üzerindeki wave modda alınmış AFM görüntüleri. ....                                                                                                   | 60 |
| Şekil 5.14. a) NBBI b) PBBI yarıiletken filmlerin PVA yalıtkan üzerindeki wave modda alınmış AFM görüntüleri. ....                                                                                                   | 61 |
| Şekil 5.15. Farklı $V_{gs}$ gerilimlerde EHNDI ve EHPDI organik yarıiletken temelli OFET yapıların BCB ve PVA yalıtkan üzerindeki çalışma karakteristikleri a) EHNDI-I, b) EHPDI-I, c) EHNDI-II ve b) EHPDI-II. .... | 64 |
| Şekil 5.16. Üretilen OFET yapıların transfer karakteristikleri a) EHNDI-I, b) EHPDI-I, c) EHNDI-II, d) EHPDI-II. ....                                                                                                | 67 |
| Şekil 5.17. a) EHNDI yarıiletken filmin PVA üzerinde ve b) EHPDI yarıiletken filmin BCB üzerinde wave moda alınmış AFM görüntüleri. ....                                                                             | 70 |
| Şekil 5.18. Foto-OFET yapısının arakesit görünümü. ....                                                                                                                                                              | 72 |
| Şekil 5.19. NBBI organik yarıiletkenin çözelti içinde ve film üzerindeki absorpsiyon spektrumu. ....                                                                                                                 | 72 |
| Şekil 5.20. NBBI temelli foto-OFET yapısının karanlık altında çalışma karakteristiği. ....                                                                                                                           | 73 |
| Şekil 5.21. Foto-OFET yapısının $V_{ds} = 80$ V sabit gerilim ve karanlık altında transfer karakteristiği. ....                                                                                                      | 74 |
| Şekil 5.22. Kapı gerilimine bağlı elektron mobilite değerinin değişim grafiği. ....                                                                                                                                  | 75 |
| Şekil 5.23. NBBI yarıiletken temelli OFET yapısının farklı ışınım şiddetlerindeki çalışma karakteristiği. Tüm ışınım şiddetlerinde $V_{gs} = 0$ V değerinde sabit tutulmuştur. ....                                  | 76 |

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5.24. NBBI yarıiletken temelli OFET yapısının farklı ışınlam altında transfer karakteristiği. ....             | 77 |
| Şekil 5.25. Kapı gerilimine bağlı olarak transistörün yığılma ve tükenim bölgelerinde foto-duyarlılık değişimi ..... | 78 |
| Şekil 5.26. Foto-akımın ışınlam şiddetine bağlı tükenim ve yüksek yığılma bölgesinde değişimi. ....                  | 79 |
| Şekil 5.27. Kapı gerilimine bağlı olarak transistörün yığılma ve tükenim bölgelerindeki foto-tepki değişimi.....     | 80 |

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

| <u>Çizelge</u>                                                                                  | <u>Sayfa</u> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Çizelge 5.1. EHPDI ve PBBI'nın döngüsel voltametri sonuçları ve enerji seviyeleri.....          | 42           |
| Çizelge 5.2. EHNDI ve NBBI'nın döngüsel voltametri sonuçları ve enerji seviyeleri.....          | 46           |
| Çizelge 5.3. NBBI ve PBBI temelli OFET yapılarından elde edilen elektriksel parametreler.....   | 58           |
| Çizelge 5.4. EHNDI ve EHPDI temelli OFET yapılarından elde edilen elektriksel parametreler..... | 67           |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

 $\lambda$ 

### Açıklama

Dalgaboyu

 $\varepsilon$ 

Dielektrik katsayısı

 $\eta$ 

Kuantum verimliliği

 $hc/\lambda$ 

Foton Enerjisi

 $Z$ 

Kanal genişliği

 $L$ 

Kanal uzunluğu

 $d$ 

Yalıtkan tabaka kalınlığı

 $A_{\text{aktif}}$ 

Aktif alan

 $\mu$ 

Yük taşıyıcı mobilitesi

 $q$ 

Birim elektrik yükü

 $k$ 

Boltzmann sabiti

 $T$ 

mutlak sıcaklık

### Kısaltmalar

### Açıklama

OFET

Alan etkili organik transistör

OLED

Işık yayan organik diyot

MOSFET

Metal-oksit-yarıiletken alan etkili transistör

TFT

İnce film transistör

SAM

Kendiliğinden oluşmuş tek tabaka

**SİMGELER VE KISALTMALAR (devam)**

|                    |                                    |
|--------------------|------------------------------------|
| AFM                | Atomik kuvvet mikroskobu           |
| $V_{gs}$           | Kapı-kaynak gerilimi               |
| $V_{ds}$           | Akaç-kaynak gerilimi               |
| $I_{ds}$           | Akaç-kaynak akımı                  |
| $I_{ds,illum}$     | Akaç foto akımı                    |
| $E_G$              | Band aralığı                       |
| eV                 | Elektron volt                      |
| ITO                | İndiyum katkılı kalay oksit        |
| PVA                | Polivinil alkol                    |
| BCB                | Benzosiklo buten                   |
| PDI                | Perilen diimid                     |
| NDI                | Naftalen diimid                    |
| EHNDI              | Etil-hekzil naftalen diimid        |
| EHPDI              | Etil-hekzil perilen diimid         |
| SCE                | Doygun kalomel elektrot            |
| TBAPF <sub>6</sub> | Tetrabütilamonyum heksaklorofosfat |
| PBBI               | Perilen bis-benzimidazol           |
| NBBI               | Naftalen bis-benzimidazol          |

**SİMGELER VE KISALTMALAR (devam)**

|                  |                                                                   |
|------------------|-------------------------------------------------------------------|
| $E_F$            | Fermi enerji seviyesi                                             |
| LUMO             | En düşük enerjili boş moleküler orbital                           |
| HOMO             | En yüksek enerjili dolu moleküler orbital                         |
| $V_{FB}$         | Düz band potansiyeli                                              |
| $P_{opt}$        | Işık gücü                                                         |
| nm               | Nanometre                                                         |
| $n_o, p_o$       | Yük taşıyıcı konsantrasyonu                                       |
| $C_{yalıt}$      | Kapasitans                                                        |
| S                | Eşik altı eğim                                                    |
| $V_{th}$         | Eşik altı gerilim                                                 |
| Ag/AgCl          | Gümüş / gümüş klorür elektrot                                     |
| CV               | Döngüsel voltametri                                               |
| $\pi$            | Pi                                                                |
| PCBM             | Methanofulleren[6,6]fenil C <sub>61</sub> bütrik asit metil ester |
| C <sub>60</sub>  | Fulleren                                                          |
| SiO <sub>2</sub> | Silisyumokit                                                      |
| F                | Flor                                                              |
| Cl               | Klor                                                              |

**SİMGELER VE KISALTMALAR (devam)**

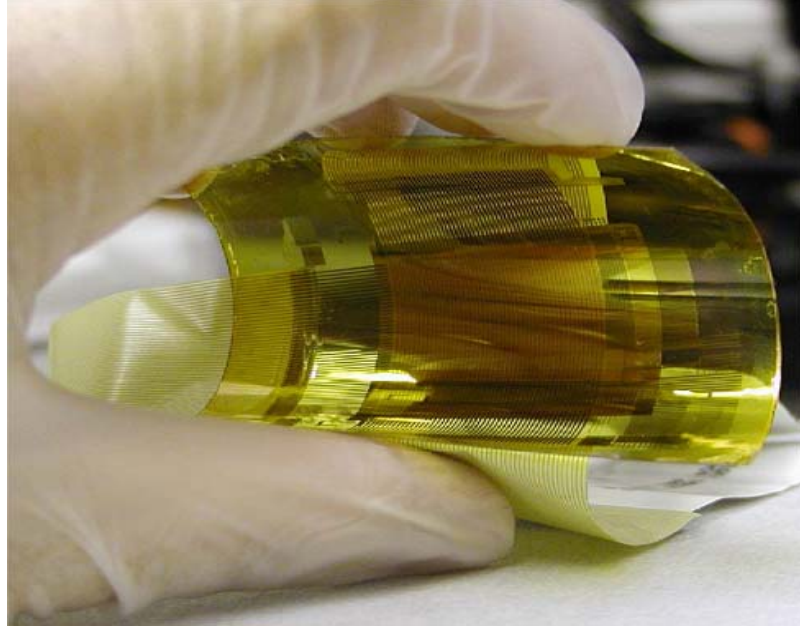
CN

Siyanür



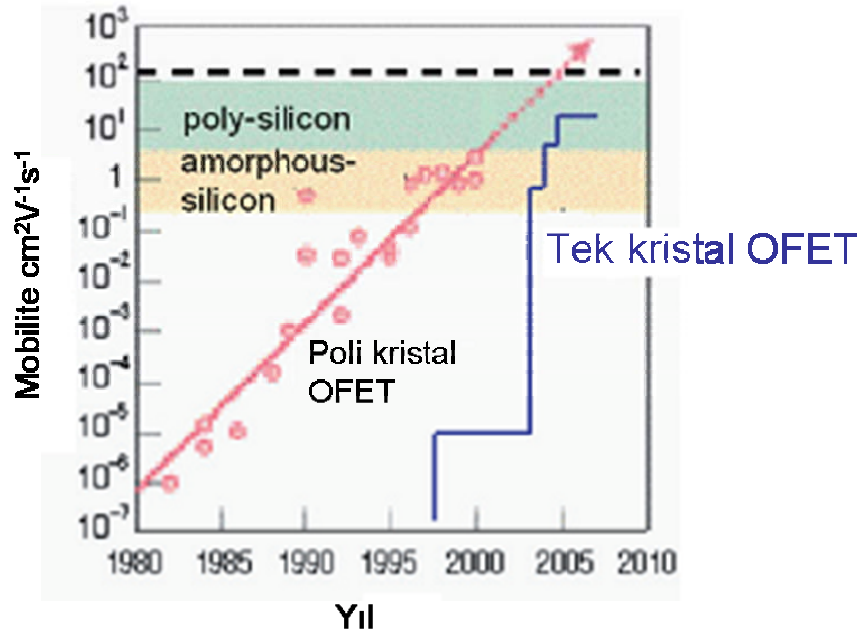
## 1. GİRİŞ

Organik yarıiletkenler ve polimerler 50 yıldan daha fazla süredir fizik ve kimya dallarının üzerine çalıştığı temel konulardan biri olmuştur. 1977 yılında polimer yapıların iletkenlik özelliğinin Heeger, MacDiarmid ve Shirakawa tarafından keşfi organik tabanlı elektronik aygıtlar için yeni bir alan yaratmıştır (Heeger 2000). Bu çalışmadan sonra tüm araştırmalar silisyum temelli yarıiletkenlere alternatif olabilecek molekül tasarımı ve bunların elektronik uygulamaları üzerine devam etmektedir. 1980 yıllarının sonunda Tang tarafından üretilen düşük gerilimlerde yüksek verimli organik yarıiletken tabanlı ışık yayan diyot uygulaması ile organik elektronik uygulamalarının ticari olarak marketlerde yer almasının önü açılmıştır (Tang et al., 1987). Işıma altında iletken polimer ile küçük organik moleküller arasında elektron transferinin gerçekleşmesi ise p-n eklemli güneş hücresi uygulamaları için temel çıkış noktası olmuştur (Sariciftci et al. 1992). Foto-elektrokimyasal güneş pili olarak isimlendirilen organik boya duyarlı nano kristal  $TiO_2$  güneş pili (DSSC) sahip olduğu yüksek verimlilik değerlerinden dolayı boya olarak isimlendirilen organik yarıiletkenlerin en dikkat çekici uygulamalarından biridir. Son yıllarda yapılan çalışmalar ise kuantum nokta olarak isimlendirilen inorganik malzemelerin organik yarıiletkenler ile bir araya getirilmesi ile oluşan hibrit güneş pili ve ışık yayan diyod uygulamaları üzerinedir. Organik tabanlı yarıiletkenlerin uygun çözenlerde hazırlanmış çözeltilerinden yola çıkarak, neşter çekme (screen printing), mürekkep püskürtme (ink-jet printing), döndürme (spin casting), daldırma (deep coating) gibi pahalı olmayan birçok kaplama teknikleri ile ince film yapılabilmelerinden dolayı organik tabanlı elektronik aygıtların üretim maliyetleri düşük olmaktadır. Molekül yapılarının kolaylıkla değiştirilebilmeleri, ince film üretim tekniklerinin basit olması ve düşük sıcaklıklarda kaplanabilmeleri nedeniyle plastik malzemeler üzerine esnek yapılı devre elemanlarının yapılabilmesi inorganik temelli yarıiletken uygulamalarına göre ticari uygulamalarda ön plana çıkmaktadır. Organik tabanlı ince film transistörlerin, plastik altlıklar üzerinde geniş alan devrelerin yapılmasına olanak sağlaması ile özellikle görüntü uygulamalarında sürücü devre sistemleri mimarisinde önemli bir yere sahip olacağı tahmin edilmektedir. Özellikle küçük çaplı tümleşik devre elemanı uygulaması ve organik ışık yayan diyot (OLED) tabanlı aktif ve pasif matris görüntü sistemlerinde sürücü devre uygulamaları (Şekil 1.1), yakın gelecekte geniş alanlara sahip esnek yapıda ve geçirgen görüntü sistemlerinde kullanılmasının habercisi olmaktadır.



Şekil 1.1.OLED ve OFET yapılarının kullanıldığı esnek yapıdaki aktif matris ışık yayan organik diyod (AMOLED) görüntüleme örneği (Zhou et al. 2006)

Geniş alan uygulamalarda ince film amorf-Si transistör yaygın olarak kullanılmakla birlikte Şekil 1.2 den görüldüğü gibi son yıllarda yapılan çalışmalar sonucunda organik yarıiletken temelli alan etkili transistörler amorf-Si teknolojisi ile rekabet edebilir seviyeye ulaşmıştır (Hasegawa et al. 2009).



Şekil 1.2. Alan etkili organik transistörlerden elde edilen yük taşıyıcı mobilite değerlerinin yıllara göre gelişimi (Hasegawa et al. 2009).

Bu tez çalışmasının deneysel kısmın birinci bölümünde saydam polimer yalıtkan tabakalar üzerine termal buharlaştırma tekniği ile kaplanan perilen ve naftalen organik yarıiletken türevlerinin alan etkili transistör yapısında kullanılması sonucu elde edilen akım-gerilim eğrilerinin yalıtkan malzemelerin yüzey enerjilerine bağlı olarak değişimleri tartışılmıştır. Yüzey enerjilerinin farklı olması için hidroksil grubu içeren polivinil alkol (PVA) ve hidroksil grubu içermeyen benzosiklobuten (BCB) dielektrik malzemeleri kullanılmıştır.

Deneysel kısmın ikinci bölümünde ise kullanılan organik yarıiletkenlerin molekül yapılarının alan etkili transistörün akım-gerilim eğrileri üzerindeki etkileri verilmiştir. Bu bölümde aynı fonksiyonel gruplara sahip arilen bisimid yapıları kullanılarak moleküller arasında kıyaslama çalışması yapılmıştır.

Üçüncü bölümde ise naftalen yarıiletken türevi ile yapılan çalışmada, foto-fiziksel özellikler incelenmiştir. Bu bölümde AM 1,5 spektral dağılım altında farklı ışınım şiddetlerine bağlı olarak elde edilen akım-gerilim verileriyle sensör parametreleri çıkartılmıştır. Foto-fiziksel parametrelerinin ışınım şiddetlerine ve uygulanan gerilimlere bağlı olarak değişimleri incelenmiş ve tartışılmıştır.

## 2. ORGANİK YARIİLETKENLERİN FİZİĞİ

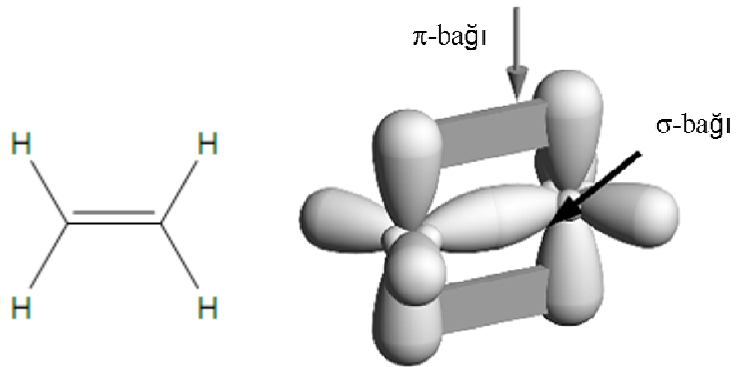
### 2.1. Organik Yarıiletkenler

Silikon ve germanyum gibi inorganik yarıiletken kristallerinde atomlar arası güçlü kovalent bağ yapısı ve atomların düzenli dizilimi, kristal yapı içerisinde birbirinden yasak enerji aralığı ile ayrılmış değerlik ve iletim bandı olmak üzere dekolalize enerji seviyelerinden oluşmuş enerji bandları oluşturmaktadır. Karbon kimyasına dayanan organik katılarda, molekül içerisindeki atomlar arası etkileşimler temel olarak kovalent bağ ile gerçekleşirken, moleküller arası etkileşimler zayıf van der Waals ve London kuvvetleri ile olmaktadır. Bundan dolayı organik katılarda yük taşıyıcılarının hareket edebildiği izinli bandlar daha sınırlı olmakta ve organik katıda bulunan bir düzensizlik band yapısını kolaylıkla bozmaktadır. İnorganik yarıiletkenlerde değerlik bandındaki bir elektron termal ya da foton uyarılma ile iletim bandına geçiş yaparken, değerlik bandında bir boşluk oluşmakta ve serbest halde bulunan iletim bandındaki elektron uygulanan elektrik alan ile kristal yapı içerisinde hareket edebilmektedir. Organik katılarda ise foton veya termal uyarılma ile oluşan elektron hareketi, organik katıların enerji seviyelerinden kaynaklanan sınırlama ile molekül içinde olabilmekte, moleküller arası elektron transferi inorganik katılardaki band teorisine uymamaktadır (Vissenberg, 1999). Karbonun orbitallerinin farklı türlerde melezleşebilmesi, tek, çift ve üçlü bağ olmak üzere farklı bağlanma türlerine izin vermektedir. Yarıiletken organik moleküllerin ortak elektronik özelliği bu melezleşme esnasında  $p_z$  veya  $p_y$  orbitallerinin örtüşmesi ile oluşan  $\pi$  konjugasyon sistemidir.  $p$  Orbitallerinin etkileşimi ile  $\pi$  elektronları olarak bahsedilen organik moleküldeki yük taşıyıcısı delokalize olmakta ve bir molekül boyunca bu delokalize enerji seviyeleri üzerinden hareket etmektedir. Bu tür moleküllere konjüge moleküller adı verilmektedir.

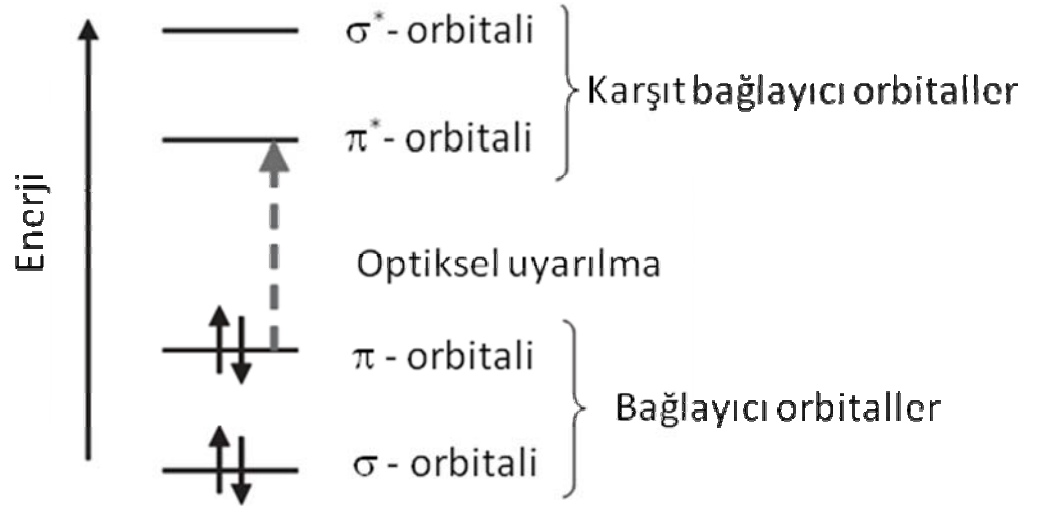
Konjüge organik yarıiletkenler; (i) birkaç tane tekrarlanan birim içeren oligomer moleküller, (ii) tekrarlanan birim sayısı 10 dan fazla olan moleküller olan polimerler ve (iii) bir kaç konjüge yapının oluşturduğu nispeten düşük molekül ağırlıklarına sahip makro moleküller olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır.

## 2.2. Organik Yarıiletkenlerde Enerji Bandlarının Oluşumu

Yarıiletken özellik gösteren organik moleküller, organik yapı boyunca karbon-karbon atomları arasında tek-çift veya tek-üçlü bağ tekrarlanması ile meydana gelen  $\pi$  konjüge sistemlerinden oluşmaktadır. Konjüge organik moleküllerin temel yapısında x-ekseni boyunca karbon-karbon arasında  $p_y$  veya  $p_z$  atomik orbitallerin üst üste binmesi ile oluşan ikili ve üçlü bağ yapısında, ikinci ve üçüncü bağlar  $\pi$  bağları olarak adlandırılmakta ve organik yarıiletkenlerde bu bağlarda bulunan yük taşıyıcıları  $\pi$  elektronları olarak adlandırılmaktadır. Karbon-karbon arasındaki tek bağ sigma,  $\sigma$ , bağı olarak adlandırılmakta ve Şekil 2.1 (b) de gösterilen bağ ve karşıt bağlayıcı ( $\sigma^*$ ) enerji seviyesi arasındaki fark büyük olmaktadır. Yalıtkan polimerler (plastik malzemeler) olarak bilinen moleküller arası sigma bağı yapmış malzemeler de temel enerji seviyesi ile bağ-karşıtı enerji seviyesi arasında elektron geçişleri için gerekli olan enerji miktarı çok büyük olmaktadır. Karbon-karbon arasında  $sp^2$  veya  $sp^3$  melezleşmesi sonucunda iki atom arasında mesafe azalırken,  $\sigma$  bağına göre daha zayıf olan  $\pi$  bağları meydana gelmektedir.  $\sigma$  ve  $\pi$  bağlarını içeren çift bağ yapmış moleküllerde elektronlar ile dolu olan temel enerji seviyesi ( $\pi$ ) ile karşıt bağlayıcı ( $\pi^*$ ) enerji seviyesi arasındaki fark azalmakta ve bu seviyeler arasındaki elektron geçişleri için gerekli olan enerji miktarı azalmaktadır. Karbon atomları arasındaki orbitallerin  $sp^2$  veya  $sp^3$  melezleşmesi ile organik moleküllerin yarıiletken özellikleri ortaya çıkmaktadır. Bağlayıcı orbitaller ve karşıt bağlayıcı orbitaller arasındaki enerji farkı 1,5-3 eV arasında olan organik moleküller yarıiletken sınıfına girmektedirler (Pope and Swenberg 1999, Shinar 2003). Şekil 2.1 de molekül içi  $\sigma$  -  $\pi$  bağı ve enerji seviyesi arasındaki ilişki verilmektedir.

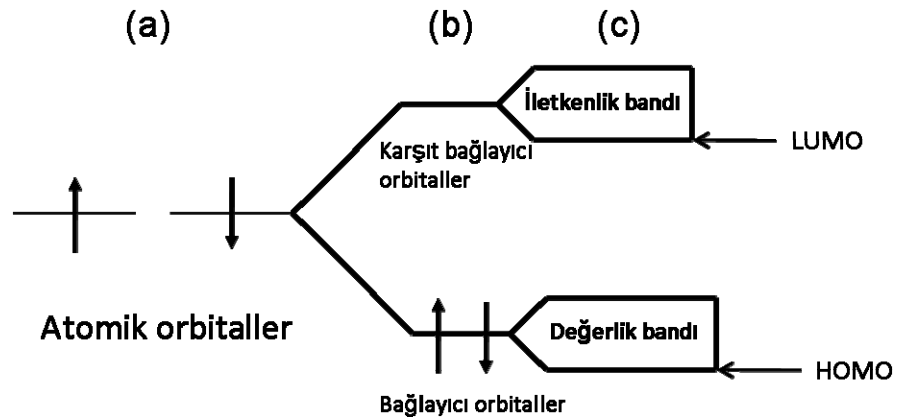


(a)



Şekil 2.1. Etilen molekülündeki a)  $\sigma$  ve  $\pi$  bağları oluşumu, b) moleküler orbital enerji seviyeleri (Kymissis, 2009).

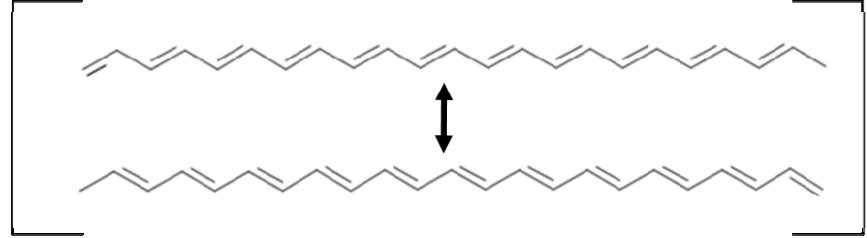
Ardışık birçok karbon atomunun tek ve çift bağ yapması ile oluşan moleküler katının, bağlayıcı ve karşıt bağlayıcı orbital enerji seviyeleri yarılmaya uğramakta ve bu enerji seviyelerinin üst üste gelmesi ile bir band oluşmaktadır. Kararlı haldeki düşük enerjili bağ yapmış molekül orbitallerin oluşturduğu banda HOMO (highest occupied molecular orbital), bağ-karşıtı moleküler orbitallerin oluşturduğu banda LUMO (lowest unoccupied molecular orbital) adı verilmekte ve bu iki band arasında izinli olmayan enerji aralığı oluşmaktadır. HOMO enerji bandı inorganik katıhal fiziğinde değerlik bandına karşılık gelirken, LUMO enerji bandı iletkenlik bandını temsil etmektedir.



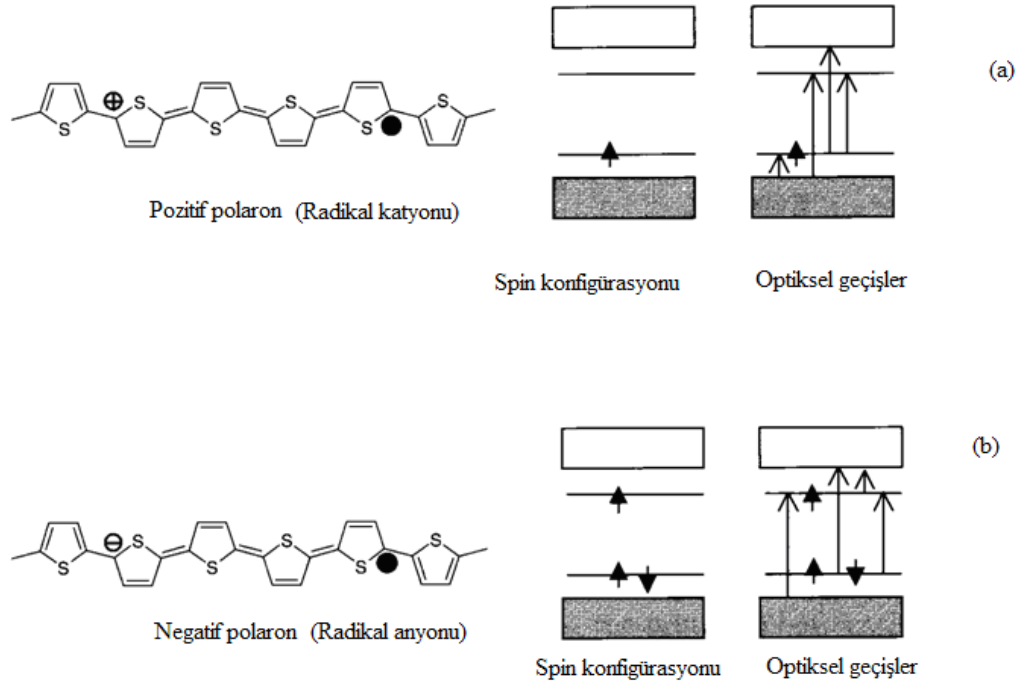
Şekil 2.2. (a) atom, (b) iki atomlu bir molekül ve (c) polimer yapıdaki moleküllerin orbital enerjileri ve enerji bandlarının oluşumu.

### 2.3. Organik Yarıiletkenlerde Yük Taşıyıcı Transferi

Yüksek konjugasyona sahip organik moleküllerde yük taşıyıcıların hareketi temel olarak Şekil 2.3 de gösterilen  $\pi$  bağlarındaki elektron bulutunun rezonans halleriyle açıklanmaktadır. Aromatik gruplara sahip birçok konjüge polimer moleküllerde, rezonans hallerindeki yapısal farklılıklarından dolayı iki farklı dejenere olmayan durum yoğunluğu yaratmakta olup bunların enerjetik durumları birbirinden farklı olmaktadır. Bu tür aromatik gruplar içeren konjüge polimer yapılarda yük taşıyıcıların transferi polaron, eksiton ve bipolaron vasıtasıyla gerçekleşmektedir. Aromatik konjüge polimer ya da oligomer molekül yapılarında foto-katkılama ya da elektro-kimyasal katkılama ile LUMO ya da HOMO seviyelerinde fazlalık yük yaratılabilmektedir. Yapı içerisinde oluşan bu fazlalık yük neticesinde aromatik grupların yapısında yerel bir şekil değişikliği meydana gelmektedir. Katkılama sonucunda konjüge molekül yapısında oluşan yerel değişiklik ile fazlalık yük çiftine polaron adı verilmektedir. Şekil 2.4 de verilen temel olarak gösterilen negatif veya pozitif polaronların konjüge sistemlerde oluşması ile HOMO/LUMO enerji bandları arasında yeni seviyeler oluşmaktadır ve bu durumlar optiksel geçişler ile belirlenebilmektedir. (Hadziioannou ve van Hutten 1999, Brabec and et al. 2003)



Şekil 2.3. Polimer molekülün iki rezonans durumu.



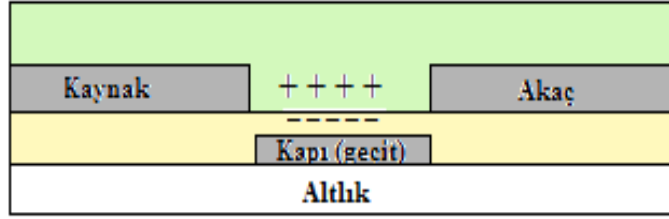
Şekil 2.4. Politiyofen polimer yapısında (a) pozitif polaron (radikal katyonu) ve (b) negatif polaron (radikal anyonu) oluşumu ve band aralığında oluşan yeni enerji seviyeleri (Brabec and et al. 2003).



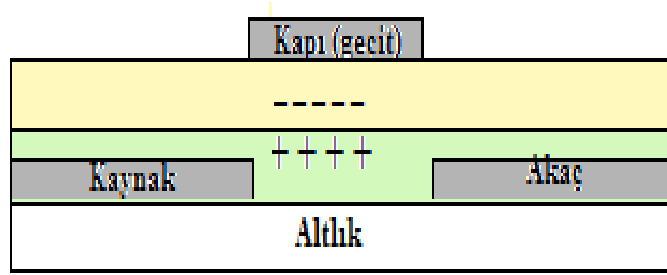
### 3. ALAN ETKİLİ ORGANİK TRANSİSTÖR (OFET)

#### 3.1. Alan Etkili Organik Transistörlerin Yapısı

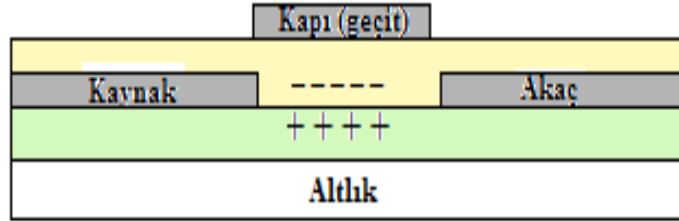
1930 yılında temel olarak iki plakalı bir kapasitör yapısına benzeyen alan etkili transistörün (FET) çalışma prensibinin Lilienfeld tarafından keşfedilmesi ile (Lilienfeld 1930) temelleri atılan ince film transistörlerin (TFT) Weimer tarafından 1962 yılında ortaya çıkartılması ile birlikte (Weimer 1962) bu düşünce düşük iletkenliğe sahip malzemelere uygulanmıştır ve özellikle amorf silikon teknolojisinde günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır (Powell and et al. 1981, Credelle 1988). İki kutuplu eklem transistörlerde akım yükseltim mekanizması p-n eklem diyotlardaki gibi uygulanan potansiyel üzerinden gerçekleşirken, alan etkili transistör de yarıiletken katmandan yalıtılmış üçüncü elektroda uygulanan gerilim ile oluşan kapasitif etkinin yarıiletken tabakada iletken bir kanal bölgesi oluşturulması temeline dayanmaktadır. Alan etkili transistörlerin iki kutuplu eklem transistörlere göre giriş empedanslarının yüksek olması, anahtarlama sistemlerinde sapma geriliminin olmaması, gürültü seviyelerinin düşük olması nedeniyle alçak ve yüksek frekanslarda kolaylıkla kullanabilmesi ve boyutlarının çok küçük olması nedeniyle yüksek işlemcili entegre devrelerde kolaylıkla kullanabilmeleri en önemli özellikleridir. Silisyum yarıiletken teknolojisi ile üretilen metal-oksit-yarıiletken alan etkili transistör (MOSFET) ile aynı çalışma prensibine sahip alan etkili organik transistörlerde (OFET) kullanılan yarıiletkenler tek tip yük taşıcılarına sahip olmasından dolayı, üretilen transistörler yığılma (accumulation) bölgesinde çalışmaktadır. MOSFET teknolojisinde kapı (gate) gerilimine bağlı olarak yığılma (accumulation), tükenim (depletion) ve ters yığılma (inversion) olmak üzere üç farklı bölge söz konusu iken, OFET teknolojisinde tükenim ve yığılma bölgeleri transistörlerin çalışma karakteristiğini oluşturmaktadır (Streetman 1972, Brown 1997). Şekil 3.1 de gösterildiği gibi dört temel OFET yapısı aktif olarak kullanılmaktadır (Shekar 2004). Şekil 3.1 (d) de gösterilen üst kontak ve alt kapı yapısı diğer geometrik yapılarla kıyaslandığında, etkin kontak alanının yüksek olmasından dolayı kanal akımının uygulanan gerilime bağlı olarak lineer davranış sergilemesi, düşük direnç sahip olması ve yapısal üretim kolaylığından dolayı ince film transistör uygulamalarında tercih edilmektedir. (Cosseddu et al. 2007, Anthopoulos et al. 2006, Street and A. Salleo 2002). Altın, bakır gibi saf metal kontaklar üzerine yapılan kaplamalarda, metallerin yüzey enerjileri organik moleküllerin dizilimini etkilemekte ve kanal boyunca yük hareketliliğini sağlayan molekül dizilimini süresiz hale getirerek dezavantaj oluşturmaktadır (Kymissis et al. 2001).



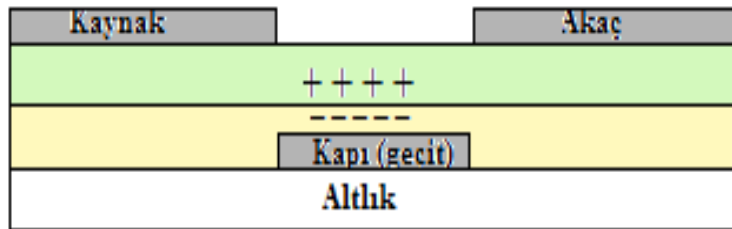
a) Alt kapı ve kontak yapısı



b) Üst kapı - alt kontak yapısı



c) Üst kapı ve kontak yapısı



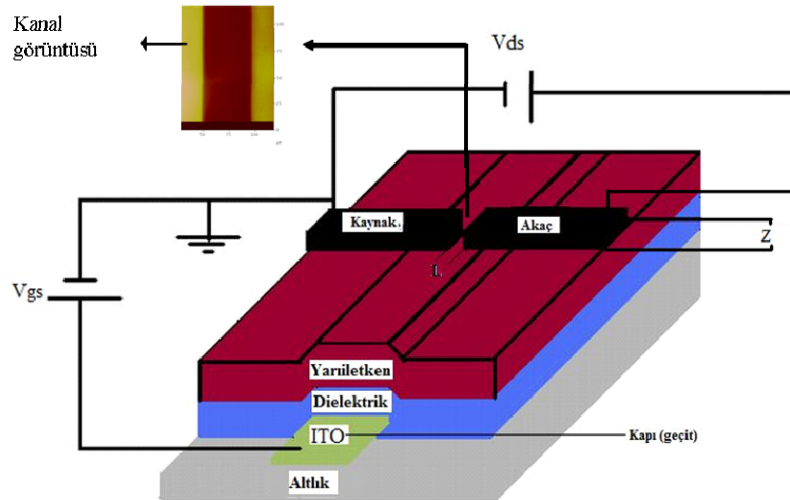
d) Alt kapı - üst kontak yapısı



Şekil 3.1. Temel ince film transistör yapıları.

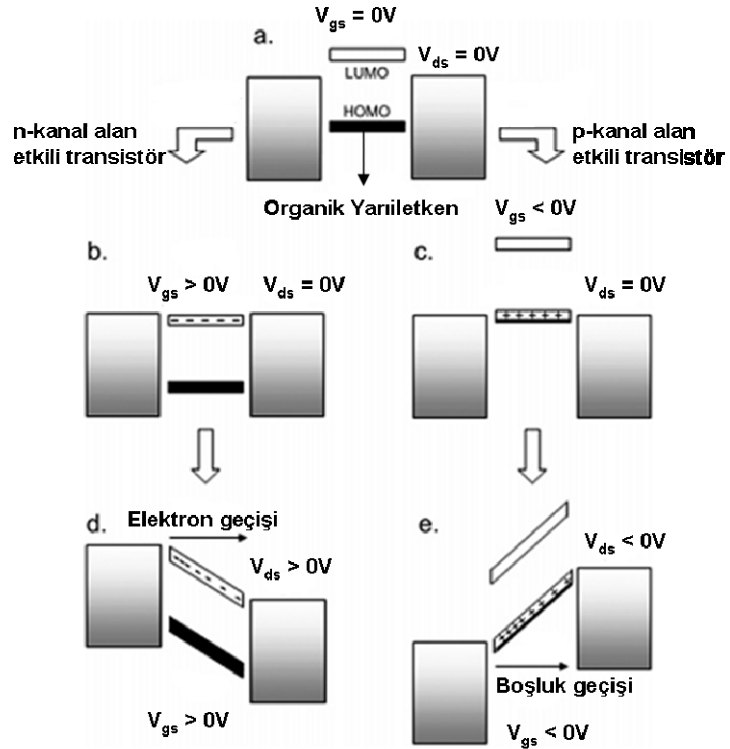
### 3.2. Alan Etkili Organik Transistörün (OFET) Çalışma Prensibi

Şekil 3.2 de OFET yapısının üst kesitten görünüşü ile geometrik yapı parametreleri olan akaç (drain)-kaynak (source) kanal uzunluğu ( $L$ ) ve kanal genişliği ( $W$ ) gösterilmektedir. Akaç ve kaynak arasına uygulanan gerilim akaç-kaynak gerilimi,  $V_{ds}$ , kapı (gate)-kaynak (source) arasına uygulanan gerilim ise  $V_{gs}$  olarak isimlendirilmektedir. Uygulanan  $V_{ds}$  geriliminde kaynaktan akaça doğru yarıiletken boyunca geçen akım  $V_{gs}$  gerilimin fonksiyonu olarak değişmektedir. n-tipi bir organik yarıiletkenin aktif tabaka olarak kullanılması durumunda Şekil 3.2 de gösterilen kapı elektroduna pozitif gerilim uygulanması ile kapı elektrodunda pozitif kutuplanmaya bağlı olarak kapı/yalıtkan arayüzeyinde pozitif yükler ve organik yarıiletken/yalıtkan ara yüzeyinde pozitif yüklere eşit miktarda negatif yükler toplanacaktır. p-tipi organik yarıiletkenin aktif tabaka olarak kullanılması durumunda ise uygulanan kapı geriliminin işareti negatif olmakta ve organik yarıiletken/yalıtkan ara yüzeyde pozitif yük taşıyıcısı konsantrasyonun artışı meydana gelmektedir. Ara yüzeyde uygulanan kapı geriliminin işaretine bağlı olarak pozitif veya negatif yük taşıyıcılarının indüklenmesi ile yarıiletken ve yalıtkan dielektrik malzemelerden oluşan birbirine seri bağlı paralel plakalı kapasitör etkisi ortaya çıkacaktır. Alan etkisi ile ara yüzey boyunca indüklenen serbest yük taşıyıcıları, akaç-kaynak arasındaki kanal boyunca iletkenliği arttırmakta ve alan etkili transistör yapısı ortaya çıkmaktadır.



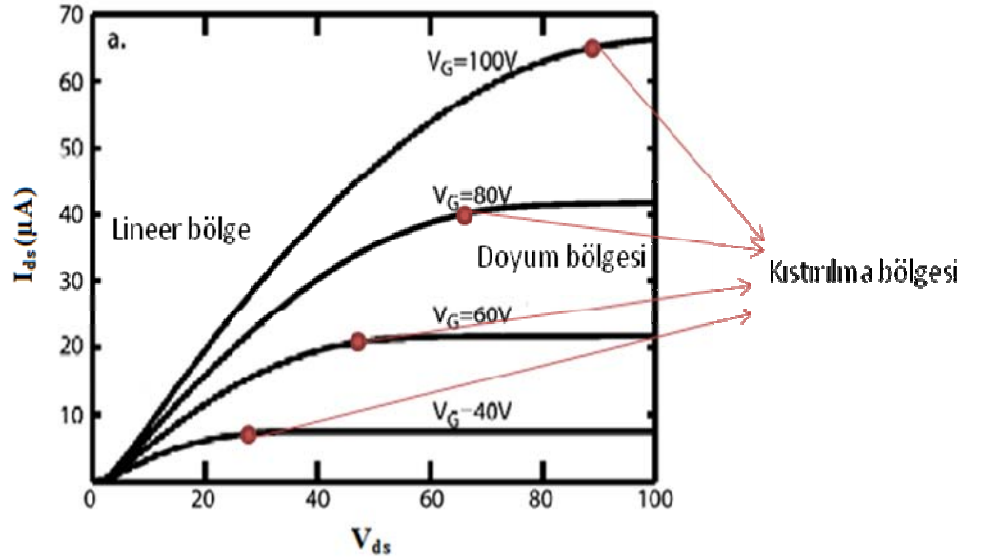
Şekil 3.2. OFET bağlantı şeması ve geometrik parametreleri

Uygulanan  $V_{gs}$  gerilimine bağı olarak arayüzeydeki yarıiletken enerji seviyelerindeki değişim Şekil 3.3 de verilen enerji seviyeleri diyagramı ile açıklanabilmektedir. Şekil 3.3 (a) da dış elektrik alan etkisinin olmadığı durumdaki akaç-kaynak metal kontakların fermi enerji seviyesi ile organik yarıiletkenin HOMO ve LUMO enerji seviyelerinin birbirlerine göre konumları verilmektedir. Uygulanan  $V_{gs}$  gerilimin sıfır olduğu bu durumda, eğer düşük akaç-kaynak gerilimi uygulanırsa, yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde serbest yük taşıyıcı yoğunluğunun düşük olmasından dolayı yarıiletken tabakadaki iletkenlik düşük olmaktadır ve bu durumda arayüzeydeki bölgeye tükenim bölgesi (depletion region) olarak isimlendirilmektedir. Şekil 3.3 (b) ile (d) arasındaki diyagramlarda uygulanan  $V_{ds}$  ve  $V_{gs}$  gerilimlerine bağı olarak enerji seviyelerindeki değişimler gösterilmektedir. Eğer kapı elektroduna aktif yarıiletkendeki yük taşıyıcılarına işaretine bağı olarak gerilim uygulanırsa hareketli yükler elektrik alan etkisi ile arayüzeyde toplanmakta ve bu durum yığınım bölgesi (accumulation regime) olarak adlandırılmaktadır (Şekil 3.3 (b-c)). Bu durumda akaç-kaynak arasına uygulanan gerilim ile yarıiletkenin LUMO veya HOMO enerji seviyesinden metal kontakların fermi enerji seviyesine yük transferi gerçekleşecektir (Şekil 3.3 (d-e)). (Newman et al., 2004)



Şekil 3.3. OFET yapısının a)  $V_{gs}$ ,  $V_{ds} = 0$  V değerinde ideal enerji seviyesi diyagramı, b) elektron yığınım bölgesinde çalışma prensibinin gösterimi, c) boşluk yığınımı, d) elektron yük taşıyıcılarının hareketi e) boşluk yük taşıyıcılarının hareketi (Newman et al. 2004).

Alan etkili organik transistörler iki farklı yolla karakterize edilmektedirler. Kapı gerilimini ( $V_{gs}$ ) sabit tutularak kaynak-akaç arasında gerilimi ( $V_{ds}$ ) taranması sonucunda  $I_{ds}$  akımının  $V_{ds}$  gerilimine karşı elde edilen çalışma eğrisi ve sabit  $V_{ds}$  gerilimi altında,  $V_{gs}$  geriliminin taranması sonucunda  $I_{ds}$  akımının  $V_{gs}$  gerilimine karşı elde edilen transfer eğrisi bize alan etkili organik transistörlerin karakteristiği hakkında bilgi vermektedir.



Şekil 3.4. n-kanal alan etkili transistörün farklı  $V_{gs}$  gerilimlerine karşı çalışma eğrisi (Newman et al. 2004).

Şekil 3.4 de temel çalışma karakteristiği verilen kanal boyunca çoğunluk yük taşıyıcıların elektron olduğu (n-kanal) alan etkili transistörün çalışma eğrisinden görüleceği gibi üç farklı bölge ile karakterize edilmektedir. Bu bölgeler; lineer bölge, kısırlama bölgesi ve doyum bölgesi olmaktadır. Bu bölgelerin oluşmasında temel şart kapı geriliminin eşik gerilim değerinden ( $V_{gs} > V_{th}$ ) büyük olmasıdır. Eşik gerilim değeri, organik yarıiletken/yalıtkan arayüzeyinde yük taşıyıcıların birikimi için uygulanması gereken minimum gerilim değeridir. Şekil 3.5 de organik yarıiletken/yalıtkan arayüzeyinde kontaklara uygulanan gerilimlere bağlı olarak üç çalışma bölgesinde yük taşıyıcı konsantrasyonunun değişimini gösteren OFET yapısının kesit alanı verilmektedir.

### **Lineer bölge**

Şekil 3.5 (a) da  $V_{ds} = 0$  V ve  $V_{gs} - V_{th} > 0$  V durumunda kanal boyunca yük yoğunluğu düzgün olarak dağılmaktadır. Uygulanan düşük  $V_{ds}$  gerilimde kanal

boyunca yük konsantrasyonunda bir değişim gözlenecektir. Bu değişimden dolayı kanal bölgesinde düşük ve sabit dirençli bir bölge oluşarak, uygulanan  $V_{ds}$  gerilimi ile kanal akımı lineer olarak değişecektir. Uygulanan herhangi bir  $V_{ds}$  gerilimi için, kanal boyunca oluşan elektrik alan kaynak bölgesinde sıfır değerinden, akaç bölgesindeki  $V_{ds}/L$  elektrik alan değerine doğru artış gösterecektir. Burada  $L$  kanal uzunluğudur.

### ***Kısırılma kanal bölgesi (Pinch-off)***

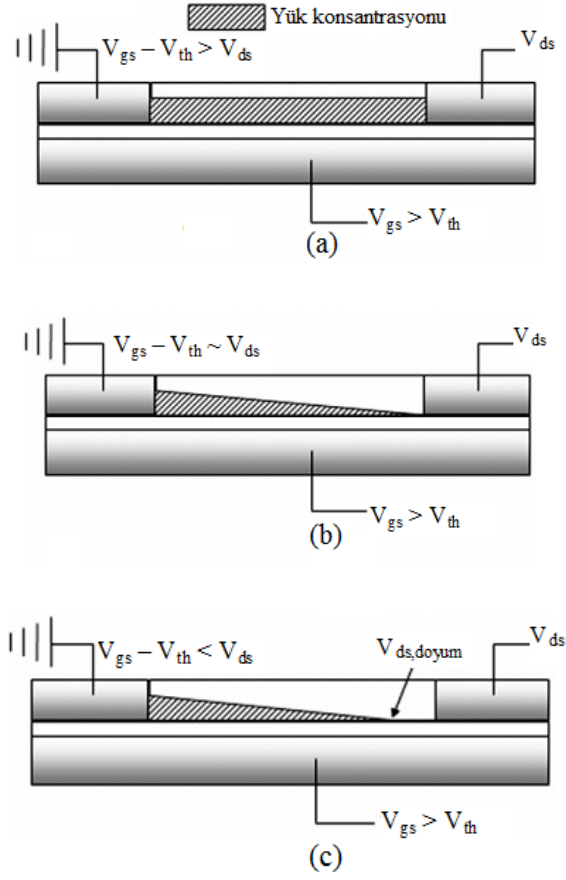
$V_{ds}$  gerilimi arttırıldığında akaç bölgesinde kanal boyunca bir boşaltılmış bölge oluşur ve kanalın aktif alanı Şekil 3.5 (a) da gösterilen alana göre akaç bölgesinde azalır. Lineer bölgede kanal boyunca görülen düzgün yük yoğunluğu, artan akaç-kaynak gerilimi ile düzenli olmayan yapıya dönüşür. Akaç bölgesindeki yük yoğunluğu, kaynak bölgesine göre daha düşük olmasından dolayı kanalın direnç değeri artarak uygulanan  $V_{ds}$  gerilimi ile kanal akımı arasındaki lineer ilişki bu gerilim değerinde görülmemektedir. Akaç-kanak gerilimi daha fazla arttırıldığında ve  $V_{ds} = V_{gs} - V_{th}$  değerine ulaştığında kanal kısırılmış (pinch-off) olmaktadır. Bu noktada akaç gerilimi ile kapı gerilimi arasındaki gerilim farkı sıfır değerine eşit olmakta ve akaç kısmına yakın bölge tükenim bölgesidir.

### ***Doyum bölgesi***

Uygulanan  $V_{ds}$  gerilim değerinin kapı gerilim değerinden yüksek olduğu durumda ( $V_{ds} > V_{gs} - V_{th}$ ) tükenim bölgesi kaynak kontak bölgesine doğru genişlemeye başlayacaktır. Kanal uzunluğunun tükenim bölgesinin genişliğinden büyük olduğu sürece kısırılma bölgesi ile kaynak kontağı arasındaki kanal direncinin sabit kalmasından dolayı,  $V_{ds}$  gerilim değerindeki artış akım üzerinde artışa neden olmamakta ve sabit doymuş kanal akımı ( $I_{ds,sat}$ ) görülmektedir. Tükenim bölgesindeki kısmen yüksek elektrik alan etkisiyle, kanaldaki yük taşıyıcıları kısırım noktasından akaç kontağına doğru oluşan sınırlı uzay yük bölgesi boyunca sürüklenir. Burada meydana gelen akım uzak yük sınırlandırılmış akım (space charge limited current) olarak da tanımlanmaktadır (Stadler 2006, Newman et al. 2004).

Yukarıda doyum bölgesi için tanımlanan başlangıç koşullarındaki sabit kapı gerilimi arttırıldığında ise kanal direnci azalır ve kanal boyunca daha yüksek akım

değeri görülür. Bu nedenle farklı  $V_{gs}$  değerlerinde Şekil 3.4 de gösterilen çalışma karakteristiğinde görüldüğü gibi kanal akımı daha yüksek değerlere doğru kayar.



Şekil 3.5. Alan etkili organik transistörde yük taşıyıcı konsantrasyonunun uygulanan gerilimlere bağlı olarak kanal boyunca değişimi (a) Lineer bölge ( $V_{ds} < V_{gs} - V_{th}$ ) (b) kısırılma bölgesi ( $V_{ds} \approx V_{gs} - V_{th}$ ) (c) doyum bölgesi ( $V_{ds} > V_{gs} - V_{th}$ ) (Newman et al. 2004).

Lineer ve doyum bölgesindeki akaç-kaynak arasındaki akım ifadeleri Eşitlik 3.1 ve 3.2 de verilmektedir. (Sze 1981)

$$(I_{ds,linear})^{1/2} = \frac{Z}{L} C_i \mu \left[ (V_{gs} - V_{th}) V_{ds} - \frac{V_{ds}^2}{2} \right] \quad (3.1)$$

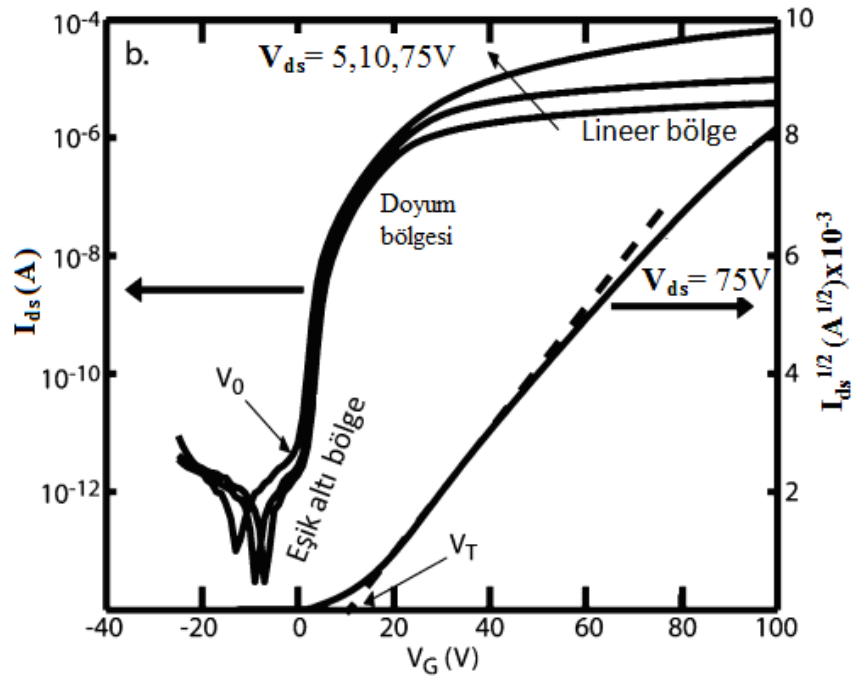
$$I_{ds,sat} = \frac{Z}{2L} C_i \mu (V_{gs} - V_{th})^2 \quad (3.2)$$

burada  $\mu$  ( $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) mobilitiyi,  $C_i$  ( $\text{F}/\text{cm}^2$ ) yalıtkan tabakanın birim alandaki sığa değerini,  $Z$  ( $\mu\text{m}$ ) transistör kanal genişliğini,  $L$  ( $\mu\text{m}$ ) transistör kanal uzunluğunu ifade etmektedir. Eşitlik 2.1  $V_{ds} < (V_{gs} - V_{th})$  durumundaki akım iletim

mekanizmasını ifade ederken, Eşitlik 2.2 de verilen ifade  $V_{ds} > (V_{gs} - V_{th})$  durumunda geçerlidir.

Şekil 3.6 da uygulanan sabit  $V_{ds}$  gerilimi altında  $V_{gs}$  gerilim taramasına bağlı olarak n-kanal alan etkili organik transistörlerin tükenim ve yığılma bölgelerinde  $(\log I_{ds} - V_{gs})$  ve  $(I_{ds}^{1/2} - V_{gs})$  transfer karakteristiğini vermektedir. OFET yapısının mobilite, eşik gerilim değeri ve açma/kapama oranı (anahtarlama; on/off ratio) üç temel elektriksel parametresi doyum bölgesindeki transfer eğrisi üzerinden bulunur.  $(I_{ds,sat})^{1/2} - V_{gs}$  grafiğın eğiminden yola çıkarak Eşitlik 3.3 yardımı ile mobilite değeri ve lineer doğrunun  $V_{gs}$  eksenini kestiği noktadan eşik gerilim değeri,  $V_{th}$ , bulunur (Boudinet 2009). Açma/kapama oranı ise doyum bölgesindeki kanal akımın tükenim bölgesindeki kanal akımında oranından bulunur. Tükenim bölgesindeki transistörün konumu kapalı (off-state) ve doyum bölgesinde açık (on-state) olarak isimlendirilir (Kymissis 2009).

$$(I_{ds,sat})^{1/2} = \left[ \frac{Z}{2L} \mu C_i \right]^{1/2} (V_{gs} - V_{th}) \quad V_{ds} \geq V_{gs} - V_{th} \quad (3.3)$$



Şekil 3.6. n-kanal alan etkili organik transistörün sabit  $V_{ds}$  gerilim değerinde transfer eğrisi (Newman et al., 2004).

Alan etkili organik transistörün yığılma bölgesindeki eşik gerilim değeri ifadesi Eşitlik 3.4 ile verilmektedir;



$$V_{th} = \mp \frac{qn_o d}{C_i} + V_{FB} \quad (3.4)$$

burada  $V_{FB}$  düz band potansiyel (flat-band potential) değerini,  $q$  birim yükü,  $n_o$  hacimsel yük yoğunluğunu ifade etmektedir. Eşitlikte yar alan negatif ve pozitif işaret organik yarıiletkendeki çoğunluk yük taşıyıcısının türünü ifade etmektedir (Horowitz 1998).

Alan etkili organik transistörlerde diğer bir parametre ise eşik bölgede eğimi  $S$  (subthreshold slope);

$$S = \left[ \frac{d \log I_{ds}}{dV_{gs}} \right]^{-1} \quad (3.5)$$

ifadesi ile verilmekte ve birimi V/decade dir.  $S$  parametresi eşik geriliminin altındaki bölgede akım üzerindeki net elektrik alan etkisini ve yalıtkan-yarıiletken arasındaki arayüzey kusurlarının varlığını göstermektedir. İdeal bir alan etkili organik ince film transistörde  $S$  değeri 1 V/decade değerine yakın olmalıdır (Newman et al. 2004). Normalize edilmiş eşik altı bölge eğimi  $S_i = S.C_i$  dielektrik katsayısı veya kalınlığı farklı olan yalıtkan malzemeler ile organik yarıiletken film arayüzeyi hakkında daha doğru bilgi vermekte olup, arayüzey de bulunan birim alandaki tuzak yoğunluğu;

$$N_{ss}^{max} = \left[ \frac{S \cdot \log(e)}{kT / q} - 1 \right] \frac{C_i}{q} \quad (3.6)$$

ifadesi ile verilmektedir (Rolland et al. 1993). Burada  $e$  matematiksel sabit olmakla birlikte,  $N_{ss}^{max}$  birim alandaki maksimum arayüzey tuzak yoğunluğunu,  $k$  Boltzmann sabitini,  $T$  mutlak sıcaklığı ve  $q$  birim elektrik yükünü vermektedir.

Alan etkili organik transistörlerin akım-gerilim karakteristiğini açıklamak için farklı analitik modeller geliştirilmiştir. Horowitz ve Delannoy tarafından üst kontak/alt kapı geometrik yapısındaki organik ince film transistör için geliştirilen modelde, yarıiletken/yalıtkan arayüzeyindeki tuzak seviyelerinin akım-gerim eğrisi üzerindeki etkileri incelenmiştir. p-Kanal bir organik ince film transistör için geliştirilen modele göre, organik yarıiletkenin HOMO bandı kıyısına yakın seviyelerde bulunan tuzaklanmış yük yoğunlukları düşük kapı gerilim değerlerinde serbest yük yoğunluğuna göre daha fazla olmakta ve kanal boyunca

geçen doyum akımı tuzaklanmış yük yoğunluğuna bağlı olmaktadır. Yüksek kapı gerilimi değerlerinde ise tüm tuzak seviyeleri doldurularak serbest yük taşıyıcı konsantrasyonuna eşit yoğunluğa ulaşılmaktadır. Tuzak seviyelerinin kapı gerilimine bağlı olarak doldurulması ile yarıiletkenin mikroskopik mobilite değeri ortaya çıkmakta ve doyum bölgesindeki akım-gerilim eşitliği geçerli olmaktadır (Horowitz and Delannoy 1991). Tuzak seviyelerinin akım-gerilim eğrisi üzerindeki etkileri analitik ve deneysel olarak incelenmesinin yanında tuzak seviye tipleri de doyum akımı üzerinde önemli rol oynamaktadır. Alıcı (acceptor) veya verici (donör) tipi tuzak enerji seviyeleri p-kanal bir ince film transistörde etkileri incelendiği zaman, özellikle alıcı tip tuzak seviyelerinin yoğunluğu arttığı zaman, eşik gerilim değerinin altında akım değeri artmakta ve negatif eşik gerilim değeri pozitif değere doğru kaymaktadır. Yığınım bölgesinde çalışan ideal bir ince film transistör için kapı gerilimin eşik gerilim değerine ulaştığı noktada akaç ve kaynak elektrotlar arasında akımın uygulanan kapı gerilimine bağlı olarak ikinci dereceden artması ve kapı geriliminin sıfır olduğu değerde transistörün kapalı konumda olması beklenirken, bir çok organik tabanlı ince film transistörler de kapı gerilimin eşik gerilim değerinin altında olduğu değerlerde transistörün açık konumda olduğu gözlenmektedir. Organik tabanlı ince film transistörlerdeki ideal olmayan bu davranış şekli, organik yarıiletken bant kıyıları ile fermi enerji seviyesi arasında bulunan tuzak seviyelerindeki yüklerin, transistörün kanal bölgesini oluşturan banta sıçrama mekanizması ile açıklanmaktadır (Horowitz et al. 1998). p-Kanal ince film transistör için tuzak etkilerinin akım-gerilim karakteristiği üzerindeki etkileri analitik modele göre incelendiğinde, alıcı tür tuzak seviyelerinin yoğunluğu artması ile eşik gerilim değerinin altında tuzaklanan elektronların yoğunlukları artmaktadır. Alıcı tür tuzak seviyeleri p-kanal ince film transistörün açma gerilimi daha negatif bölgelere doğru kaydırırken ve tuzaklanan elektronlara bağlı olarak kanalda oluşan hareketli boşluklardan dolayı tükenim bölgesindeki akımı da arttırmaktadır. Verici tür arayüzey tuzak durumlarında ise p-kanal ince film transistörün yığınım bölgesindeki akımı azaltmakta ve eşik gerilim değerleri pozitif değerlere doğru kaymaktadır (Erlén 2009).

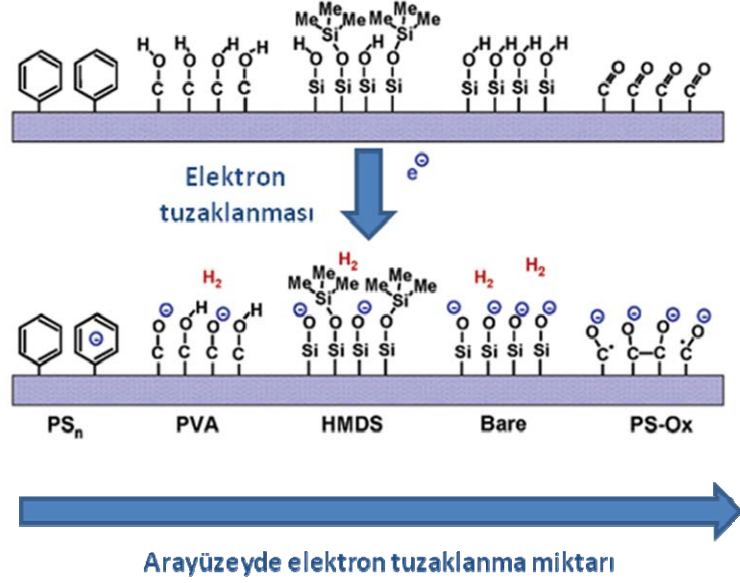
### 3.3. OFET Yapılarında Kullanılan Kapı Yalıtkan Malzemeler

Organik ince film transistörlerin performansının tanımlanmasında en önemli parametreler yük taşıyıcılarının mobilite değerleri, açma/kapama oranı (on/off ratio) ve çalışma gerilimidir. Yarıiletken ile kapı arasında kullanılan dielektrik sabiti yüksek olan yalıtkan malzemeler, kanaldan geçen yüksek akım değerleri için transistörlerin çalışma gerilimini entegre devre uygulamalarında istenilen değerlere düşürmektedir. İnce film transistörlerde kanal boyunca geçen akım, kapı gerilimi ile uyarılan birim alandaki yük taşıyıcı konsantrasyonu ile doğru orantılı olup, kanaldaki yük taşıyıcılarının sayısı dielektrik malzemenin kapasitansı ile doğru orantılıdır. Aralarında  $d$  uzaklığı bulunan birbirine paralel iki metal kontak arasındaki dielektrik malzemenin birim alandaki geometrik kapasitans değeri;

$$C = \epsilon_o \epsilon / d \quad (3.7)$$

ifadesi ile verilmektedir. Denklemden yalıtkan malzemenin  $\epsilon$  dielektrik sabitini,  $\epsilon_o$  boşluk dielektrik katsayısını ve  $d$  dielektrik malzemenin kalınlığını ifade etmektedir (Facchetti et al. 2005).

Günümüzde silisyum tabanlı metal oksit yarıiletken yapılarında yalıtkan tabaka olarak silisyum oksit ( $\text{SiO}_2$ ) kullanılmaktadır. Fakat son yıllarda  $\text{SiO}_2$ 'e alternatif yüksek dielektrik sabitli alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\epsilon \approx 8-10$ ), tantalum oksit ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\epsilon \approx 23$ ), titanyum oksit ( $\text{TiO}_2$ ,  $\epsilon = 41$ ), hafniyum oksit ( $\text{HfO}_2$ ,  $\epsilon \approx 22-25$ ), zirkonyum oksit ( $\text{ZrO}_2$ ,  $\epsilon \approx 25$ ), seryum oksit ( $\text{CeO}_2$ ) gibi inorganik dielektrik malzemeler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır (Ortiz et al. 2010).  $\text{SiO}_2$  tabaka üzerinde bulunan hidroksil (OH) grupları kusur kaynaklarını oluştururken, oksit tabakasında bulunan alkali iyonlar transistör karakteristiğinde özellikle histeresis ve eşik gerilim değeri üzerinde etkileri olmaktadır. Özellikle havaya hassas n-tipi organik malzemelerde oksit tabaka üzerindeki tuzak seviyeleri, kanal boyunca hareket eden elektronların tuzaklanmasına yol açmasından dolayı malzemenin mobilite değerini düşürürken ve transistörün çalışma karakteristiğini etkilemektedir. Şekil 3.7 de farklı kimyasal yapılardaki OH grupları içeren dielektrik malzemelerin elektron tuzaklanma etkilerini göstermektedir (Yoon et al. 2006, Chua 2005).

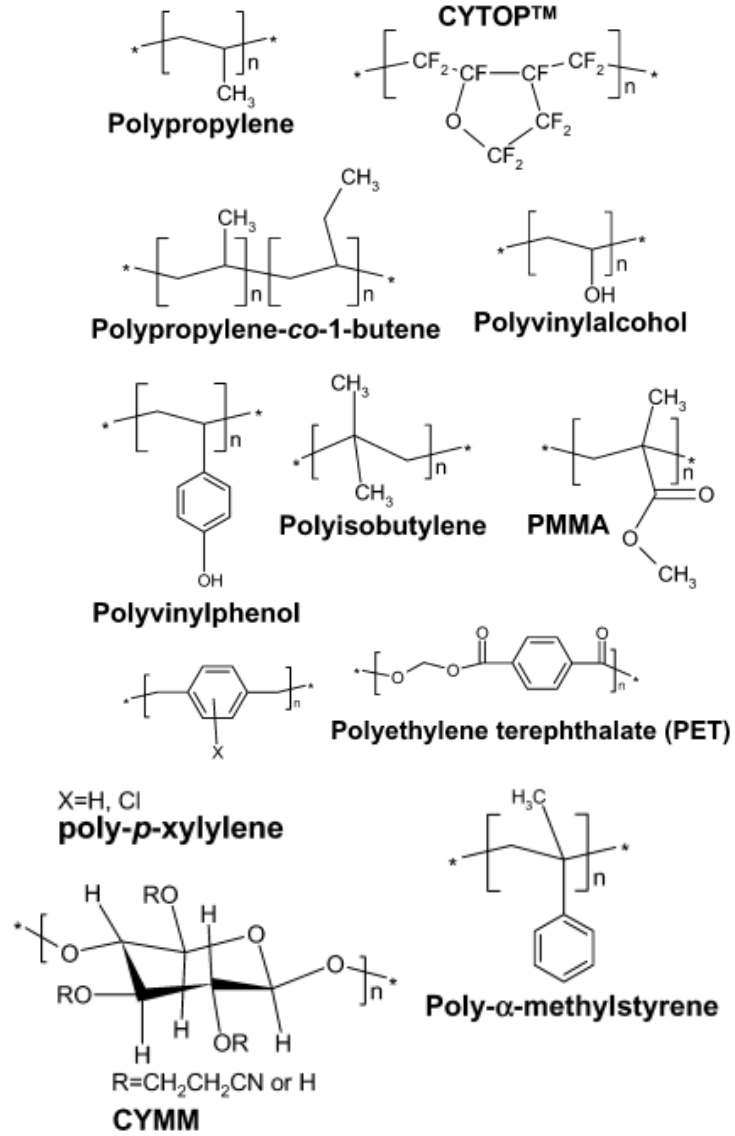


Şekil 3.7. Farklı dielektrik tabakalar üzerinde fonksiyonel grupların elektron tuzaklama verimliliklerinin şematik gösterimi (Yoon et al. 2006).

SiO<sub>2</sub> üzerindeki OH grubundan kaynaklanan tuzak etkilerini azaltmak amacıyla çözelti ya da buhar fazında kendiliğinden düzenlenen tek tabakalar (SAM; self assembly monolayer) SiO<sub>2</sub> üzerine kaplanmaktadır. SAM malzemelerin alkil uzunluklarının artmasıyla, kaplandıkları altlıkların yüzey enerjilerini azaltarak yüzeye hidrofobik (hydrophobic) özellik kazandırmakla birlikte oksit yarıiletken tabaka üzerindeki tuzakları azaltarak eşik gerilim değerini azaltmakta, anahtarlama oranını ve yük taşıyıcıların mobilite değerlerini arttırmakta ve eşik altı bölgedeki eğim değerini (*S*) azaltmaktadır (Hill et al. 2009, Kim et al. 2010, Xiao et al. 2005). Organik ince film transistörlerde yük taşıyıcılarının mobilite değeri, organik yarıiletken filmler ile kaplandıkları altlıkların yüzey enerjilerinin birbirlerine yakın olması ile elde edilebilmektedir.

İnorganik oksit dielektrik malzemelere alternatif olarak Şekil 3.8 deki polimer yapıdaki yalıtkan malzemelerin 1990 yılında Peng tarafından organik alan etkili transistor çalışmalarında dielektrik malzeme olarak kullanılması ile birlikte tamamıyla organik ince film transistörlerin temelleri atılmıştır (Peng et al. 1990). Polimer yalıtkan malzemeler, oda koşulları altında çözelti şeklinde döndürme (spin-cast), daldırma, neşter çekme veya baskı (doctor-blade, printing) yöntemleri ile istenilen altlıklara kaplanabilmeleri göz önüne alındığında inorganik tabanlı oksit malzemelere göre ince film transistör uygulamalarında ön plana çıkmaktadırlar. Polimer dielektrik malzemelerin kimyasal yapıları ile organik

yarıiletkenler arasındaki etkileşim yük taşıyıcılarının kanaldaki geçişleri ve organik moleküllerin yüzeydeki dizilimi üzerinde önemli rol oynamaktadır. Polimer dielektrik malzemelerin kimyasal yapılarında bulunan polar gruplar yapı içerisinde rastgele dipol alan yaratmalarından dolayı, yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinde bulunan durum yoğunluklarının dağılımını etkilemekte ve yük taşıyıcılarının sınırlandırıldığı enerji seviyelerini arttırmaktadır. Bu nedenle yüksek dielektrik sabitli polimer yapılar genelde polar gruplar içermesinden dolayı kanal boyunca yük hareketliliğini etkileyerek daha düşük mobiliteli transistörlere neden olmaktadır. Birçok çalışmada düşük dielektrik sabitli polimer dielektrik malzemelerin kullanıldığı ince film transistörlerden elde edilen mobilite değeri, polar gruplar içeren yüksek dielektrik malzemeli transistörlerden yüksek çıkmaktadır (Veres et al. 2003). İnorganik oksit tabakaların SAM malzemeleri ile yüzey kusurlarının azaltılmasının yanında hibrit dielektrikler olarak isimlendirilen polimer/inorganik oksit yapısı, polimer dielektrik malzemelerin diğer bir uygulama alanıdır. Organik ince film transistörlerde özellikle  $\text{SiO}_2$  dielektrik üzerine polimer malzemelerin kaplanması ile elde edilen sonuçlar sadece  $\text{SiO}_2$  kullanılması ile elde edilen sonuçlar ile kıyaslandığı zaman mobilite değerleri, açma/kapama oranının arttığı gözlemlenmiştir. Foto-emisyon spektroskopisi ile yapılan çalışmalarda özellikle polimer dielektrik malzeme organik yarıiletkenin iş fonksiyon değerini arttırdığı ve metal/yarıiletken arasındaki enerji bariyerini azalttığı görülmüştür (Stadler et al. 2009).



Şekil 3.8. Alan etkili organik transistörlerde kullanılan bazı polimer dielektrik malzemeler (Veres et al. 2003)

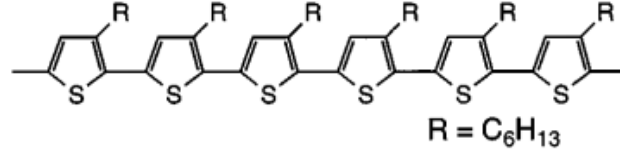
### 3.4. OFET Yapılarında Kullanılan Organik Yarıiletkenler

#### 3.4.1. p – Tipi Organik Yarıiletkenler

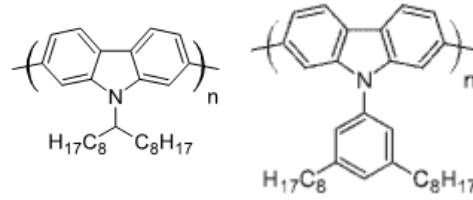
Polimer yapıdaki organik moleküllerin yalıtkan özellik göstermelerinin yanında yarıiletken özellik gösteren ve uygun çözümlerde çözünebilen birçok organik yapılar organik ışık yayan diyot (OLED) ve organik fotovoltaiik hücre uygulamalarının yanında ince film transistörlerde aktif tabaka olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar (Shirota et al., 2007). Polimer yarıiletkenlerin düşük sıcaklıklarda ve oda koşulları altında çözelti fazında döndürme kaplama, daldırma kaplama, damlatma veya baskı kaplama yöntemleriyle çok düzgün film

oluşturmaları, organik elektronik uygulamalarında kullanımları açısından ilgi çekici malzemeler olmaktadır. Molekül uzunlukları küçük olan organik moleküllerin ve oligomerlerin kimyasal yapılarına takılan uzun zincirli fonksiyonel gruplar sayesinde çözünürlükleri artmakta ve polimer malzemelerde olduğu gibi çözelti fazında kaplama teknikleri için uygun molekül yapılarına sahip olmaktadır. Organik yarıiletken filmler moleküller arası zayıf etkileşimlerden dolayı düzensiz yapıda olmalarının yanında, kimyasal gruplarla yapılarının değiştirilmesi, tek tabaka film kaplama methodları (Langmuir-Blodgett) ve yüksek vakum teknikleri ile tek kristal, mikro kristal ve sıvı kristal özellik gösterebilmektedirler (O'neil et al. 2003, Hu et al. 1999, Bao and Locklin 2007). Kristal yapıdaki organik moleküller kendi aralarında güçlü  $\pi$ - $\pi$  etkileşimleri içerisine girerek moleküller arası yük transferini arttırmakta ve ince film transistörün performansını geliştirmektedir. Çözelti fazında kaplama tekniklerinden daldırma methodu ile yapılan polimer filmler, kaplandıkları altlıklarda adezyon (adhesion) kuvvetleri etkisiyle yüksek derecede  $\pi$ - $\pi$  örtüşmesine neden olan moleküler dizilime sahip olmakta ve ince film transistör uygulamalarında polimer filmlerden elde edilen yük taşıyıcı mobilite değerleri diğer çözelti kaplama teknikleri ile kıyaslandığında daha yüksek çıkmaktadır (Wang et al. 2003, Wang et al. 2004). Politiyofen polimer yapı ile döndürme kaplama ve damlatma (drop cast) metodlarıyla yapılan filmler sonucunda elde edilen pozitif yük taşıyıcılarının (boşluk) mobilite değerleri ise sırasıyla  $0,05 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  ve  $9,20 \times 10^{-3} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  olarak gerçekleşmiştir. Çözelti kaplama teknikleri doğrudan polimer yarıiletkendeki taşıyıcı mobilitesini etkilemesinin yanında kullanılan çözenlerin kimyasal yapıları ve kaynama noktaları moleküllerin dizilimini etkilemektedir. Damlatma ve döndürme kaplamaları karşılaştırıldığında, çözenin yavaş buharlaşması filmin daha yavaş ve düzenli biçimde büyümesine olanak sağlamakta iken, döndürme kaplamada dönme hızına bağlı olarak çözenin hızlı bir şekilde buharlaşması daha düzensiz molekül dizilimine yol açmaktadır (Bao et al. 1996). Kristal yapıdaki organik moleküllerin film üzerindeki X-ışını kırınım desenleri incelendiğinde moleküllerin yük hareketine paralel  $\pi$ - $\pi$  zincirler arası istiflenmeye girmesi ile daha yüksek mobilite değerleri elde edilmektedir (Sirringhaus et al. 1999, Noh et al. 2003). Aynı tür polimer yapıların molekül ağırlıkları ile polimer ince film transistörlerin performansı arasındaki ilişki incelendiğinde, polimer yapıların molekül ağırlıkları arttıkça transistör performansının arttığı gözlemlenmiştir. Molekül ağırlıkları büyük olan polimer yapıların film yüzeyinde oluşturdukları mikro kristaller arasındaki sınırların keskin olmaması ve polimerlerin  $\pi$ - $\pi$  istiflenmesi düzlemsel olmasından dolayı yük taşıyıcıları uygulanan elektrik alan ile polimer zincirler

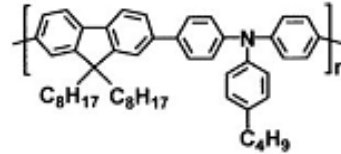
arası daha uzun mesafe almaktadırlar (Zen et al. 2004, Kline et al. 2003). Şekil 3.9 da molekül yapıları verilen  $8,00 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  mobiliteye sahip polifluoren (Yan et al. 2005)  $0,40 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  mobiliteye sahip politiyofen (Baeg et al. 2010),  $2,00 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  mobiliteye sahip polikarbazol (Boudreault et al. 2008, Wakim et al. 2007) gibi birçok polimer yarıiletken malzemeler ince film transistör uygulamalarında p-tipi özellik göstermektedir.



(a)



(b)



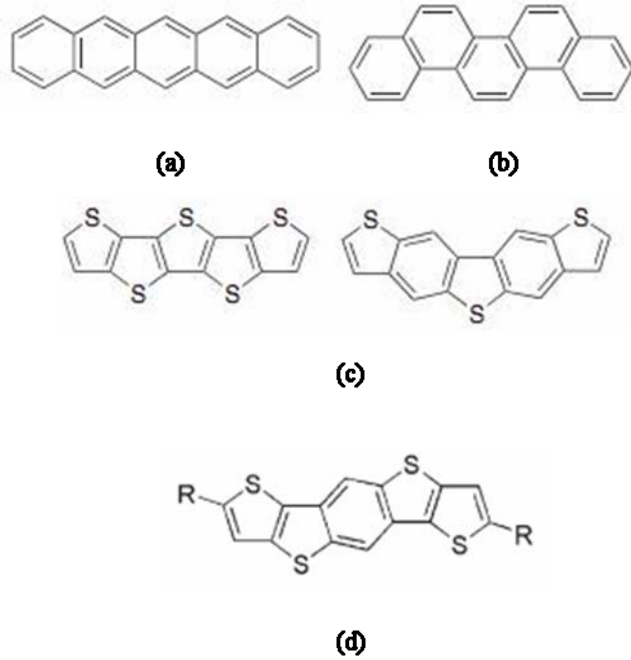
(c)

Şekil 3.9. p-tipi polimer yarıiletkenlerin molekül yapıları a) Polihekziltiyofen (P3HT), b) Polikarbazole türevleri, c) Fluoren-trifenil (kopolimer) amin türevi

Polimer p-tipi malzemelerin yanında küçük moleküllü p-tipi yarıiletkenler çözelti fazında ya da vakum altında ısı buharlaştırma (süblimasyon) ile belirli bir altlık üzerine kaplanabilmektedir. Organik ince film transistörlerde yaygın olarak kullanılan p-tipi küçük moleküllü yarıiletkenler Şekil 3.10 da kimyasal yapıları verilen asen (acene) türevleridir. Bu yapıların içerisinde en yüksek mobiliteye sahip organik yapı  $3,00 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  değeri ile Şekil 3.10 (a) da molekül yapısı gösterilen pentasen molekülüne aittir (Klauk et al. 2002). Pentasen molekülünün havaya karşı kararlı olmaması ve çözünürlük problemleri geniş alan

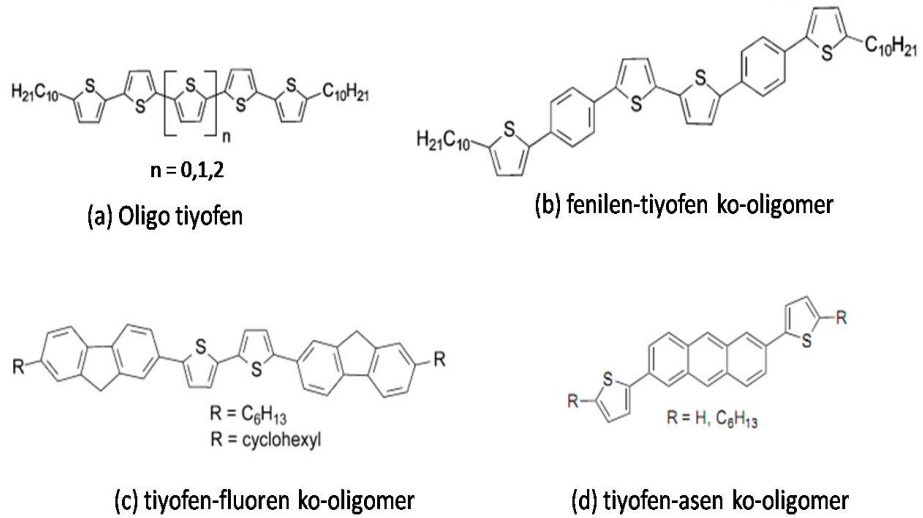


uygulamalarında en büyük dezavantajları olmakla birlikte, bu problemleri ortadan kaldırmak için pentasen molekülüne farklı gruplar bağlanarak ya da izomer yapısı ile ilgili çalışmalar son yıllarda ön plana çıkmaktadır. Şekil 3.10 (b) de gösterilen pentasen molekülün izomeri (picene) hava da vakum ortamına göre daha yüksek taşıyıcı mobilitelere değerine ( $1,10 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) sahiptir. Havaya karşı pentasen molekülünün kararlılığını arttırmak için yapılan çalışmalarda, kimyasal yapısında bulunan benzen halklarından birinin ya da birkaçının tiyofen halkaları ile yer değiştirmesi sonucu mobiliteler değeri düşerken ( $0,31 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) havaya karşı kararlılığı artmaktadır (Şekil 3.10 (c)) (Xiao et al. 2005, Tang et al. 2006). Asen türevlerinin yüksek mobilitelere değeri sahip olmalarının yanında geniş alan uygulamalarında çözünürlüklerinin düşük olması nedeniyle son yıllarda yapılan çalışmalar çözünebilir fonksiyonel asen türevleri üzerine odaklanmıştır. Çözelti fazında kaplama tekniği kullanılarak üretilen ince film p-tipi organik yarıiletken ile elde edilen en yüksek mobilitelere değeri ( $1,70 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) molekül dithieno benzoditiyofen olup, molekül yapısı Şekil 3.10 (d) de verilmektedir (Gao et al. 2009). Pentasen p-tipi organik yarıiletken olarak bilinmesinin yanında, altlık olarak kullanılan dielektrik malzemeye bağlı olarak p ve n-tipi yarıiletken (ambipolar) özelliği göstermektedir. Pentasen organik yarıiletkeninde bulunan elektron yük taşıyıcılarının mobilitelere değeri oda koşullarında  $0,05 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  iken boşlukların mobilitelere değeri  $0,40 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  olmaktadır (Singh et al. 2005).



Şekil 3.10. Asen türevleri (Yamashita et al, 2009).

OFET yapılarında p-tipi aktif yarıiletken olarak kullanılan yüksek kojügaryona sahip yüksek diğery oligomer yapıları Şekil 3.11 de verilmektedir. Oligotiyofen (Şekil 3.11 (a)) türevleri OFET yapılarında en yaygın olarak kullanılan molekül yapıları olup,  $\alpha$ - $\alpha'$  didekil oligotiyofen ( $\alpha$ - $\alpha'$  didecyl oligothiophene) türevlerinden 6 lı tiyofen halkası içeren DD $\alpha$ -6T yapısı, en yüksek mobilite değeryine ( $0,50 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) sahiptir (Halik et al. 2003a). Molekül yapı içerisinde tek tip molekül yapısının kullanıldığı oligomer yapılarından farklı olarak, iki farklı molekül yapısının bir arada kullanıldığı ko-oligomer yapıları ince film transistörlerde aktif tabaka olarak kullanılmaktadır. Tiyofen-fenilen ko-oligomer yapısının aktif tabaka olarak kullanıldığı ince film transistörden elde edilen mobilite değeryi  $0,30 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  (Ponomarenko et al. 2005), tiyofen-fluoren ko-oligomer ile elde edilen mobilite değeryi  $0,17 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  dir (Locklin et al. 2005).

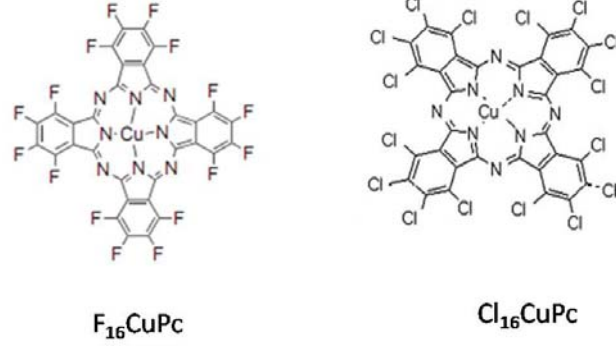


Şekil 3.11. Temel oligomer yapıları (Murphy et al., 2007)

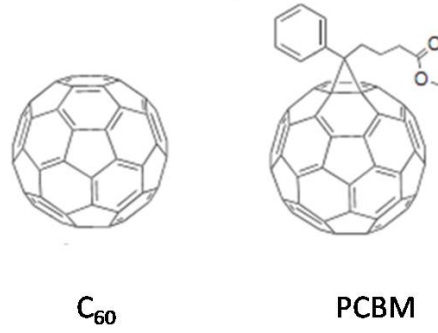
### 3.4.2. n-Tipi Organik Yarıiletkenler

p-Kanal organik yarıiletkenden elde edilen performans parametreleri a-Si (amorfsilisyum) teknolojisi ile rekabet edebilir seviyelerde iken, n-kanal organik yarıiletkenler de kullanılan Al, Ca, Mg gibi kontak metallerin kolaylıkla hava ortamında oksitlenmesi ve organik malzemeler ile kolaylıkla reaktif kompleks yapmalarının yanında elektron ilgisinin (electron affinity) düşük olması n – kanal organik yarıiletkenlerin dezavantajları olmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar ile flor (F), klor (Cl), siyanür (CN) gibi elektron çekici fonksiyonel grupların

organik yarıiletkenlere bağlanması ile havaya karşı kararlı ve yüksek mobilite değerli n-kanal ince film transistörler elde edilmiştir. Saf metal kompleks ftalosiyanın türevleri (CuPc, ZnPc, CoPc, FePc) ince film transistörde p-tipi özelliği göstermesinin yanında Şekil 3.12 (a) da gösterilen molekül yapısına elektron çekici flor (F) ve klor (Cl) elementlerinin bağlanması ile n-kanal özelliği ortaya çıkmaktadır (Bao et al. 1998). Ling ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada Hekza klor bakır ftalosiyanın organik yarıiletkeni ile  $0,01 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  mobilite değeri bulunmuş ve 50 gün boyunca hava ortamında yapılan testlerde mobilite ve anahtarlama değerlerindeki azalma gözlenmemiştir (Ling et al. 2006).  $\text{F}_{16}\text{CuPc}$  organik yarıiletkenin para-hekzafenil (para-hexaphenyl) oligomer üzerine büyütülerek yapılan ince film transistör çalışmasında  $0,11 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  değeri ile en yüksek mobilite değeri elde edilmiştir. Şekil 3.12 (b) de molekül yapısı gösterilen Fulleren ( $\text{C}_{60}$ ) ve türevleri yüksek elektron ilgisi ve konjugasyon özellikleri nedeniyle organik güneş pili yapısında ve OFET uygulamalarında n-tipi yarıiletken olarak kullanılmaktadır. Elektron ilgisinin yüksek olması nedeniyle hava ve neme karşı zamanla kararlılığı azalması diğer n-tipi organik yarıiletkenler olduğu gibi tek dezavantajdır. Fullerene türevleri ile yapılan OFET çalışmalarında tüm n-kanal transistörler içerisinde  $6,00 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  değeri ile en yüksek elektron mobilite değeri elde edilmiştir (Anthopoulos et al. 2006). Jang ve arkadaşları tarafından  $\text{C}_{60}$  fulleren organik yarıiletkenin perfloropolimer (perfluoropolymer) yalıtkan altlık üzerine büyütülmesi ile havaya karşı kararlı  $0,05 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  elektron mobiliteli OFET üretilmiştir (Jang et al. 2008). Fulleren molekülünün PCBM [methanofullerene [6,6] -phenyl-  $\text{C}_{61}$ -butyric acid methyl ester] ve  $\text{C}_{60}\text{MC}_{12}$  ( $\text{C}_{60}$  fused N-methylpyrrolidine-meta- $\text{C}_{12}$  phenyl] gibi çözünebilir türevleri ile yapılan çalışmalarda elektron mobilite değerleri  $0,20 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  ve  $\sim 0,07 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  olarak bulunmuştur (Singh et al. 2005, Chikamatsu et al. 2005). Fulleren ve türevlerinin organik tabanlı elektronik yapılarda n-tipi yarıiletken özellik göstermelerinin yanında, PCBM organik yarıiletkeni ambipolar karakteristiği göstermektedir. PCBM organik yarıiletkenin OFETde kullanılması sonucunda aynı koşullar altında elektron yük taşıyıcıların mobilite değeri  $0,01 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  iken boşluk mobilite değeri  $8,00 \times 10^{-3} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  olarak bulunmuştur (Anthopoulos et al. 2004).



(a)



(b)

Şekil 3.12. n-Tipi yarıiletken özelliği gösteren organik yarıiletkenlerin molekül yapıları (a) metal fitalosiyanın türevlerinden  $F_{16}CuPc$ ,  $Cl_{16}Pc$  (b)  $C_{60}$  ve PCBM (Yamashita et al, 2009).

### 3.4.3. Perilen ve Naftalen Organik Yarıiletkenler

Perilen ve naftalen diimid organik yarıiletkenleri ve türevleri düzlemsel moleküler yapıları, aktif yükseltgenme-indirgenme bileşiklerine sahip olmaları, kimyasal ve ısısal olarak kararlı olmaları, katı hallerinde yük taşıyıcılarının transferini kolaylaştıran ve moleküller arası  $\pi$  orbitallerin örtüşmesine olanak sağlayan moleküller arası yüksek orandaki  $\pi$ - $\pi$  istiflenmesi nedenleriyle organik elektronik yapılarda yaygın şekilde kullanılmaktadırlar (Bhosale et al. 2008). p-tipi organik molekül yapıların optiksel uyarılmış enerji seviyelerinden perilendiimid ve naftalendiimid organik yarıiletkenlerine foton etkili elektron transferinin gözlenmesi ve elektron ilgilerinin yüksek olmasından dolayı güneş pili, organik ışık yayan diyot ve OFET uygulamalarında n-tipi yarıiletken tabaka olarak kullanılmaktadır (Suzuki and Hoshino 1996, Tang 1986, Erten and Icli 2008, Erten et al. 2007). Perilen ve naftalen türevleri düzlemsel aromatik imid yapılarında bulunan azot (N) atomlarına ve aromatik halkadaki bay pozisyonlarına

çeşitli fonksiyonel kimyasal grupların kolaylıkla bağlanması sebebiyle elektriksel ve optiksel özellikleri organik elektronik cihaz uygulamalarında istenilen şekilde değiştirilmektedir ve bu özelliğinden dolayı organik yarıiletken molekül yapılarında ön plana çıkmaktadır (Laquindanum et al. 1996, Shin et al. 2006). Perilen diimidlere bağlı yan zincirlerin alifatik yada aromatik olmaları molekül kristal yapısını değiştirmektedir. Düz alifatik zincir içeren perilen diimidler sıvı kristal özellik gösterirken, film üzerinde ise moleküller kendilerine özgü  $\pi$ - $\pi$  paketlenmesine girerek birim hücrede bir molekül içeren triklinik birim hücreye sahip tek kristal yapıya özellik göstermektedirler. Düz alifatik zincir içeren naftalen diimid organik yarıiletken film yapısı monoklinik birim hücreli kristal yapıdadır. Perilen diimid ve naftalen diimid yarıiletkenlerdeki aromatik gruplar altlık yüzey normaline dik şekilde  $\pi$ - $\pi$  etkileşimlerine girmekte başka bir deyişle  $\pi$ - $\pi$  paketlenmesi altlık yüzeyine paralel olmaktadır (Kus 2006, Gregg and Cormier, 1998, Krauss et al 2008, Katz et al. 2000, Chesterfield et al. 2004)

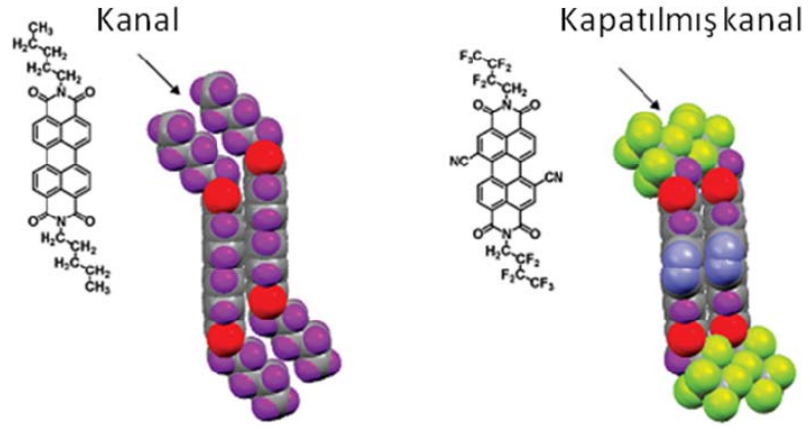
n-tipi organik yarıiletkenlerin OFET uygulamalarında havaya karşı hassas olmaları, hava ortamında bulunan nem ( $H_2O$ ) ve oksijen ( $O_2$ ) reaktif türlerin filmde oluşan kanal bölgesine girerek yük taşıyıcılarının taşındığı bölgede tuzak bölgeler yaratmasından kaynaklanmaktadır. Termodinamiksel olarak bir molekülün çözelti fazında elektrokimyasal indirgenme potansiyel değeri doygun kalomel elektrota (SCE) göre -0,66 V dan daha pozitif değere sahip ise havada bulunan  $H_2O$  oksidasyonuna karşı moleküldeki yük taşıyıcıları daha kararlı olmaktadır. İndirgenme potansiyeli 0,57 V (vs SCE) den daha büyük olan negatif yük taşıyıcılı organik moleküler yapılardaki elektronların oksidasyonu engellenmektedir. Özellikle perilen ve naftalen diimidlerde, imit gruplarına farklı tür elektron çekici halojen atomlardan oluşan yan zincirlerin bağlanması ile moleküler orbital enerji seviyeleri değiştirilmekte ve havaya karşı hassasiyeti ortadan kaldırılmaktadır. Havaya karşı kararlı bir moleküler yapıların dizaynında iki strateji bulunmaktadır; (Jones et al. 2007)

i) Perilen ve naftalen diimid moleküllerinin imit pozisyonlarına Floralkil ( $R^F$ ) grupların bağlanması.

ii) Yüksek elektron çekici grupların (CN, F, Cl, Br) moleküle bağlanması. Elektron çekici gruplar organik yarıiletkenlerin LUMO enerji seviyelerini düşürerek (elektron ilgisini arttırarak) oksijen ve nemin tuzak enerji seviyelerinin altında düşürmektedir. LUMO enerji seviyesi 4 eV değerinden daha düşük olan

moleküler yapılar havadaki atmosferik türlere karşı daha kararlı olmaktadır (Chen et al. 2007)

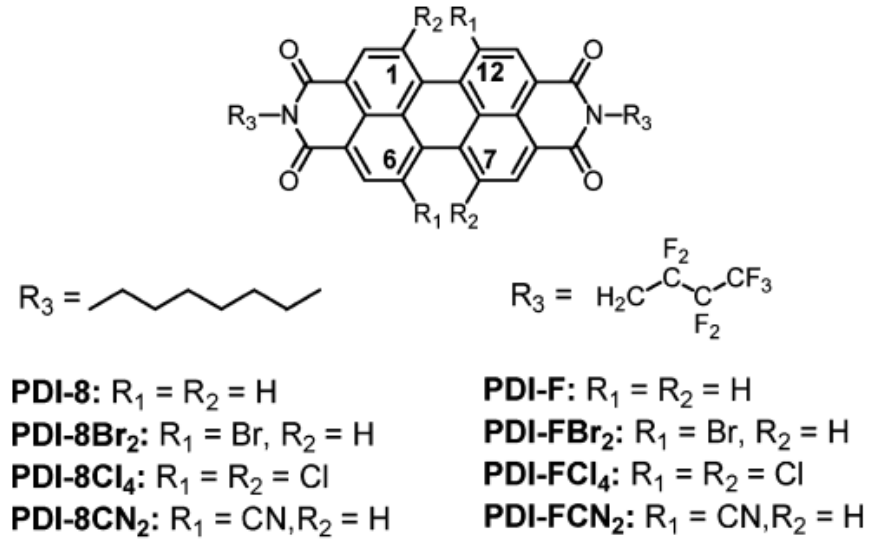
Şekil 3.13 de verilen moleküler yapıda, imide pozisyonlarına bağlı olan hidrokarbon zincirli perilen diimid ile floralkil zincirli perilen diimidin elektrokimyasal indirgenme potansiyelleri aynı olmasına rağmen, floralkil zinciri içeren perilen diimid film havada kararlıdır. Hidrojen atomlarına göre flor atomlarının Van der Waals yarıçaplarının büyük olması nedeniyle perilen diimid moleküller arası mesafeyi azaltarak oksijen ve nemi yük taşıyıcılarının transferinin gerçekleştiği kanala girmesine engellemekte ve yapıyı atmosferik koşullardan izole etmektedir.



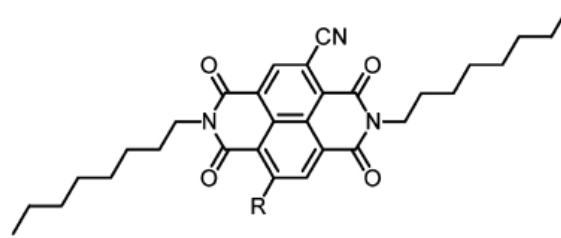
Şekil 3.13. Perilen diimid moleküllerinin (a) hidrokarbon zincirli ve (b) floralkil zincirli türevlerinin moleküller arası boşluk doldurma modeli (Jones et al. 2007)

Şekil 3.14 de moleküler yapıları verilen perilen ve naftalen diimid türevleriyle yapılan çalışmalarda, havaya karşı kararlı en yüksek mobilite değeri, yüzeyi n-oktadesil trietoksisilan (OTS) ile kaplı  $\text{SiO}_2$  dielektrik üzerine vakum buharlaştırma tekniği ile kaplanan düz floralkil zincirli perilen diimid türevi (PDI- $\text{C}_4\text{F}_7$ ) ile elde edilmiştir. Azot ( $\text{N}_2$ ) atmosferi altında elektron yük taşıyıcısının mobilite değeri  $1,42 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  iken, atmosfer koşulları altında aynı transistörden elde edilen mobilite değeri  $1,18 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  olarak bulunmuştur (Schmidt 2009). Perilen ve naftalen diimid organik yarıiletkenleri, Şekil 3.14 de gösterilen imit pozisyonlarına ( $\text{R}_3$ ) bağlanan uzun yan zincirler ile çözünürlüğü artmakta ve çözelti prosesli kaplama teknikleri perilen ve naftalen diimid türevlerine uygulanabilmektedir. Çözelti prosesli organik yarıiletkeninden elde edilen en yüksek mobilite, vakum altında  $0,15 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  ve atmosferik ortamda

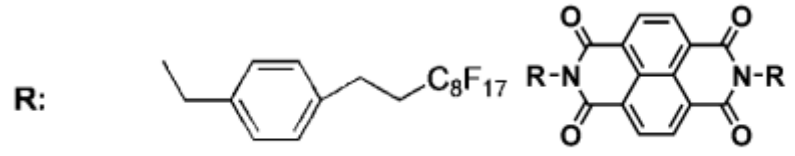
$0,80 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  değerleriyle  $R_2$  pozisyonuna CN (siyano) ve  $R_3$  pozisyonuna  $\text{C}_4\text{F}_7$  floroalkil zinciri bağlı olan PDIF- $\text{CN}_2$  türeviyle elde edilmiştir (Piliago 2009). Naftalen diimide organik yarıiletkenin aktif tabaka olarak kullanıldığı OFETden elde edilen atmosferik ortamdaki en yüksek mobilite değeri  $0,57 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  ile tek basamaklı reaksiyon ile sentezlenen floralkillenmiş benzil naftalen tetrakarboksilik diimit (Şekil 3.14 (b)) türevinden elde edilmiştir (See 2008). Aromatik halkaya siyano gruplarının (NDI-8 $\text{CN}_2$ ) bağlanması ile elde edilen atmosferik ortamdaki mobilite değeri ise  $0,15 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  dir. Aynı naftalen diimid türevi ile yapılan havaya karşı kararlı, saydam ve esnek yapılı organik OFET'den (Şekil 3.14 (c)) elde edilen mobilite değeri ise  $0,01 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  olup, bu çalışma ile saydam yapılı OFET üretilmiştir (Jones et al., 2007).



(a)



**NDI-8CN:**  $R = \text{H}$   
**NDI-8CN<sub>2</sub>:**  $R = \text{CN}$



(b)



(c)

Şekil 3.14. OFET yapılarında kullanılan (a) Perilen diimid türevleri (b) naftalen diimid türevleri (c) NDI türevinin kullanıldığı saydam ve esnek organik ince film transistör görüntüsü (Jones et al., 2007)

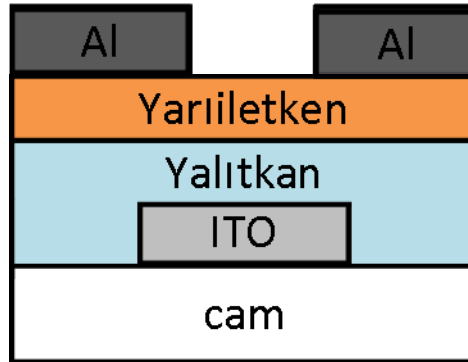


## 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 4.1. Alan Etkili Organik Transistör Yapısı

#### 4.1.1. Altlık Hazırlanması

Alan etkili organik transistör yapıları Şekil 4.1 de gösterildiği gibi üst kontak/alt kapı geometri yapısına göre hazırlanmıştır. Tüm deneysel çalışmalarda altlık olarak Aldrich firmasından alınmış olan 2,5 cm × 2,5 cm × 2mm boyutlarındaki 10  $\Omega/\text{cm}^2$  yüzey iletkenliğe sahip indiyum katkılı kalay oksit (ITO) kaplı camlar kullanılmıştır. Cam üzerindeki ITO tabakasının kaldırılması için seyreltik HCl:HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O (4,6:0,4:5) asit karışımı hazırlandı. ITO üzerinde belirli bir alan asite karşı koruyucu bir tabaka ile kaplanarak seyreltik asit karışımı içerisinde altlıkların daldırılması ile kapı kontak alanı cam üzerinde oluşturulmuştur. Asit işleme tabi tutulan altlıkların üzerindeki organik kirliliklerin temizlenmesi için sırasıyla aseton, metanol ve deiyonize su ile 30 ar dakika ultrasonik banyoda yıkama işlemi yapılmıştır.



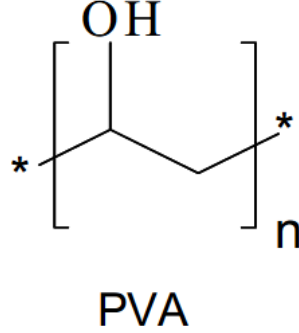
Şekil 4.1. Deneyisel çalışmalarda hazırlanan alan etkili organik transistörün kesit yapısı

#### 4.1.2. Polimerik Yalıtkan filmlerin hazırlanması

##### 4.1.2.1. Polivinil alkol (Poly-vinyl-alcohol; PVA)

Molekül yapısı Şekil 4.2 de gösterilen PVA polimer dielektrik malzeme su, metanol gibi polar çözügenler de çözünebilen sentetik polimer malzemedir. Saf su da çözeltisi hazırlanan PVA polimer malzemenin cam üzerinde film yapısı oldukça pürüzsüz olup, içerdiği hidroksil grupları nedeniyle yüzey enerjisi yüksek dielektrik malzemelerden biridir. PVA dielektrik malzeme dokuma sanayinde yapışkan, seramik yapıştırıcı, kozmetikte, elektronik endüstride ve sivil

mühendislikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Altlık üzerinde oluşan film yapısının saydam ve sert olması nedeniyle geniş alan uygulamalarında kullanılabilecek dielektrik malzemelerden biri olmaktadır (Marjanovic, 2005).



Şekil 4.2. Polivinil alkol polimer yalıtkanın molekül yapısı (Marjanovic, 2005).

127,000 molekül ağırlığına sahip polivinil alkol (PVA) (Sigma Aldrich Mowiol®40-88) yalıtkan malzemesinin %10 ve %7 (%1 = 10 mg/ml) ağırlık oranları ile hazırlanan sulu çözeltisi 1500 devir/dakika dönme hızıyla 45 saniye süre ile asitle biçimlendirilmiş ve temizlenmiş ITO altlıklar üzerine kaplanmaktadır. Elde edilen PVA ince film 60 °C sıcaklıktaki fırında bir gece boyunca kuruması için bekletilmektedir. Şekil 4.3 de gösterilen programlanabilir Laurell marka WS-4000B-6NPP model döndürme kaplama sistemi, çözelti prosesli tüm ince film kaplama sistemlerinde kullanılmıştır.

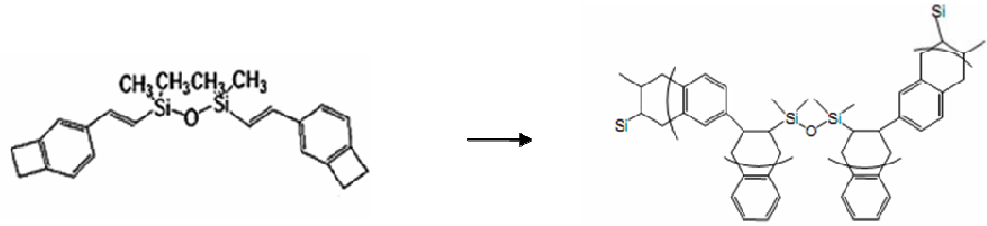


Şekil 4.3. Döndürme kaplama sistemi

#### 4.1.2.2. Diviniltetrametildisiloksan-bis (Benzosiklobuten; BCB)

Benzosiklobüten kimyasına dayalı BCB malzemesi yüksek sıcaklıklarda sertleşen ve reçine kıvamındaki özellikleri ile basit işlemleri ve uygulamalı, üstün dielektrik özellikli, yüksek polarlanmaya sahip, düşük nem soğurma ve hızlı ısısal süreçlerde yan ürün ortaya çıkarmaması gibi özellikleriyle elektronik endüstrisinde kullanılmaktadır (Mills, 1997). Şekil 4.4 de molekül yapısı verilen BCB monomer, yüksek sıcaklıklarda aktive olarak çapraz bağlı (crosslink) polimer yapısına dönüşmektedir (Chua, 2003). BCB monomer yapısının tamamıyla çapraz bağlı polimer yapıya dönüşmesi saf azot ortamında 220 °C üzerindeki sıcaklıklarda 10 dakikanın altında gerçekleşmektedir (Beechinor, 1997).

Mesitilen (mesitylene) içinde hazır olarak alınan diviniltetrametildisiloksan-bis(Benzosiklobuten; BCB) monomer malzemenin çözeltisi, ITO altlık üzerine 1500 devir/dakika dönme hızıyla 45 saniye süre ile kaplanmıştır. BCB monomer yapıları filmin çapraz bağlı polimer yapıya dönüşmesi 250 °C sıcaklıkta Argon inert gaz ortamlı vakum fırınında ısıtılmasıyla sağlanmıştır (Singh, 2005).



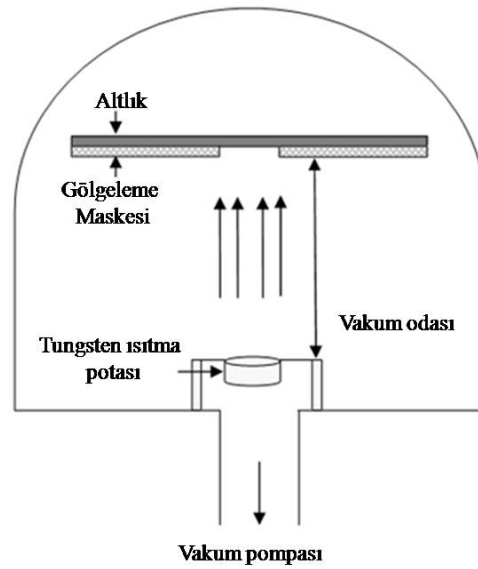
Şekil 4.4. BCB monomerin ve polimerin moleküler yapıları (Chua, 2003).

#### 4.1.3. Yarıiletken katmanların hazırlanması

Deneysel çalışmalarda kullanılan bis-benzimidazol ve etilhekzil gruplarının bağlı olduğu perilen ve naftalen organik yarıiletken malzemeler  $10^{-6}$  Torr basınç altında alümina potaların kaynak olarak kullanıldığı Şekil 4.5 de şeması gösterilen termal buharlaştırma sistemi ile yalıtkan kaplı altlıklar üzerine kaplanmıştır. Kaplanan yarıiletkenlerin kalınlıkları ve buharlaştırma oranları kalibre edilmiş silikon kuvars sensör ile ölçülmüştür. 100 nm kalınlığa sahip tüm organik yarıiletkenler 0,04 Å/saniye buharlaşma oranı ile kaplanmıştır.

#### 4.1.4. Metal Kontakların Hazırlanması

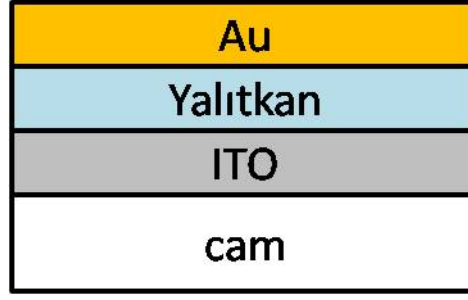
Akaç ve kaynak metal kontaklar için LiF/Al (0,6/60nm)  $10^{-6}$  mbar basınç altında gölgeleme maskesi arasından yarıiletken kaplı ince filmler üzerine buharlaştırılmıştır. LiF için tungsten pota, %99,99 saflıkta Al (Sigma-Aldrich) için alümina kaplı tungsten pota kullanılmıştır. Gölgeleme maskesinin kullanılması sonucunda tüm alan etkili organik transistörlerin kanal uzunlukları,  $L = 47 \mu\text{m}$  ve kanal genişlikleri  $W = 2 \text{ mm}$  olarak ölçülmüştür. Metal kontakların kaplama sistemi Şekil 4.5 de şematik resmi gösterilen termal buharlaştırma sistemidir.



Şekil 4.5. Termal buharlaştırma sistemi.

#### *Metal/Yalıtkan/Metal (MIM) yapısı*

PVA ve BCB kaplı filmlerin kapasitans değerlerini ve yapıdaki hareketli iyon hareketlerini belirlemek için Şekil 4.6 da gösterilen paralel plakalı MIM yapısı kullanılmıştır. MIM yapısı alan etkili organik transistörlerde açıklanan yalıtkan filmlerin ve metal kontakların hazırlanması aşamasındaki yöntemlere göre hazırlanmıştır. Alt kontak için asit ile biçimlendirilmiş ITO kaplı cam ve üst kontak için ITO nun iş fonksiyon değerine yakın olan %99,99 saflıkta Altın (Au) kullanılmıştır.



Şekil 4.6. Metal/yalıtkan/metal yapısının şematik gösterimi

#### 4.1.5. Alan etkili organik transistörlerin Karakterizasyonu

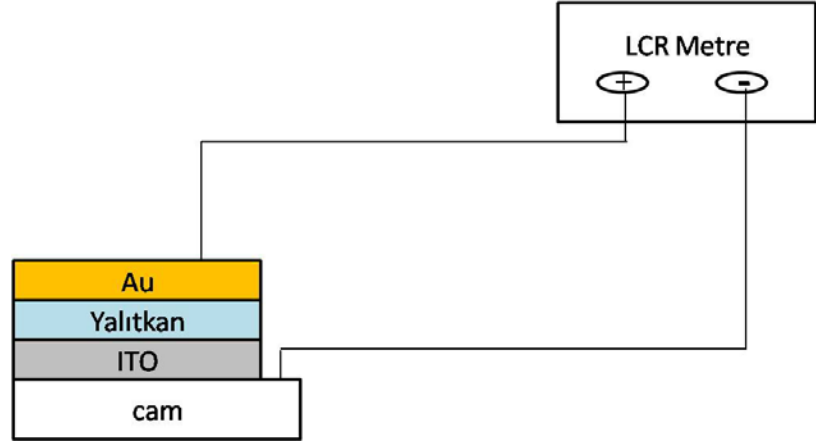
##### 4.1.5.1. Elektriksel Ölçümler

Elektriksel bağlantı şeması Şekil 3.2 de gösterilen alan etkili organik transistörlerin akım-gerilim verileri iki adet Keithley 2400 marka akım-gerilim kaynağı kullanılarak, Labview yazılımı ile hazırlanmış bilgisayar kontrollü program ile alınmıştır. Kapı kontağına yarıiletken/yalıtkan arayüzeyinde elektron yük taşıyıcılarının yığılması için pozitif gerilim uygulanırken, transistörlerin n-kanal çalışma bölgesi için akaç kontağına pozitif gerilim uygulanmıştır. Kaynak metal kontağı, akaç ve kapı kontakların negatif kutbunu oluşturmakta ve toprak bağlantısı yapılmıştır. Elektriksel ölçümler inert azot gazı ortamında Şekil 4.7 de gösterilen MBraun marka glove box sistemi içerisinde alınmıştır. Foto-transistör çalışmalarında ışık kaynağı olarak 750 W Xenon lambaya sahip 1,5 AM (air mass) spektral dağılımını veren solar simülatörü kullanılmıştır. Işık şiddeti, Fraunhofer ISE tarafından kalibre edilmiş tek kristal silisyum güneş pili temelli ışınım sensörü kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 4.7. Elektriksel ölçümlerin yapıldığı glove box sistemi

Kapasitans-gerilim ölçümleri (C-V) için Agilent E4980A LCR metre kullanılmış ve 0,02 V/saniye gerilim artış miktarı ile -10V/+10V gerilim aralığında 1kHz frekans da ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.8 de MIM yapısının C-V ölçüm düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Kapasitans-gerilim (C-V) ölçüm düzeneği

Deneysel çalışmalarda kullanılan organik yarıiletkenlerin HOMO ve LUMO enerji seviyelerinin belirlenmesi için üç elektrotlu sistemden oluşan döngüsel voltametri tekniğinden faydalanılmıştır. Bu çalışmada CH Instrument 660B model potansiyostat kullanılmıştır. Bu teknikte potansiyelin uygulandığı çalışma elektrotu, akımın toplandığı sayıcı elektrot ve referans elektrottan oluşan elektrokimyasal hücre kullanılmaktadır.

#### 4.1.5.2. Spektroskopik ölçümler

Organik moleküllerin dalga boyuna karşılık soğurma spektrumları Analytic Jena marka S 600 UV-Vis diode array spektro fotometre ile alınmıştır. Tüm ölçümler 1nm aralıklarla hızlı tarama modunda yapılmıştır. Ölçümlerde organik yarıiletkenlerin çözeltileri ve kuartz cam üzerinde hazırlanan filmleri kullanılmıştır.

#### **4.1.5.3. Film Yüzeylerinin Morfoloji Analizleri**

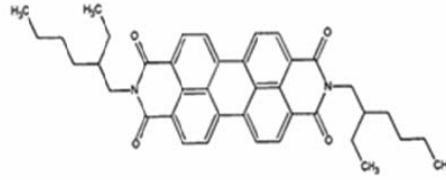
Organik yarıiletken filmlerin ve yalıtkan filmlerin yüzey üzerindeki morfolojik analizleri için Ambios marka Q-Scope 250 Scanning Probe Microscope sistemi kullanılmıştır. Tüm analizler oda koşullarında ve wave modunda alınmıştır. Yalıtkan filmlerin kalınlıklarının tespiti için Ambios XP-1 yüzey profilometresi kullanılmıştır.

## 5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

### 5.1. Organik yarıiletkenler

#### 5.1.1. Perilen Diimid türevleri

Perilen diimid (PDI) türevleri yüksek termal, foto-fiziksel kararlılıkları ve yüksek molar soğurma katsayıları ile bilinmektedirler (Karapire et al. 2004). Perilen türevlerinin akseptör özelliklerinin baskın olması nedeniyle bu tez çalışmasında n-tipi yarıiletken olarak seçilmelerinin sebebidir. Şekil 5.1 de molekül yapıları verilen perilen türevleri simetrik yapıya sahip olmakla birlikte imide pozisyonlarına bağlanan fonksiyonel gruplara göre çözelti fazındaki UV-Vis soğurma spektrumları incelendiğinde soğurma bandları değişmektedir. Etil hekzil perilen diimid (EHPDI) 458 nm, 490 nm ve 526 nm’de  $\pi$ - $\pi^*$  geçişi ve bunlara ait titreşim enerji seviyelerinden kaynaklanan karakteristik üç soğurma bandı görülmektedir. Benziimidazol aromatik grupların bağlı olduğu PBBI türevinde ise soğurma bandları kırmızı bölgeye 138 nm kayarak, görünür bölgede 530 nm ve 660 nm da iki soğurma bandı vermektedir (Şekil 5.2).



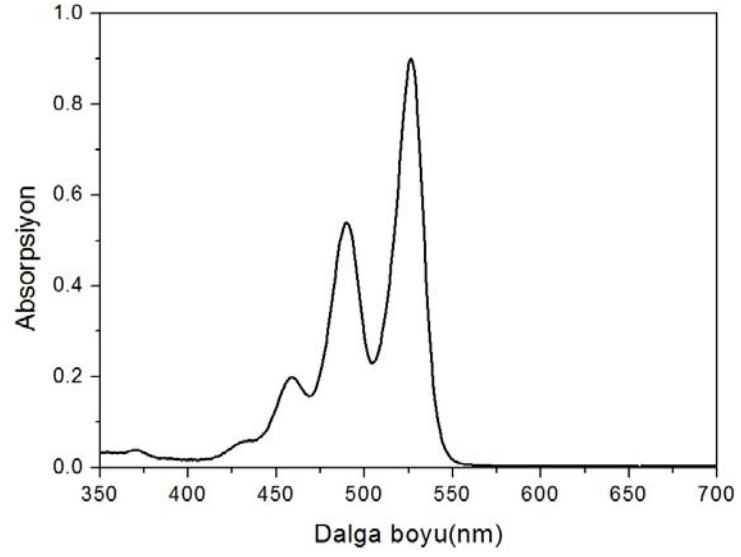
**EHPDI**



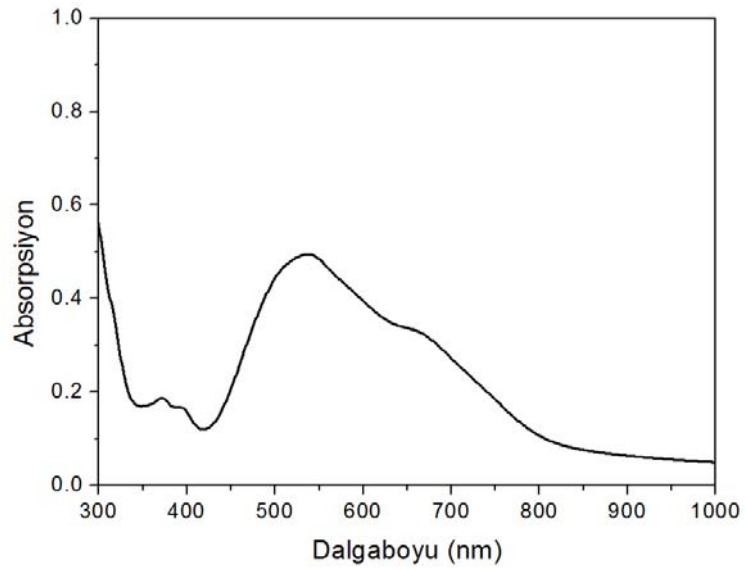
**PBBI**

Şekil 5.1. Deneyisel çalışmalarda kullanılan perilen diimid türevlerinin molekül yapıları





(a)



(b)

Şekil 5.2. a) EHPDI ve b) PBBI organik yarıiletkenlerin  $5 \times 10^{-5}$  M kloroform çözeltilisilerinin oda sıcaklığında absorpsiyon spektrumları

Elektrokimyasal olarak EHPDI ve PBBI türevlerinin indirgenme ve yükseltgenme potansiyelleri döngüsel voltametri ile bulunarak moleküllerin HOMO ve LUMO enerji düzeyleri;

$$E_{\text{LUMO}} (\text{eV}) = -e[(E_{1/2\text{redox}} - E_{\text{Fc}}) + 4,8 \text{ V}] \quad (5.1)$$

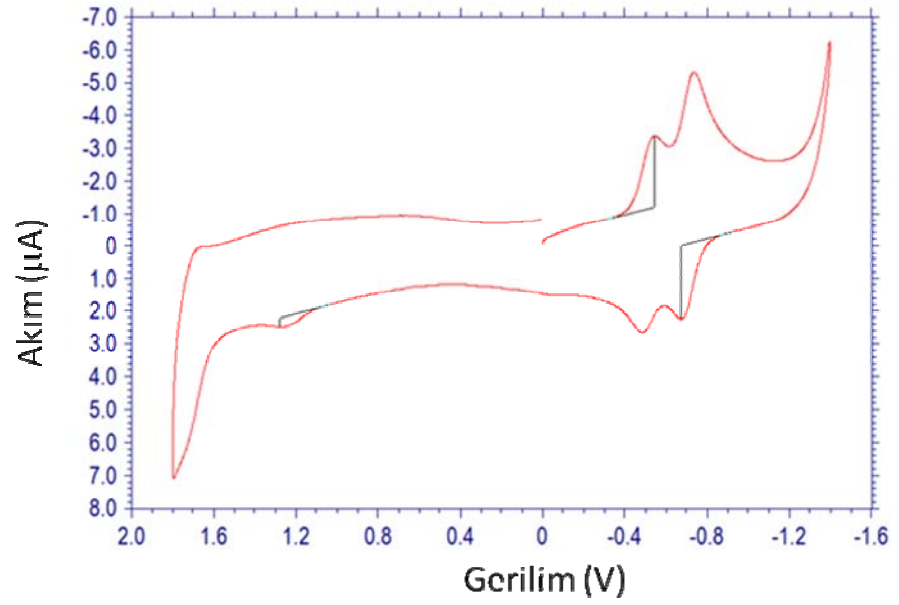
$$E_{\text{HOMO}} (\text{eV}) = E_{\text{LUMO}} - E_g \quad (5.2)$$

eşitlikleri kullanılarak vakum seviyesine göre hesaplanmıştır. Eşitliklerde verilen  $E_{1/2\text{redox}}$ ; birincil indirgenme potansiyelinin gözlemlendiği ortalama potansiyel değeri,  $E_{\text{Fc}}$ ; ferrosenin yükseltgenme potansiyelini,  $E_g$ ; optik band aralığını ifade etmektedir. Denklemden yer alan 4,8 V değeri Ag/AgCl elektrotun vakum seviyesine göre potansiyel değeridir. Referans elektrot olarak Ag/AgCl, sayıcı elektrot olarak Pt tel, çalışma elektrodu olarak camı karbon elektrot (CGE) kullanılmıştır. Tüm ölçümlerde potansiyel tarama hızı 25-50 mV/s arasında belirlenmiş ve destek elektroliti olarak tetrabutyl amonyumhegzaflorofosfat'ın (TBA(PF<sub>6</sub>)) 0,1 M asetonitril çözeltisi kullanılmıştır. Perilen moleküllerinin destek elektroliti içerisinde çözünürlüğünü arttırmak için kloroform (CHCl<sub>3</sub>) ilave edilmiştir. Şekil 5.3 de verilen EHPDI molekülünün indirgenme bölgesinde ikili ardışık tersinir indirgenme pikleri -0,54V ve -0,75 V değerlerinde karakteristik olarak ortaya çıkarken, PBBI molekülü ise -0,91 V değerinde tek indirgenme piki vermektedir. Çizelge 5.1 de EHPDI ve PBBI molekülleri için bulunan optiksel band aralığı,  $E_{\text{LUMO}}$  ve  $E_{\text{HOMO}}$  değerleri verilmektedir.

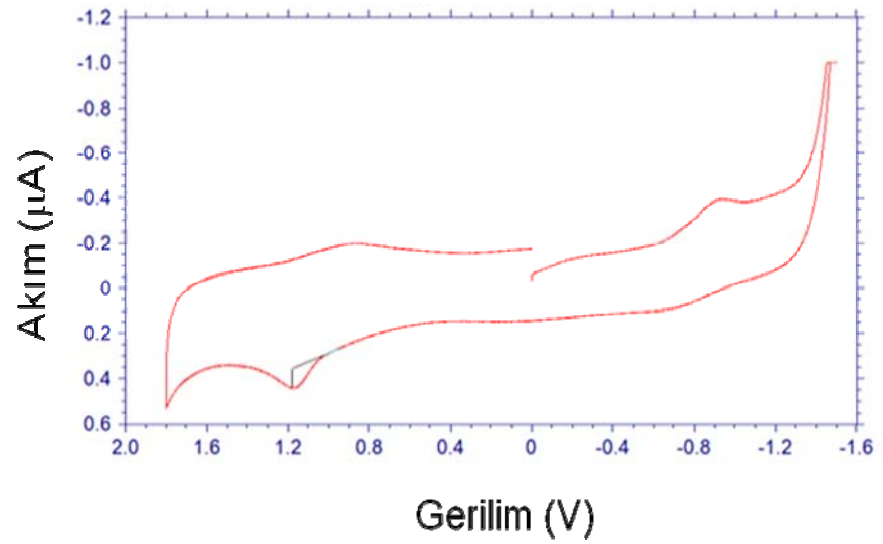
Çizelge 5.1. EHPDI ve PBBI'nın döngüsel voltametri sonuçları ve enerji seviyeleri.

| Molekül | $E_0-E_{1R}$<br>(V) | $E_{1R}-E_{2R}$<br>(V) | $E_{1/2\text{REDOX}}$<br>(V) | $E_{G,\text{optik}}$<br>(eV) | $E_{\text{LUMO}}$<br>(eV) | $E_{\text{HOMO}}$<br>(eV) |
|---------|---------------------|------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| EHPDI   | -0,54               | -0,75                  | -0,64                        | 2,25                         | -3,76                     | -6,01                     |
| PBBI    | -0,91               | -                      | -0,87                        | 1,45                         | -3,52                     | -4,97                     |

Not: Enerji seviyelerinin başındaki negatif işaret, vakum seviyesinin sıfır enerji seviyesi olarak kabul edildiğini göstermektedir.



(a)



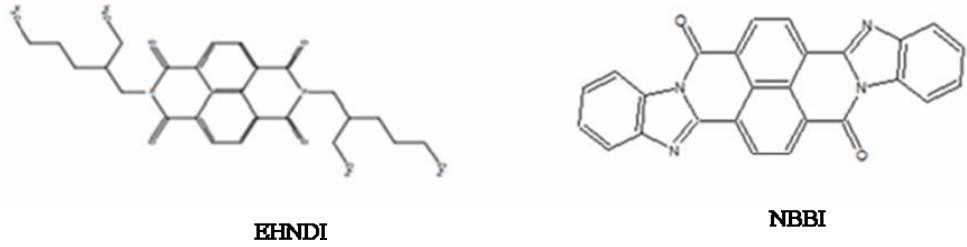
(b)

Şekil 5.3. a) EHPDI ve b) PBBI organik yarıiletkenlerin döngüsel voltametri ile alınan elektro kimyasal indirgenme ve yükseltgenme potansiyelleri. Potansiyel tarama hızı 25-50 mV/s olarak belirlenmiş ve tüm ölçümler oda sıcaklığında alınmıştır.

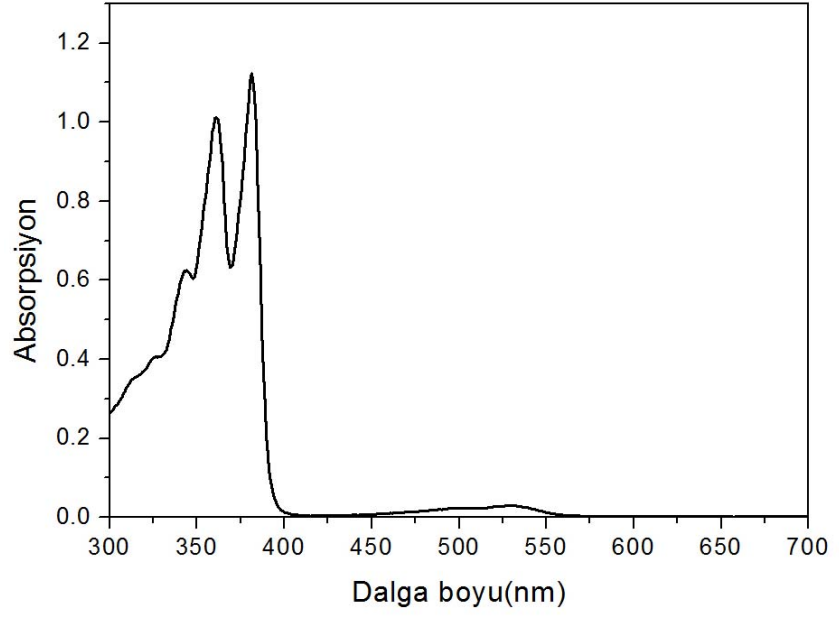
### 5.1.2. Naftalen Diimid türevleri

Naftalen diimid (NDI) türevleri, PDI türevleri gibi yüksek termal ve foto-fiziksel kararlılığa sahip organik moleküllerdir (Erten et al 2005). Tez çalışması boyunca kullanılan naftalen türevleri, perilen türevlerinin imide pozisyonlarına

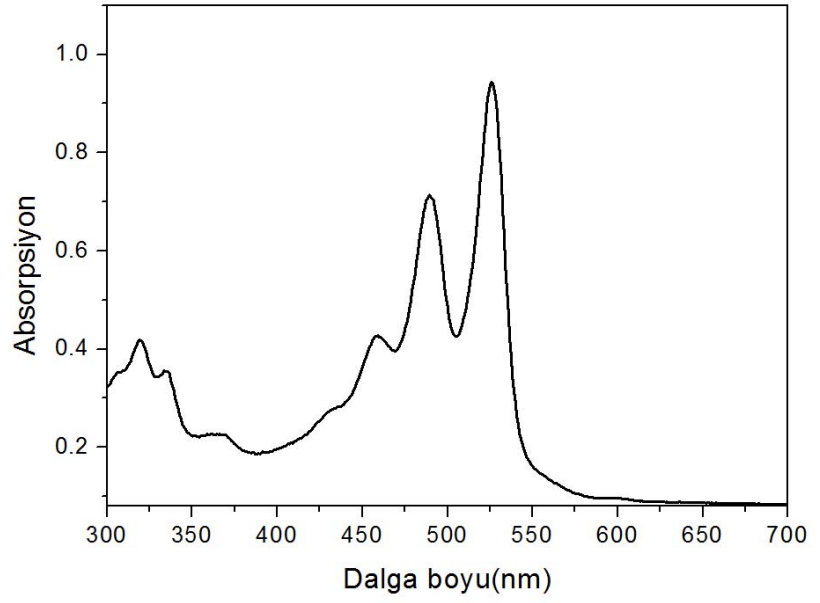
bağlanan aynı fonksiyonel grupları içermektedir. Buradaki temel hedef iki arilen (arylene) grubunu aynı fonksiyonel grupların bağlanması sonucunda alan etkili transistör üzerindeki fonksiyonel grupların ve çekirdek yapıların etkilerini yalıtkan tabakaya bağlı olarak görebilmektir. Deneyisel çalışmalarda kullanılan naftalen türevleri imit pozisyonlarına aynı fonksiyonel grupların bağlanması ile oluşan simetrik yapıya sahiptirler. Şekil 5.4 de molekül yapıları gösterilen naftalen türevleri, perilen türevlerinde olduğu gibi NDI'in imide pozisyonlarına etil-hekzil alkil zincirleri (EHNDI) ve benziimidazol (NBBI) aromatik gruplar bağlıdır. EHNDI molekülünün çözelti ortamında UV-Vis soğurma spektrumu incelendiğinde NDI yapılarında olduğu gibi UV bölgede 342 nm, 361 nm ve 381 nm dalga boylarında  $\pi$ - $\pi^*$  geçişlerinden ve bunlara ait titreşim enerji seviyelerine ait üç karakteristik soğurma bandı görülmektedir. Aromatik grupların bağlı olduğu NBBI türevinde ise soğurma bandları görünür bölgeye kayarak, 458 nm, 489 nm ve 525 nm de üç soğurma bandı vermektedir. Şekil 5.5 de verilen PDI ve NDI türevlerinin soğurma bandlarındaki farklılıklarının sebebi  $\pi$  kojüstasyon boyut etkisinden kaynaklanmakta ve her türev kendi içerisinde kojüstasyon etkisinden dolayı batokromik kayma (bathochromic shift) göstermektedir (Adachi et al. 1995).



Şekil 5.4. Deneyisel çalışmalarda kullanılan naftalen diimid türevlerinin molekül yapıları



(a)



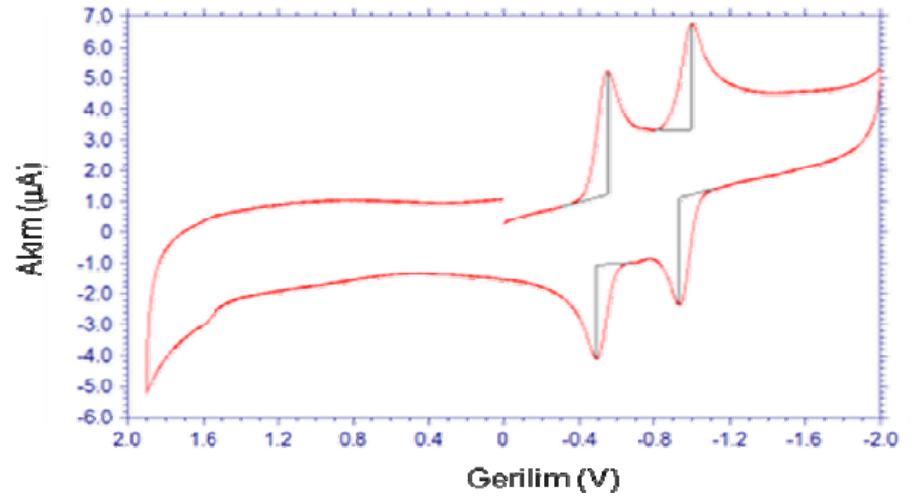
(b)

Şekil 5.5. a) EHNDI ve b) NBBI organik yarıiletkenlerin  $6 \times 10^{-5} \text{M}$  kloroform çözeltililerinin oda sıcaklığında alınmış absorpsiyon spektrumları.

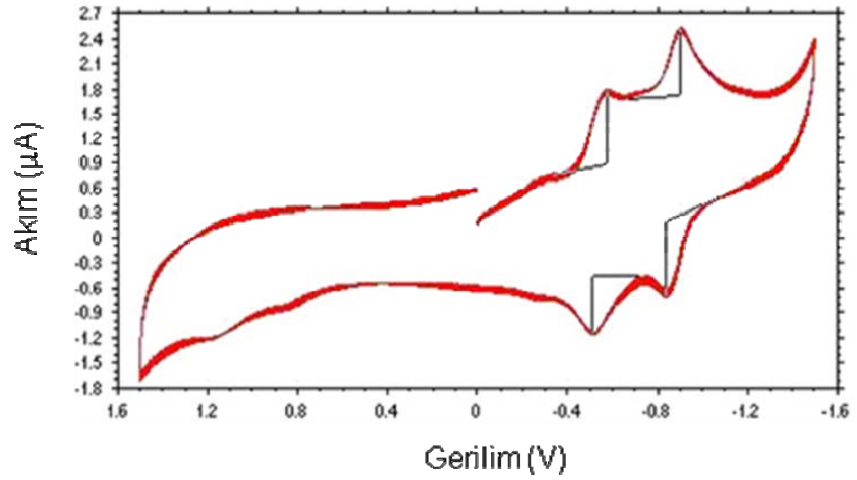
Elektrokimyasal olarak EHNDI ve NBBI türevlerinin Şekil 5.6 da gösterilen indirgenme ve yükseltgenme potansiyelleri perilen türevlerinde olduğu gibi aynı sistem üzerinden döngüsel voltametri ile bulunarak, Eşitlik 5.1 ve 5.2 yardımı ile moleküllerin Çizelge 5.2 de verilen HOMO ve LUMO enerji düzeyleri hesaplanmıştır.

Çizelge 5.2. EHNDI ve NBBI'nın döngüsel voltametri sonuçları ve enerji seviyeleri.

| Molekül | $E_0-E_{1R}$<br>(V) | $E_{1R}-E_{2R}$<br>(V) | $E_{1/2REDOX}$<br>(V) | $E_G$<br>(eV) | $E_{LUMO}$<br>(eV) | $E_{HOMO}$<br>(eV) |
|---------|---------------------|------------------------|-----------------------|---------------|--------------------|--------------------|
| EHNDI   | -0,55               | -1,00                  | -0,77                 | 3,11          | -3,63              | -6,74              |
| NBBI    | -0,54               | -0,87                  | -0,7                  | 1,91          | -3,87              | -5,78              |



(a)



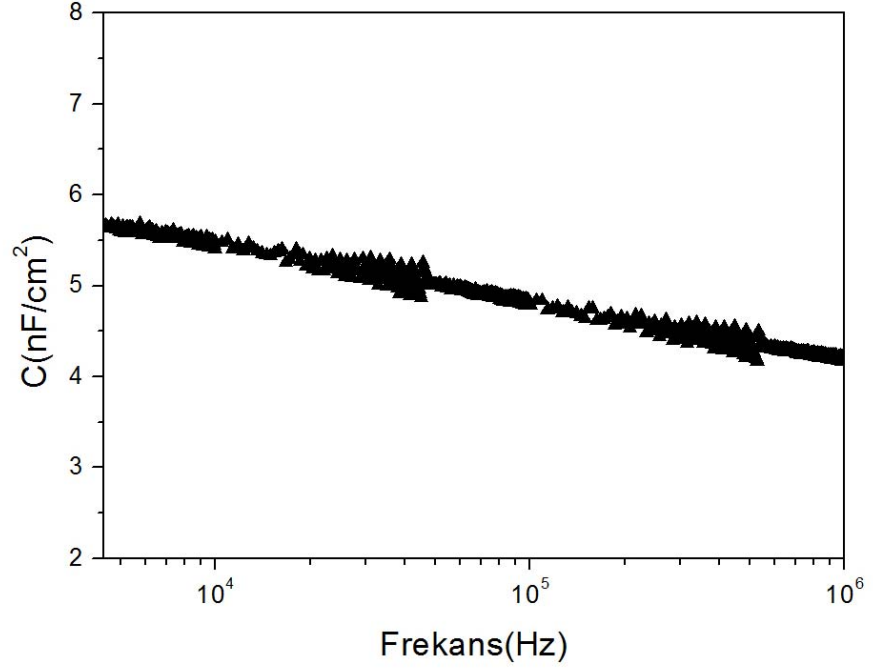
(b)

Şekil 5.6. a) EHNDI ve b) NBBI organik yarıiletkenlerin döngüsel voltametri ile alınan elektro kimyasal indirgenme ve yükseltgenme potansiyelleri.

## 5.2. Yalıtkan Malzemeler

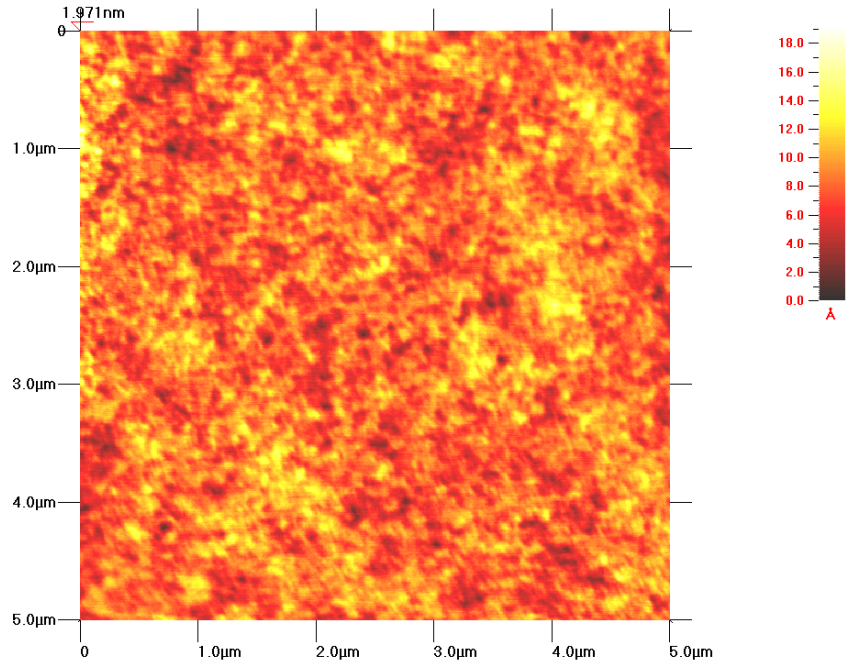
### 5.2.1. Polivinil Alkol Polimerik Yalıtkan Film Özellikleri

Polivinil alkol malzemesinin sulu çözeltisi ile döndürme kaplama tekniği kullanılarak hazırlanan MIM yapısının C-V ölçümleri, frekansa bağımlı ve gerilime bağılı olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.7 de gösterilen PVA temelli MIM yapısının kapasitansa karşılık frekans grafiğinde görüldüğü gibi, PVA yalıtkanın kapasitans değeri frekansa bağımlı olarak değişmektedir. Düşük frekans değerlerinde maksimum kapasitans değeri elde edilirken, frekans arttıkça bu değer azalmaktadır. Frekansa bağılı kapasitans değerinin bu değişikliği, yalıtkan tabaka içerisinde bulanabilecek bazı yüklerin frekansa bağılı davranışlarından kaynaklandığına atfedilmektedir. Elektrotlara uygulanan elektrik alan etkisi ile yalıtkan malzeme içerisinde bulunan serbest olmayan yükler belli bir bölge içerisinde hareket edebilmektedirler ve bu yükler metal/yalıtkan arayüzeyinde tuzaklanması ile buna bağılı oluşan boşatılmış yük bölgesinden kaynaklanan bir kapasitif etki meydana gelmektedir. Yalıtkan malzemenin yüksek frekanslarda kapasitif değerinin düşmesi ise yalıtkan malzeme içerisindeki moleküler dipollerin hızla değişen elektrik alana karşı değişimlerini takip edememesinde kaynaklandığı düşünülmektedir (Shekar 1999). Döndürme kapla tekniği ile kaplanan PVA yalıtkan film tabakanın kalınlığı 1,1  $\mu\text{m}$  ve birim alandaki kapasitans değeri 1 kHz de yaklaşık olarak 6,0 nF/cm<sup>2</sup> dir. PVA yalıtkan filmin dielektrik sabiti  $\epsilon_{\text{PVA}} = 7,5$  olarak hesaplanmıştır.



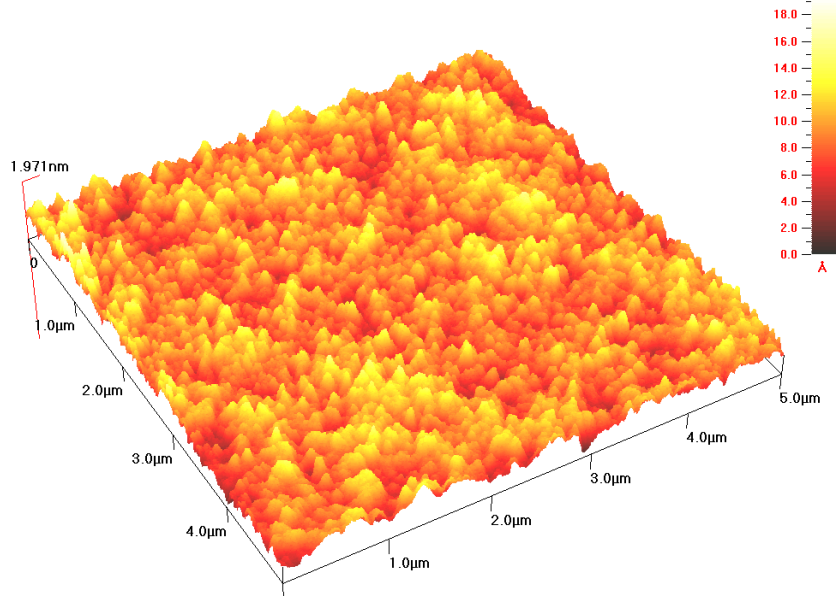
Şekil 5.7. PVA temelli MIM yapısının kapasitans-gerilim grafiği

Şekil 5.8 de PVA yalıtkan filmin atomik kuvvet mikroskopu (AFM) ile wave modunda alınan iki ve üç boyutlu yüzey morfolojisi görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi film yüzeyi oldukça düzgün olup, ortalama pürüzlülük (root mean square) değeri 0,2 nm olarak ölçülmüştür.



(a)



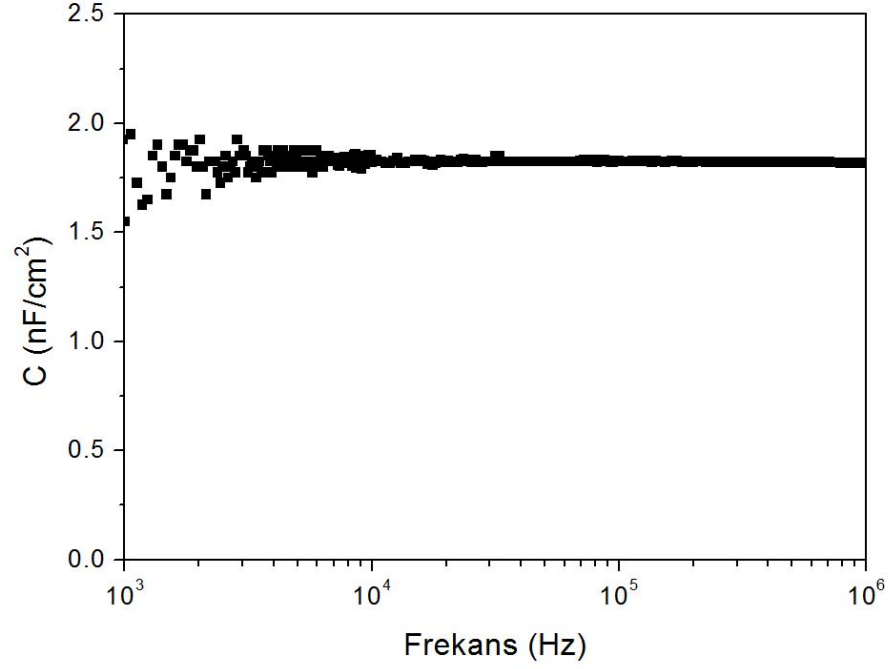


(b)

Şekil 5.8. PVA yalıtkan filmin a) iki ve b)üç boyutlu AFM görüntüleri

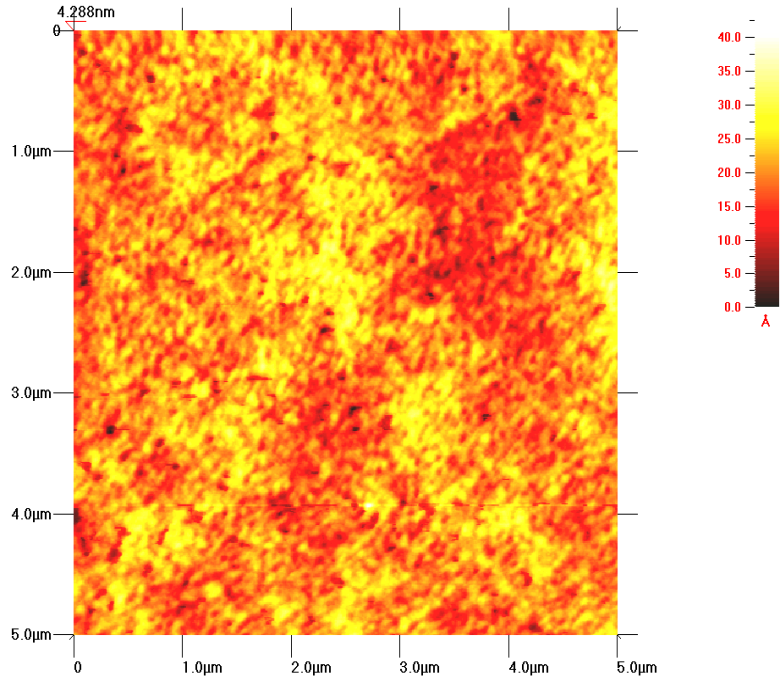
### 5.2.2. Benzocyclobutene (BCB) Polimerik Yalıtkan Film Özellikleri

BCB polimer yalıtkan malzemesinin MIM yapısı kullanılarak kapasitans gerilim ölçümleri Şekil 5.9 da verilmektedir. PVA yalıtkan film de frekansa bağlı olarak kapasitans değerindeki değişim BCB yalıtkan filmde görülmemektedir. C-V ölçümlerinden yola çıkarak BCB yalıtkan filmdeki safsızlık PVA yalıtkan filmine göre oldukça az olduğu söylenebilir. BCB malzemesinin reçineye benzer yapısı olmasından dolayı, vakum fırınında polimerleştirilmesi için uygulanan ısıtıl işlemde yüzey üzerinde oluşan bazı delikler (pinhole) oluşabilmektedir. Yapılan C-V ölçümleri ve yüzey analizleri sonucunda pinhole etkisinin, elde edilen filmlerde olmadığı ortaya çıkmaktadır. Döndürme kapla tekniği ile kaplanan BCB yalıtkan film tabakanın kalınlığı  $1,3 \mu\text{m}$  ve birim alandaki kapasitans değeri  $1\text{kHz}$  de  $1.73 \text{ nF/cm}^2$  olarak ölçülmüştür. BCB yalıtkan filmin dielektrik sabiti  $\epsilon_{\text{BCB}} = 2,6$  olarak hesaplanmıştır.

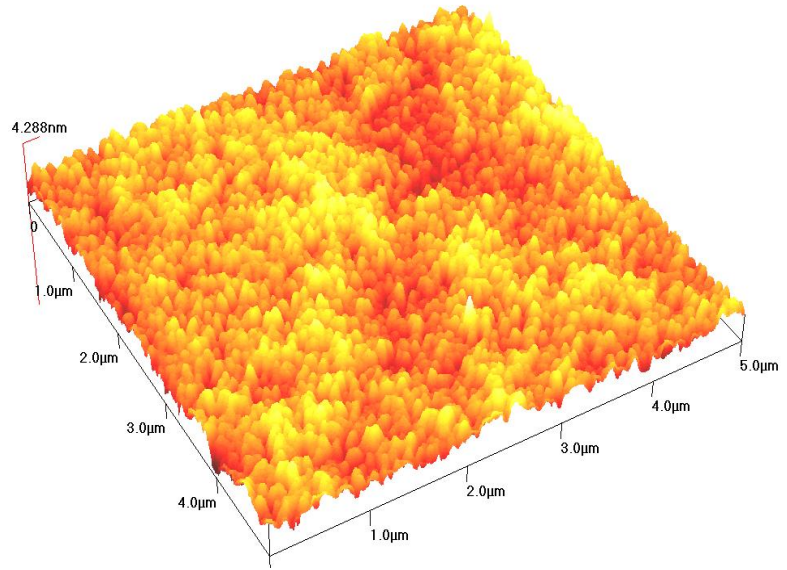


Şekil 5.9. BCB temelli MIM yapısının kapasitans-gerilim grafiği

Şekil 5.10 da BCB yalıtkan filmin atomik kuvvet mikroskopu (AFM) ile wave modunda alınan iki ve üç boyutlu yüzey morfolojisi görülmektedir. Film yüzeyi PVA filminde olduğu gibi oldukça düzgün olup, ortalama pürüzlülük (root mean square) değeri 0,43 nm olarak ölçülmüştür. İki yalıtkan malzemenin film yüzeylerindeki pürüzlülüğün düşük olması yarıiletken/yalıtkan arayüzeyinde oluşabilecek tuzak seviyelerini ortadan kaldırmaktadır. Pürüzlü yüzeye sahip yalıtkan malzemeler yarıiletken filmin morfolojisini etkileyerek arayüzeyde çukurluklar oluşturmakta ve transistörün çalışma performansını düşürmektedir (Irami-Vladu et al 2008).



(a)



(b)

Şekil 5.10. BCB yalıtkan filmin a)iki ve b)üç boyutlu AFM görüntüleri

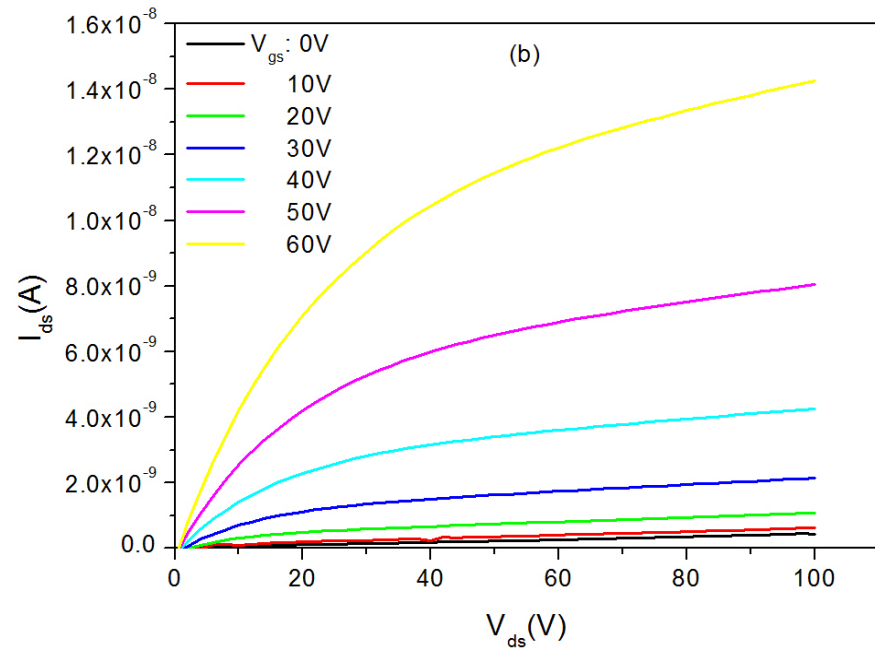
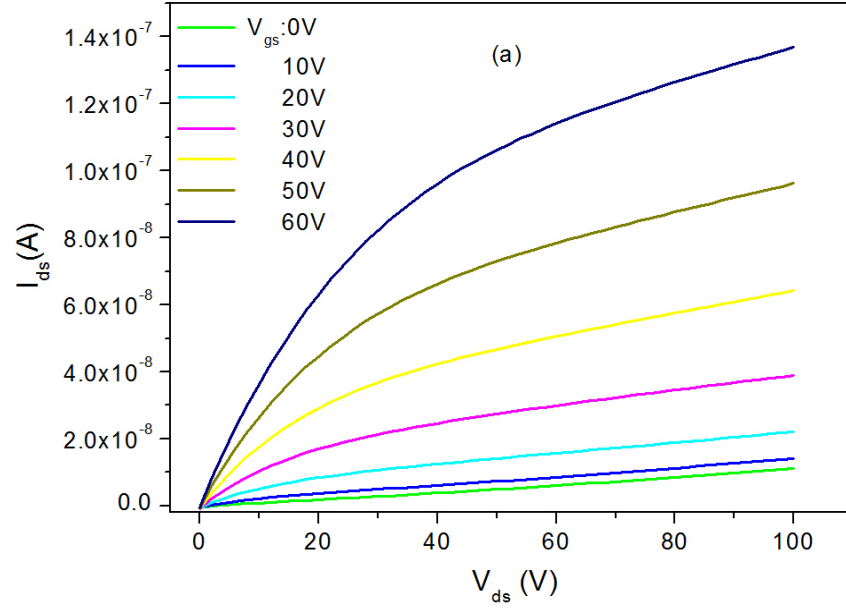
### 5.3. Alan etkili organik transistör (OFET) Sonuçları

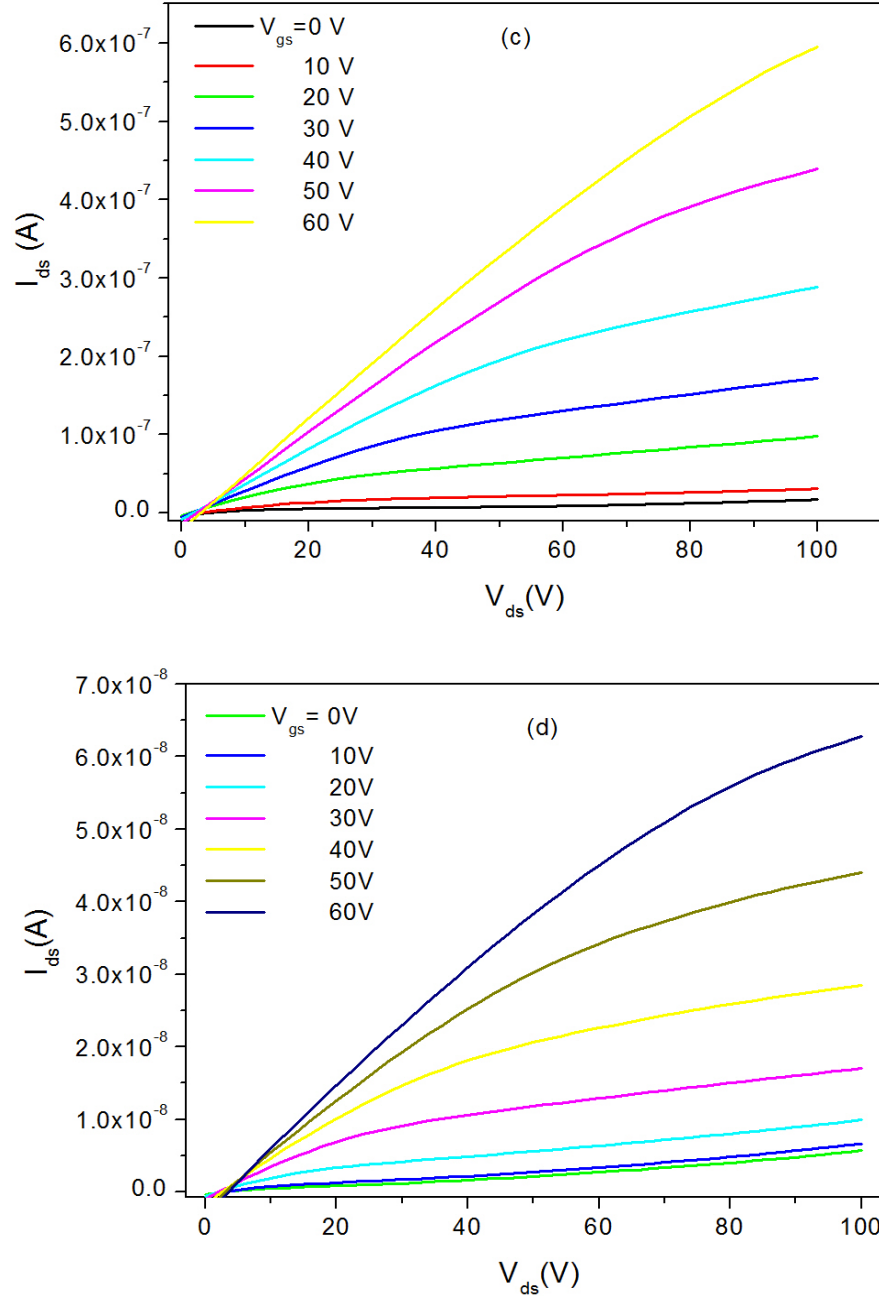
#### 5.3.1. Polimer Yalıtkan Tabakaların OFET Performansı Üzerindeki Etkileri

Bu çalışmada polimer yalıtkan malzemelerdeki hidroksil gruplarının naftalen bis-benzimidazol (NBBI) ve perilen bis-benzimidazol (PBBI) organik yarıiletken temelli OFET yapılarının akım-gerilim karakteristiği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmaların başında yalıtkan malzemelerin seçiminde özellikle hidroksil polar grup içeren PVA ve polar olmayan BCB polimer yalıtkan malzemeleri seçilmiştir. Organik yarıiletken katmanlar termal buharlaştırma tekniği ile 100 nm kalınlıkta yalıtkan film tabakaları üzerine kaplanmıştır. Akaç ve kaynak kontakları için yarıiletkenlerin LUMO enerji seviyeleri ile uyumlu 0,6/60 nm kalınlıkta LiF/Al (%99,99 saflıkta) seçilmiştir. Polimer yalıtkan malzemeler de bulunan polar gruplar, yalıtkan filmlerin yüzey enerjileri arttırırken yüzeye hidrofilik özellik katmaktadır (Chen et al. 2008). PVA yalıtkan filmin yüzey enerjisi  $45 \text{ mJ/m}^2$  (Singh et al. 2005) ve BCB yalıtkan filmin yüzey enerjisi  $34,3 \text{ mJ/m}^2$  olarak bulunmuştur (Yıldırım et al. 2008). Bu çalışmada yalıtkan filmlerin yüzey enerjilerinin OFET yapısı üzerinde etkilerini görmek amacıyla, yaklaşık aynı kapasitans değerine sahip yalıtkan filmler altlıklar üzerine kaplanmıştır. Bu amaçla PVA polimer yalıtkan malzemenin %10 luk sulu çözeltisi hazırlanmış ve  $3,8 \text{ }\mu\text{m}$  kalınlıktaki filmin kapasitans değeri Eşitlik 3.7 kullanılarak yaklaşık  $1,7 \text{ nF/cm}^2$  olarak bulunmuştur. BCB polimer yalıtkan filminden elde edilen kapasitans değeri ise  $1,7 \text{ nF/cm}^2$  dir. Polimer yalıtkan filmlerin kaplanma teknikleri ve diğer süreçler bölüm 4.1.2 de detaylı olarak verilmektedir. Tüm OFET yapıları aynı koşullar altında üretilmiş olup, elektriksel ölçümleri glove box sisteminde alınmıştır. Bu çalışmada BCB yalıtkan film üzerine kaplanan NBBI ve PBBI temelli OFET yapıları sırasıyla NBBI-I ve PBBI-I olarak simgelenirken, PVA yalıtkan film üzerine kaplanan NBBI ve PBBI temelli OFET yapıları NBBI-II ve PBBI-II olarak simgelenmiştir.

Şekil 5.11 de çalışma karakteristikleri gösterilen tüm OFET yapıları kapı gerilimine bağlı olarak n-kanal transistör özellik göstermektedir. Uygulanan düşük gerilim değerlerinde  $I_{ds}$  akımı uygulanan  $V_{ds}$  gerilim ile lineer olarak artış göstermesi yarıiletkenler ile LiF/Al elektrotlar arasında omik kontak kurulduğunu göstermektedir. Çalışma karakteristikleri incelendiğinde, ideal bir alan etkili transistörde kanalın kısırılma (pinch-off) bölgesinin görüldüğü  $V_{ds} \approx V_{gs} - V_{th}$  gerilim değerinde iyi tanımlanmış kısırılma bölgesi görülmemektedir. Doyum

bölgesinde ( $V_{ds} > V_{gs}$ ) kanal boyunca doyum akımı oluşmamakta ve bu bölgede omik davranış devam etmektedir. Doyum bölgesinde yüksek iletkenliğin görülmesinin nedeni yarıiletken/yalıtkan arayüzeyinde tuzaklanmış yüklerin bulunmasına atfedilmektedir (Singh et al. 2005).

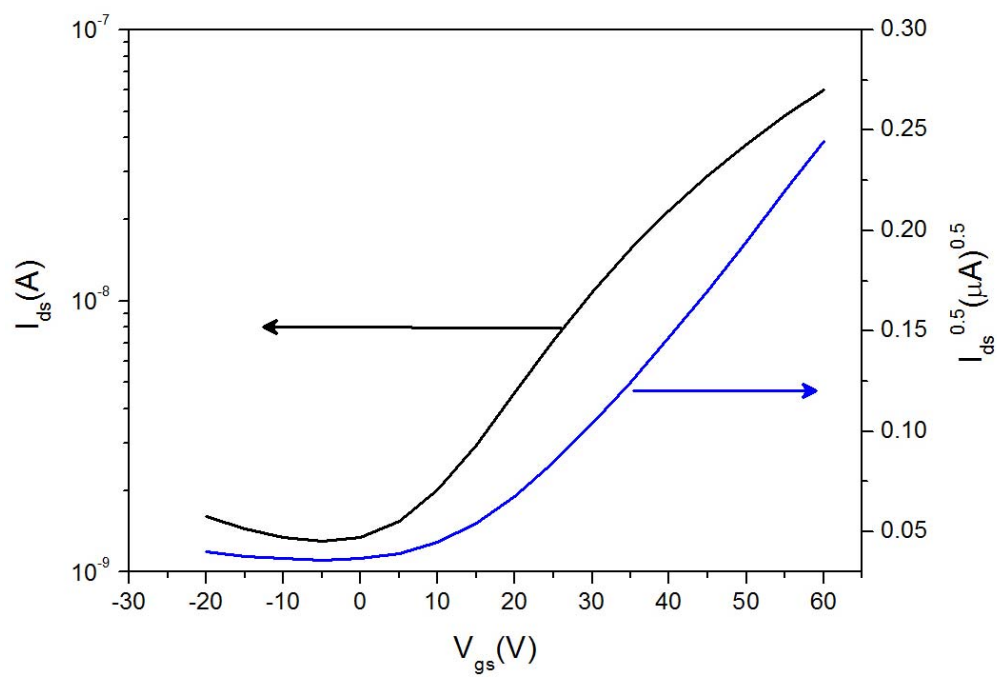




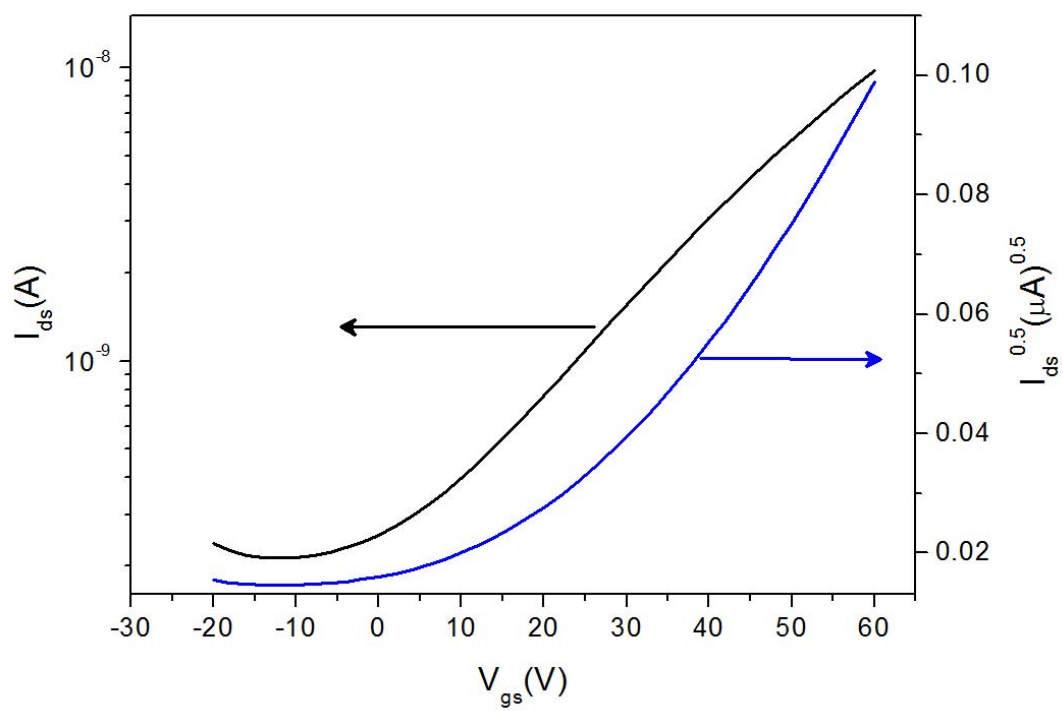
Şekil 5.11. Farklı  $V_{gs}$  gerilimlerde NBBI ve PBBI organik yarıiletken temelli OFET yapıların BCB ve PVA yalıtkan üzerindeki çalışma karakteristikleri a) NBBI-I, b) PBBI-I, c) NBBI-II ve d) PBBI-II. Tüm ölçümler aynı koşullar altında gerçekleştirilmiştir.

Şekil 5.12 de OFET yapıların  $V_{ds} = 50$  V gerilim altında kapı geriliminin tükenim bölgesinden yığınım bölgesine taranmasıyla açık ve kapalı konumdaki akım-gerilim karakteristiğini gösteren transfer karakteristikleri ( $I_{ds}-V_{gs}$ ) ve ( $I_{ds,sat}^{1/2}-V_{gs}$ ) verilmiştir. Çizelge 5.3 de ise OFET yapıların Eşitlik 3.3'ün kullanılması ile transfer karakteristiklerinden elde edilen parametreler verilmiştir. BCB yalıtkan filmler üzerine kaplanan NBBI organik yarıiletken temelli OFET yapısından (NBBI-I)  $1,04 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  değeri ile en yüksek mobilité değeri elde

edilirken, eşik gerilim değeri  $I_{ds,sat}^{1/2}-V_{gs}$  eğiminin gerilim eksenini kestiği noktadan 15 V olarak bulunmuştur. Aynı yalıtkan film üzerinde PBBI (PBBI-I) organik yarıiletken kullanılması ile elde edilen mobilite ve eşik gerilim değerleri sırasıyla  $1,62 \times 10^{-4} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  ve 18 V değerlerine eşittir. Transistörlerin kapalı konumdaki (turn-off) akım değeri polimer yalıtkan malzemelere göre değişiklik sergilemektedir. PVA yalıtkan film içeren transistörlerin tükenim bölgesindeki ( $V_{gs} \leq 0 \text{ V}$ ) akım değeri BCB yalıtkan filmlili transistörlere kıyasla daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. PVA yalıtkan malzemede bulunan hidroksil gruplardan kaynaklanan moleküler dipol oluşturmakta ve kapı elektrotuna uygulanan gerilim ile film boyunca yaratılan dış elektrik alanla birlikte dipollerden kaynaklanan iç elektrik alan oluşmaktadır. BCB yalıtkan film ile yaklaşık aynı kapasitans değerine sahip olmasına rağmen PVA malzeme üzerindeki yarıiletken/yalıtkan arayüzeyine yakın kanala boyunca elektrik alan etkisi ile oluşan akım değeri hem tükenim hem de yığılma bölgesinde yüksek olmaktadır. Eşik gerilimden farklı olarak, akaç-kaynak ( $I_{ds}$ ) akımının kapı gerilimine bağlı olarak üssel artmaya başladığı kapı gerilim değeri olan açma gerilimi (turn-on voltage) değerleri her iki yalıtkan film için değerlendirildiğinde, PVA yalıtkan filmlili aygıtlar BCB yalıtkanına göre daha büyük negatif açma gerilimleri gözlenmiştir. Negatif açma gerilimin gözlenmesinin nedeni olarak yarıiletken/yalıtkan arayüzeyine yakın oluşan kanal da hareketli yük taşıyıcılarını içeren tuzak seviyelerinin varlığına atfedilebilir (Erlen et al. 2009, Scheinert et al. 2007). Ayrıca yalıtkan içerisinde bulunan moleküler dipollerin yarattığı iç dipol alan nedeniyle yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinde yarıiletkenlerin LUMO enerji seviyesi daha fazla eğilmekte ve uygulanan kapı gerilimi ile kanaldaki yük taşıyıcı konsantrasyonu artmaktadır (Pernstich et al. 2004, Jang et al. 2007).

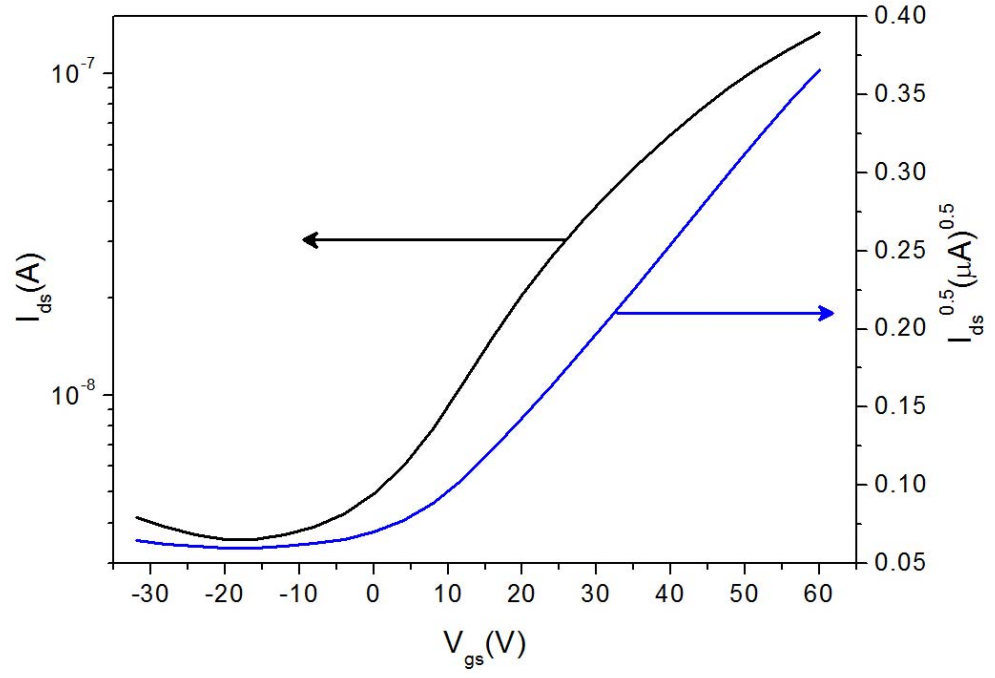


(a)

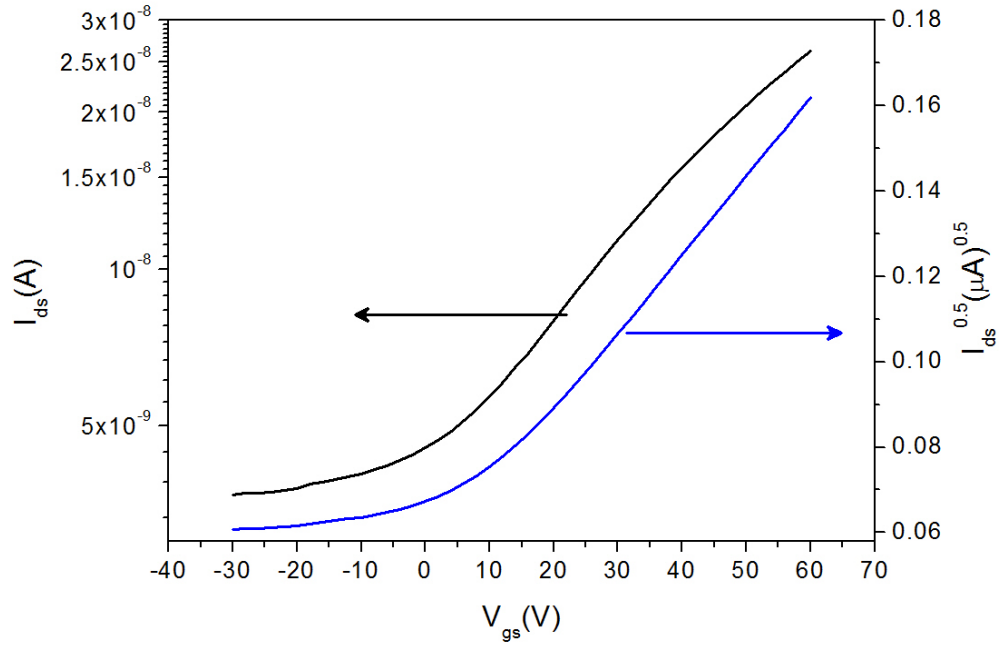


(b)





(c)



(d)

Şekil 5.12. Üretilen OFET yapıların transfer karakteristikleri a) NBBI-I, b) PBBI-I, c) NBBI-II, d) PBBI-II. Tüm akım-gerilim eğrileri uygulanan sabit  $V_{ds} = 50$  V gerilim altında alınmıştır. Grafiklerde sol eksen ( $I_{ds}-V_{gs}$ ) eğrisini ve sağ eksen ( $I_{ds}^{1/2}-V_{gs}$ ) eğrisini göstermektedir.

Tüm OFET yapıların transfer karakteristiklerinde verilen  $\log I_{ds}-V_{gs}$  eğrilerinden arayüzey tuzak seviyelerinin dağılımını tespit etmek amacıyla Eşitlik 3.5 kullanılarak eşik altı bölge eğim,  $S$ , değerleri hesaplanmıştır.  $S$  değeri eşik gerilim altında, kapı geriliminin kanal bölgesindeki yük taşıyıcıları üzerindeki alan etkisinin keskinliğini vermekte ve arayüzeyde bulunan tuzak seviyelerinin konsantrasyonlarının artması ile artmaktadır. Normalize edilmiş eşik altı bölge eğim değeri,  $S_i = S.C_i$ , tüm OFET yapıları için hesaplandığında  $50 \text{ nF V decade}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  to  $120 \text{ nF V decade}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  değerleri arasında değişmekte ve PVA yalıtkan tabakalı OFET yapılarından en yüksek  $S_i$  değerleri elde edilmiştir. PVA yalıtkan tabakalı OFET yapılarından elde edilen  $S_i$  değerlerinin büyük olması yarıiletken/yalıtkan arayüzeyinde derin tuzak seviyelerinin varlığını göstermektedir (Scheinert et al. 2002).

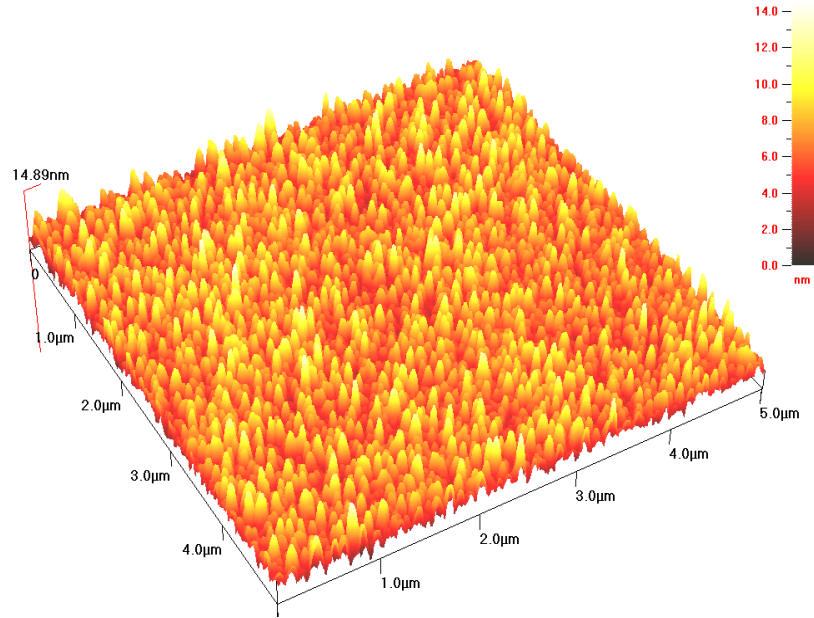
Çizelge 5.3. NBBI ve PBBI temelli OFET yapılarından elde edilen elektriksek parametreler.

| Aygıt   | Yalıtkan | Açma/kapama oranı | $V_o(V)$ | $V_{th}(V)$ | $\mu_e(\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1})$ |
|---------|----------|-------------------|----------|-------------|------------------------------------------------|
| NBBI-I  | BCB      | 45                | 0        | 15,0        | $1,04 \times 10^{-3}$                          |
| PBBI-I  | BCB      | 45                | -2       | 18,0        | $1.62 \times 10^{-4}$                          |
| NBBI-II | PVA      | 37                | -12      | 3,9         | $8,14 \times 10^{-4}$                          |
| PBBI-II | PVA      | 10                | -16      | 2,8         | $9,03 \times 10^{-5}$                          |

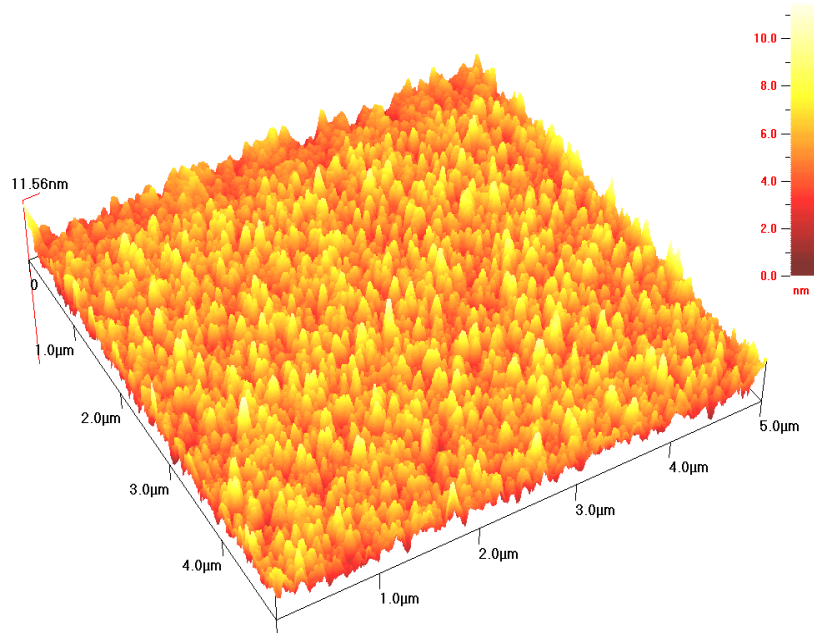
Çizelge 5.3 de verilen değerlerden de görüldüğü gibi aynı tür yarıiletkenler için elektron mobiliteleri incelendiğinde, PVA yalıtkan filmin birim alandaki kapasitans değeri BCB yalıtkan filmine göre yüksek olmasına rağmen BCB polimer yalıtkan üzerinde üretilen yarıiletkenlerin elektron mobilite değerleri PVA polimer yalıtkan üzerindeki yarıiletkenlere göre daha yüksek çıkmıştır. Arılan bisimide türevleri olarak adlandırılan PBBI ve NBBI organik yarıiletkenlerin elektron mobilite değerleri PVA ve BCB yalıtkan filmlerin yüzey enerjileri ile kıyaslandığında, artan yalıtkan filmlerin yüzey enerjileri ile elektron mobilite değerleri azalmaktadır. Yalıtkan film yüzeyinde bulunan hidroksil, karboksil gibi polar fonksiyonel gruplar nedeniyle artan yüzey enerjisi, yük

taşıyıcı mobilite değerini azaltmakta ve yarıiletken film üzerindeki moleküllerin büyüklüklerini değiştirmektedir (Shin et al. 2007). Genel olarak organik yarıiletken filmin yüzey enerjisi ile yalıtkan filmin yüzey enerjileri birbirine eşit ya da yakın değerlerde olduğu durumlarda yüksek mobilite değerli yük taşıyıcıların kanal boyunca hareketi gözlenmektedir (Gao et al. 2009). PBBI ve NBBI temelli OFET yapıların transfer karakteristikleri kıyaslandığında NBBI organik yarıiletkeni aynı yalıtkan malzeme üzerinde PBBI organik yarıiletkenine göre daha iyi sonuçlar vermektedir.

Yalıtkan film yüzey enerjisinin kanal içerisindeki yarıiletken molekülleri üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla NBBI ve PBBI filmlerin AFM ile yüzey morfolojileri incelenmiştir. Şekil 5.13 de verilen BCB yalıtkan film üzerindeki NBBI ve PBBI yarıiletken film yüzeyleri sırasıyla 1,73 nm ve 1,33 nm rms değerli pürüzlü film yapılarına sahiptir. Her iki yarıiletken film yüzeylerindeki moleküllerin agregasyonu sivri adalar şeklinde olup, NBBI filmindeki tepe ile çukur arasındaki ortalama mesafe 110 nm iken PBBI için bu mesafe 150 nm olmaktadır. AFM analizlerinden yapılan hesaplamalarla yarıiletken film kalınlığının üzerindeki ortalama moleküllerin maksimum yükseklikleri NBBI için 5,57 nm ve PBBI için 4,39 nm olmaktadır.



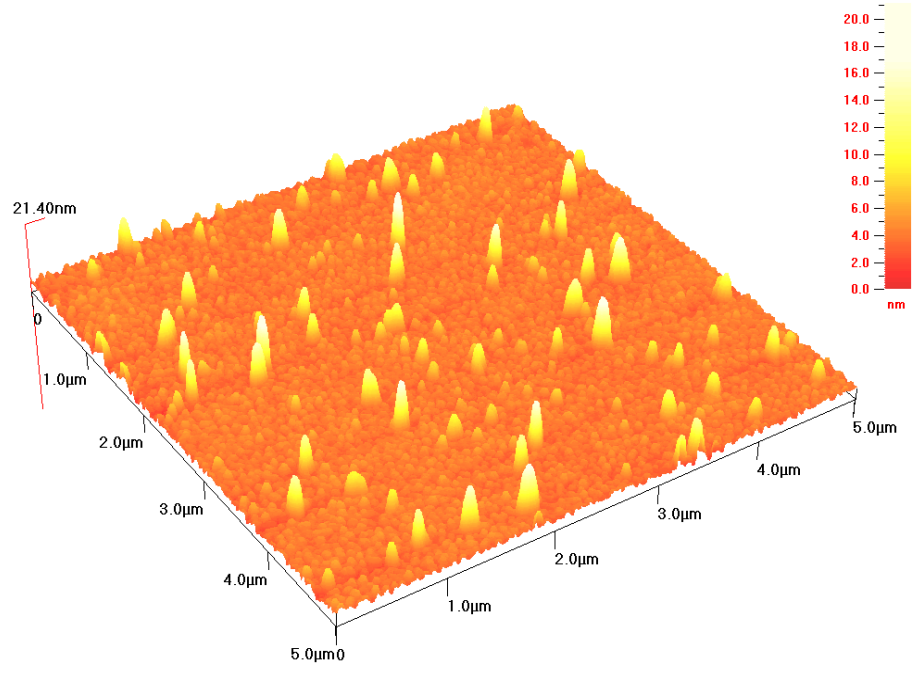
(a)



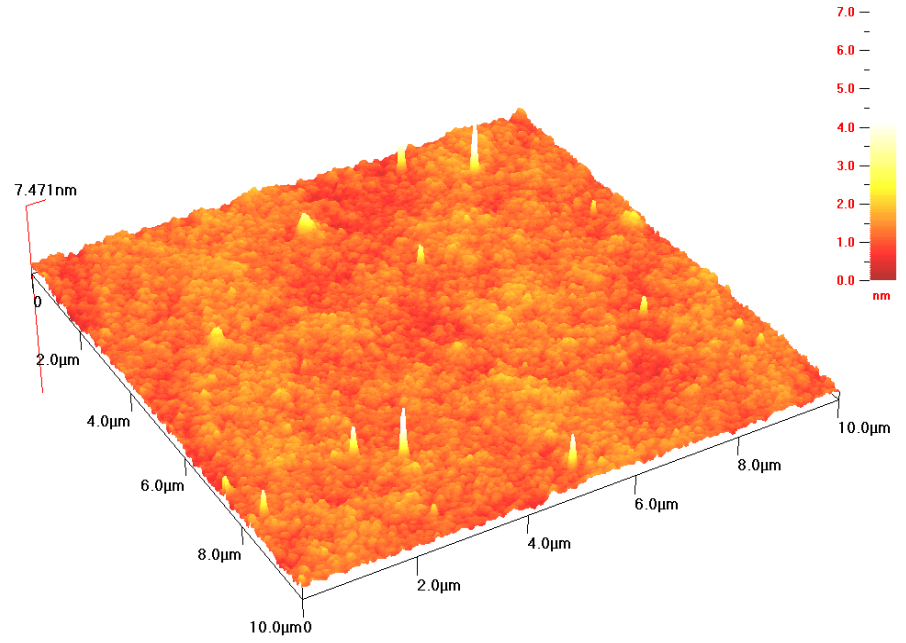
(b)

Şekil 5.13. a) NBBI b) PBBI yarıiletken filmlerin BCB yalıtkan üzerindeki wave modda alınmış AFM görüntüleri.

Şekil 5.14 de PVA yalıtkan filmi üzerindeki NBBI ve PBBI yarıiletken filmlerin üç boyutlu yüzey morfolojileri görülmektedir. Yarıiletken filmlerin BCB yalıtkan film üzerindeki pürüzlü yapısı PVA yalıtkan film üzerinde görülmemekte ve PBBI yarıiletken filmi amorf yapıya benzer yüzey özelliği göstermektedir. NBBI yarıiletken filmde yerel bölgelerde gözlenen ve birbirinden farklı bölgelerde oluşan adacıklar haricinde, molekül agregasyonların ortalama yükseklikleri BCB yalıtkan filmdeki boyutlara göre azalmaktadır. Filmlerin AFM yüzey görüntülerindeki molekül agregasyonlarının büyüklükleri ile elektron mobilitesi arasındaki ilişkisi incelendiğinde, elektron mobilite değeri artan molekül agregasyonları ile artmakta ve amorf yapıya döndükçe elektron mobilite değeri azalmaktadır. Organik yapılarda moleküler arası etkileşim arttıkça, moleküller arası sıçrama prosesine (hopping process) bağlı olarak moleküller arası yük taşıyıcı transferi ve mobilite değerleri artmaktadır (Horowitz, 2000).



(a)



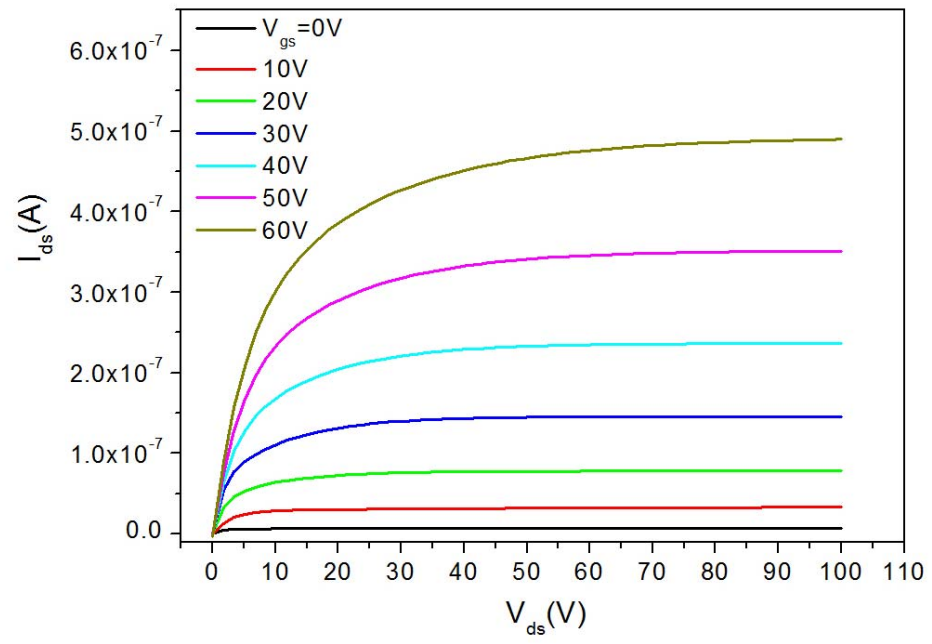
(b)

Şekil 5.14. a) NBBI b) PBBI yarıiletken filmlerin PVA yalıtkan üzerindeki wave modda alınmış AFM görüntüleri.

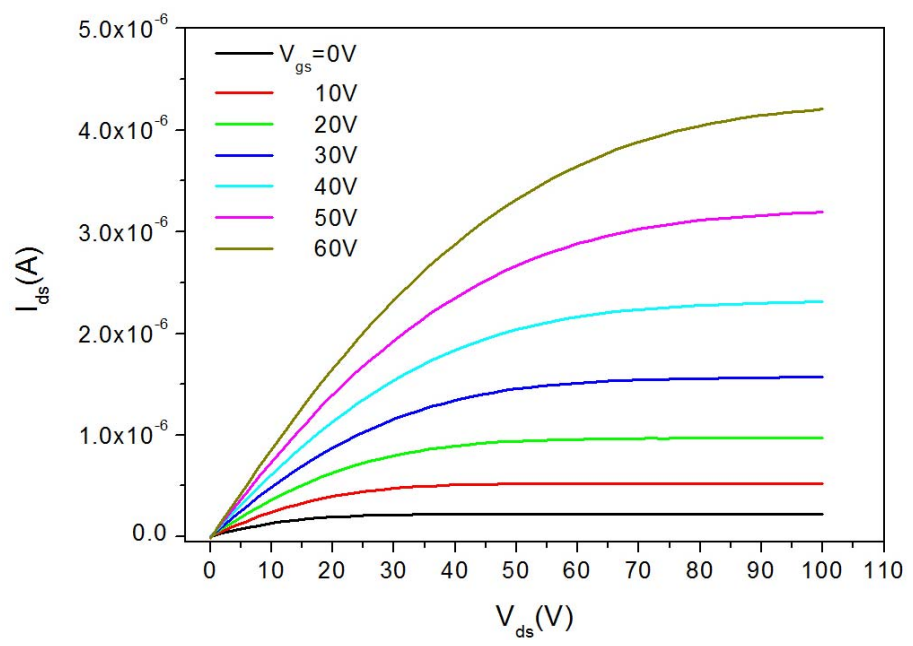
### 5.3.2. Alkil Grupların OFET Yapıları Üzerindeki Etkileri

Bu çalışmada bis-benzimidazol fonksiyonel gruplarının yerine dallanmış alkil grupları içeren perilen ve naftalen organik yarıiletkenlerin OFET yapıları üzerindeki elektriksel karakteristikleri incelenmiştir. Perilen ve naftalen yarıiletkenlerin imide pozisyonlarına etil-hekzil alkil grupları yerleştirilerek, performansları bis-benzimidazol gruplu perilen ve naftalen yarıiletkenlerle kıyaslanmıştır. Bu çalışmada PVA ve BCB polimer yalıtkan filmlerin kapasitans değerleri ve hazırlanma teknikleri bölüm 5.3.1 de verilmiştir. Organik yarıiletken katmanlar termal buharlaştırma tekniği ile 100 nm kalınlıkta yalıtkan film tabakaları üzerine kaplanmıştır. Akaç ve kaynak kontakları için 0,6/60 nm kalınlıktaki LiF/Al (%99,99 saflıkta) metali termal buharlaştırma ile yarıiletken tabaka üzerine gölgeleme maskesi kullanılarak kaplanmıştır. Elde edilen kanal genişliği ve kanal uzunluğu sırasıyla 47  $\mu\text{m}$  ve 2 mm dir. Buradaki çalışmada etilhekzil naftalen diimid organik yarıiletken türeyle ile BCB ve PVA yalıtkan tabaka üzerindeki OFET yapılarına sırasıyla EHNDI-I ve EHNDI-II ve aynı yalıtkan katmanların etilhekzil perilen diimid organik yarıiletken ile kaplanması sonucu elde edilen OFET yapılarına sırasıyla EHPDI-I ve EHPDI-II olarak gösterilmiştir.

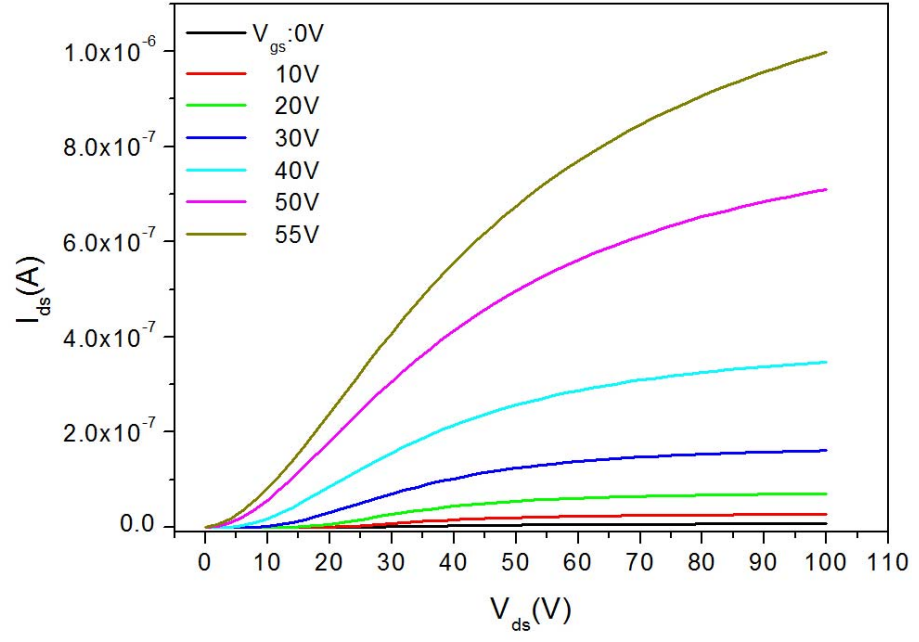
Şekil 5.15 de çalışma karakteristikleri gösterilen tüm OFET yapıları kapı gerilimine bağlı olarak n-kanal transistör özellik göstermektedir. NBBI ve PBBI temelli OFET yapıları ile EHNDI ve EHPDI temelli OFET yapılarından elde edilen veriler kıyaslandığında, daha yüksek değerlerde doyum akımları gözlenmektedir. Doyum akımlarının büyüklükleri incelendiğinde yalıtkan tabakaya bağlı olarak farklı değerler görülmektedir. EHNDI organik yarıiletken boyunca geçen akım değeri PVA yalıtkan tabaka üzerinde daha büyük olurken, EHPDI için akım değeri BCB yalıtkan katmanın üzerinde yüksek çıkmaktadır. Ayrıca kısım (pinch-off) bölgesinin varlığı çalışma karakteristikleri üzerinde daha adet net olarak ortaya çıkmaktadır. EHNDI-I haricinde, transistörlerin doyum bölgesinin ortaya çıktığı kapı gerilim değerleri ( $V_{gs}$ ), akaç-kaynak arasında uygulanan gerilim değerlerinden ( $V_{ds}$ ) büyük olmaktadır.



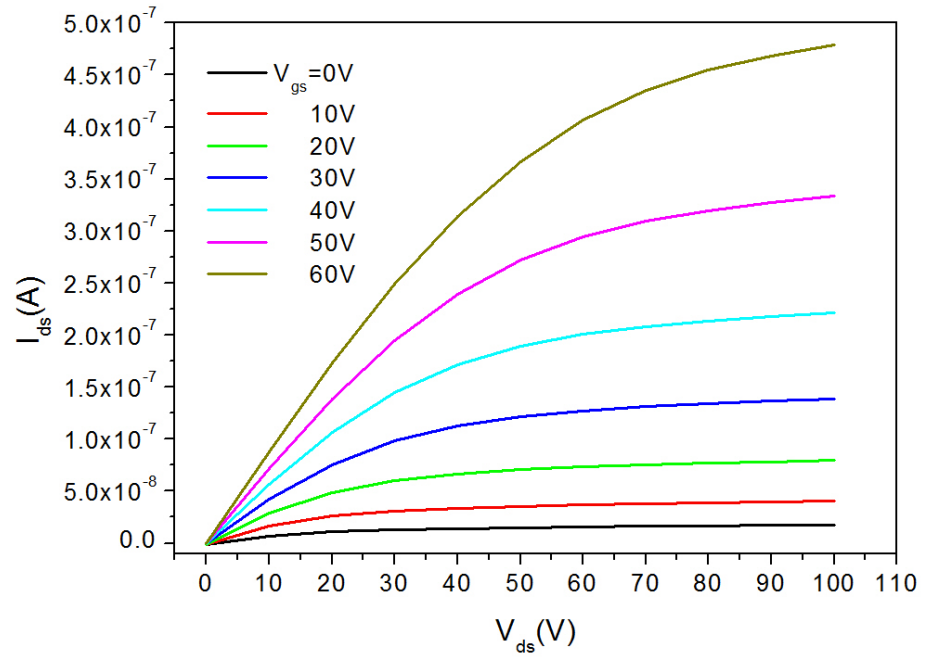
(a)



(b)



(c)



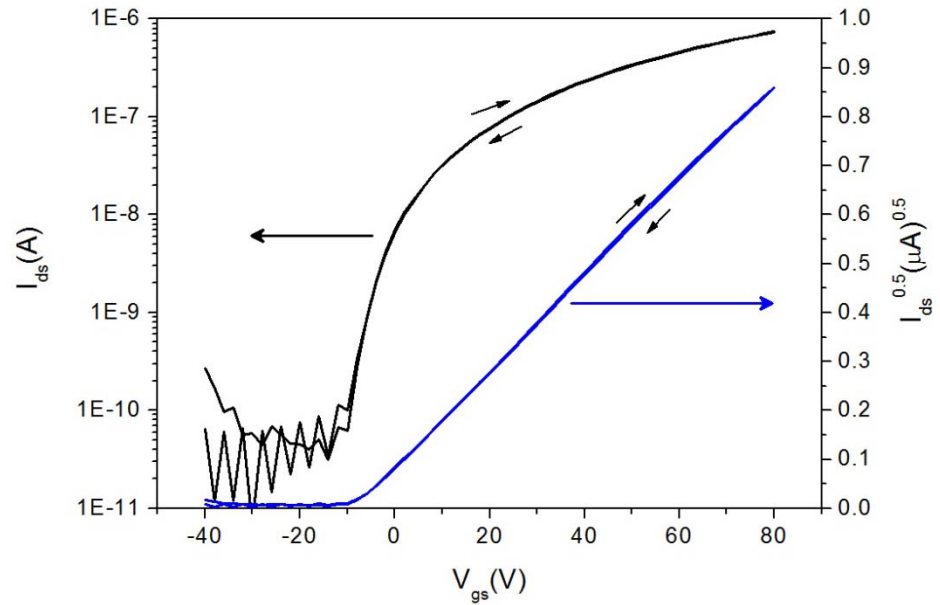
(d)

Şekil 5.15. Farklı  $V_{gs}$  gerilimlerde EHNDI ve EHPDI organik yarıiletken temelli OFET yapıların BCB ve PVA yalıtkan üzerindeki çalışma karakteristikleri a) EHNDI-I, b) EHPDI-I, c) EHNDI-II ve d) EHPDI-II.

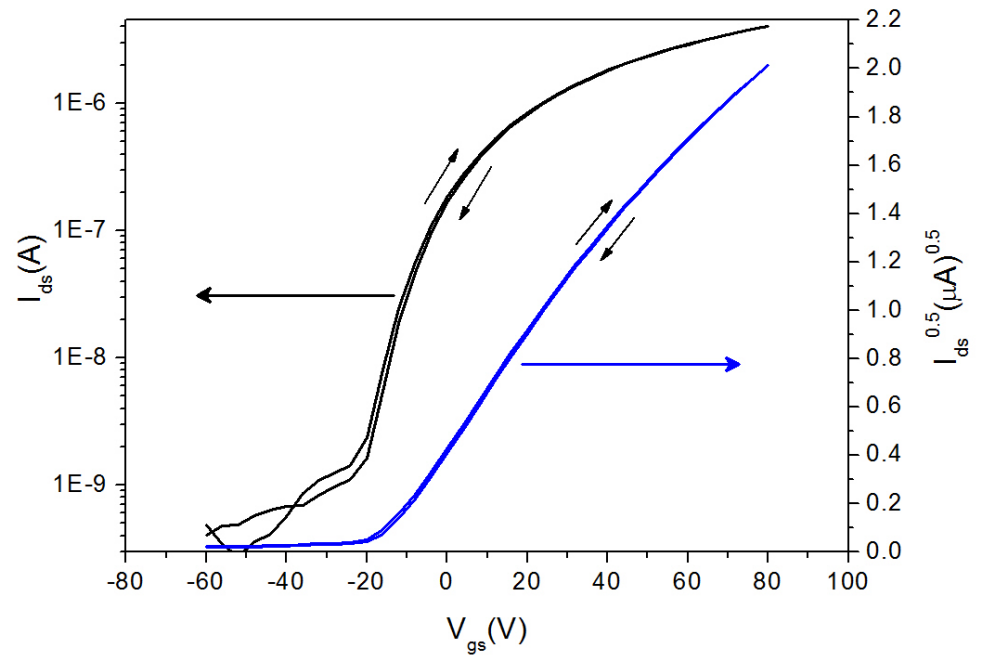
Şekil 5.16 da EHNDI ve EHPDI temelli OFET yapıların  $V_{ds} = 50$  V gerilim altında transfer karakteristikleri ( $I_{ds}-V_{gs}$ ) ve ( $I_{ds,sat}^{1/2}-V_{gs}$ ) verilmiştir. Çalışma



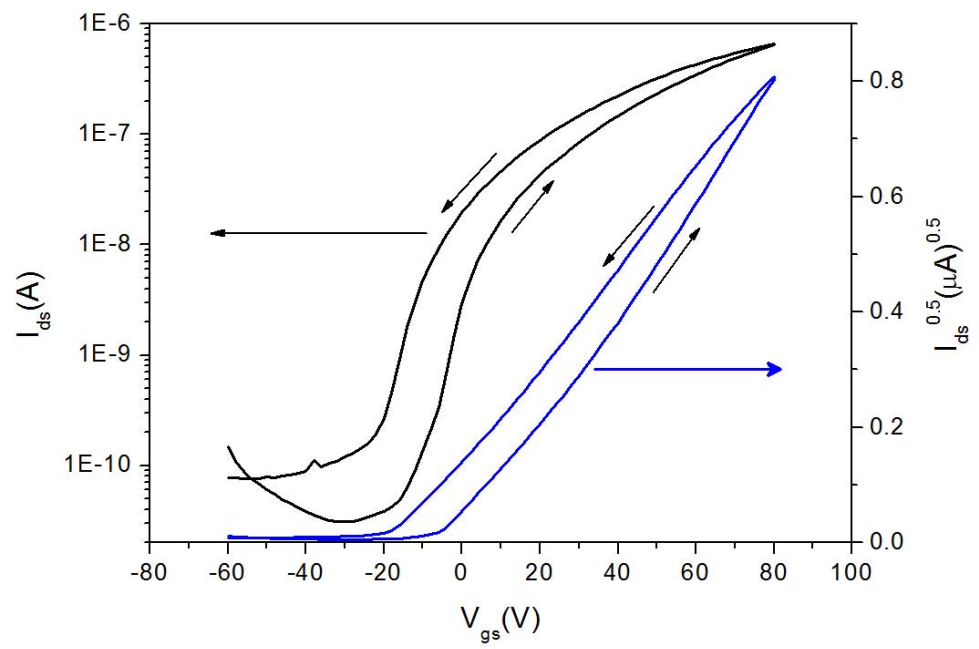
karakteristiklerinden elde edilen akım-gerilim karakteristikleriyle doğru orantılı olarak Eşitlik 3.3 ile bulunan elektron mobilite değerleri yalıtkan tabakaya bağlı olarak değişmektedir. EHNDI organik yarıiletkenindeki maksimum elektron mobilitesi  $9,06 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  değeri ile PVA yalıtkan katmanı üzerinde elde edilmiştir. Aynı yarıiletkenin BCB yalıtkan katmanı üzerindeki elektron mobilite değeri  $3,92 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  olarak bulunmuştur. EHPDI yarıiletkenden elde edilen maksimum elektron mobilitesi  $1,72 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  değeri ile BCB yalıtkan katmanı üzerinde elde edilmiş, PVA katmanı üzerine büyütülen EHPDI için elektron mobilite değeri  $1,28 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  olarak bulunmuştur. Açma/kapama ( $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$ ) oranları NBBI ve PBBI temelli OFET yapılarına göre 10 ile 1000 kat arası artma meydana gelmiştir. Hidrofilik PVA yalıtkan katman üzerinde büyütülen EHNDI ile hidrofobik BCB yalıtkan katman üzerinde büyütülen EHPDI yarıiletkenden elde edilen mobilite değerlerin yüksek çıkmasının nedeni olarak, aromatik grupların sayısına bağlı olarak karbonil grupların yarıiletken film yüzeyini hidrofilik ile hidrofobik arasında değiştirmesi gösterilebilir. Naftalen diimid yapısında 2 aromatik halka üzerinde 4 karbonil grubun bulunması film yüzeyini EHPDI film yüzeyine göre daha polar yapmakta ve dolayısı ile film yüzeyi EHPDI filme göre daha hidrofilik olmaktadır. Çizelge 5.4 de EHNDI ve EHPDI temelli OFET yapılarından elde edilen elektriksel parametreler verilmektedir.



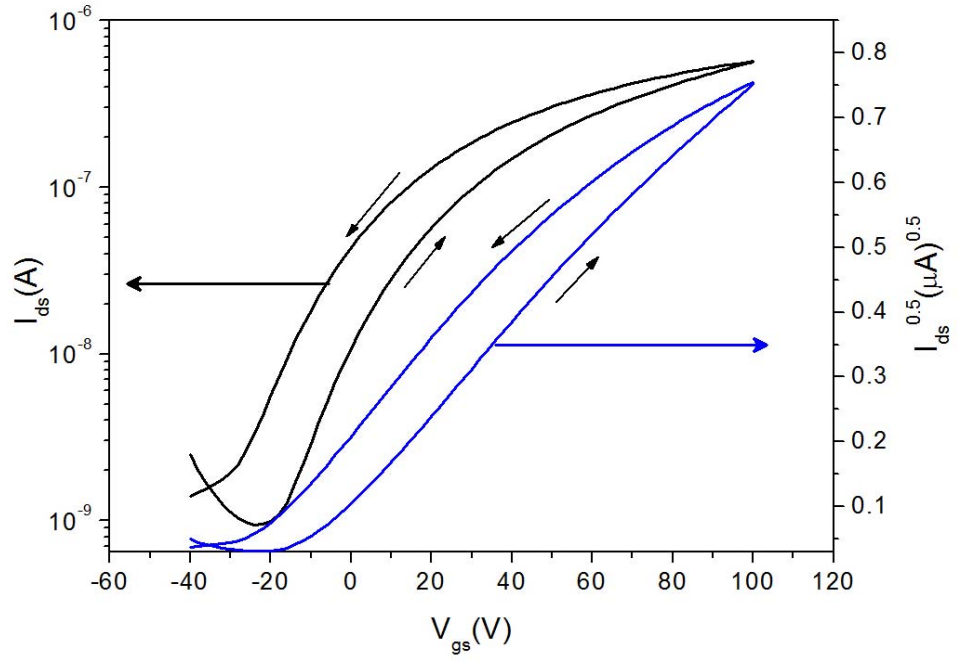
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.16. Üretilen OFET yapıların transfer karakteristikleri a) EHNDI-I, b) EHPDI-I, c) EHNDI-II, d) EHPDI-II.

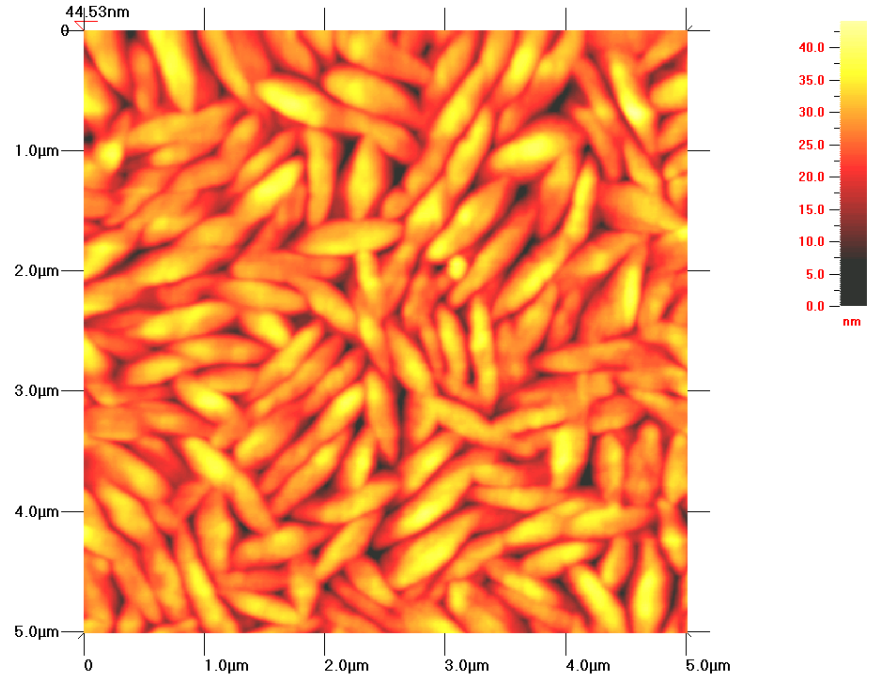
Çizelge 5.4. EHNDI ve EHPDI temelli OFET yapılarından elde edilen elektriksel parametreler.

| Aygıt    | Yalıtkan | Açma/kapama oranı | S (V/de cade) | $V_{th}$ (V) | $\mu_e$ ( $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) |
|----------|----------|-------------------|---------------|--------------|-----------------------------------------------------|
| EHNDI-I  | BCB      | $2,0 \times 10^4$ | 7             | -8           | $3,92 \times 10^{-3}$                               |
| EHPDI-I  | BCB      | $2,0 \times 10^4$ | 10            | -15          | $1,72 \times 10^{-2}$                               |
| EHNDI-II | PVA      | $1,9 \times 10^4$ | 8,7           | 2,7          | $9,06 \times 10^{-3}$                               |
| EHPDI-II | PVA      | $6,0 \times 10^2$ | 20            | -8,5         | $1,28 \times 10^{-3}$                               |

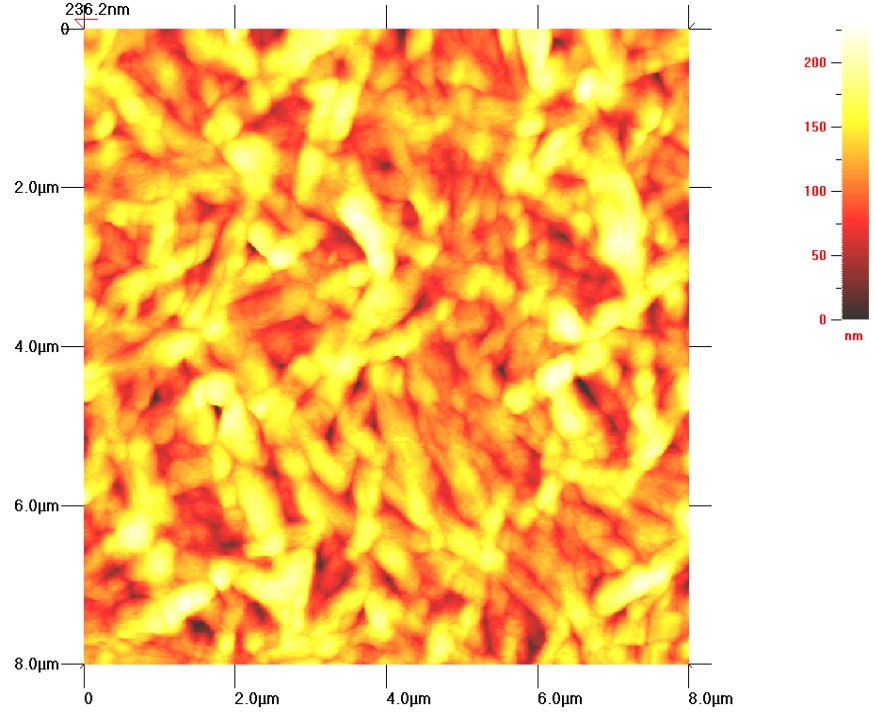
Transfer karakteristiklerinde kapı geriliminin sıfır değerinden başlamak üzere 0V-80V ve 80V-0V değerleri arasında iki yönlü taranması ile histeresis etkileri incelenmiş ve akım değerlerine bağlı olarak iki farklı histeresis mekanizması gözlenmiştir. Histeresis olayı ( $I_{ds}-V_{gs}$ ) eğrisinin tersinir olarak taranması neticesinde ortaya çıkan ileri yöndeki (0V-80V) akım ile ters yöndeki (80V-0V) akım büyüklüklerinin birbirinden farklı çıkması ile gözlenmektedir. OFET yapılarında histeresis mekanizması Si/SiO<sub>2</sub> MOSFET teknolojisinden yola çıkarak; kanala yakın ya da kanal içerisinde yük taşıyıcıların tuzaklanması, yarıiletken yalıtkana doğru yük taşıyıcı transferi, organik yarıiletkenlerdeki yük taşıyıcıların yavaş reaksiyonları, kapı dielektrik malzemenin polarizasyon etkileri ve dielektrik boyunca hareketli iyon etkileri, kapı elektrodundan dielektrik malzemeye doğru yük transferi mekanizmalarıyla açıklanabilmektedir (Schroder et al. 2006, Hwang et al. 2008). İleri yöndeki akımın (FSC; forward sweep current) ters yöndeki akımdan (BSC; back sweep current) büyük ya da küçük olmasına bağlı olarak, histeresis mekanizmasının kaynağı değişme göstermektedir. Şekil 5.16 (a-b) de gösterilen FSC değerinin BSC akım değerinden yüksek çıkmasının nedeni olarak, arayüzeye yakın bölgede oluşan kanal boyunca ya da kanala yakın bölgede yük taşıyıcılarının tuzaklanması olarak gösterilmektedir. Şekil 5.16 (c-d) de verilen transfer karakteristiklerinde ise BSC değeri FSC değerinde yüksek çıkmakta ve bu durum genel olarak dielektrik malzemedeki hareketli iyon etkilerinden veya dielektrik malzemenin polarizasyonu (ferroelektrik) gösterilmektedir (Egginger et al. 2009, Lee et al. 2006). PVA dielektrik malzemenin sentezinde başlangıç malzemesi olarak kullanılan polivinil asetat molekülündeki asetat anyonu ile reaksiyon da kullanılan NaOH katalizöründeki Na<sup>+</sup> katyonları yalıtkan malzemede safsızlık yaratmaktadır. Kapı elektroduna pozitif gerilim uygulanması durumunda yalıtkan tabaka boyunca oluşan elektrik alan etkisi altında Na<sup>+</sup> katyonları yarıiletken/yalıtkan arayüzeyine doğru hareket ederken asetat anyonları elektrik alana ters yönde kapı elektroduna doğru hareket etmektedir. Dielektrik malzeme içerisindeki meydana gelen iyon hareketliliğinden dolayı yarıiletken katmana yakın bölgede katyonlar, kapı elektroduna yakın bölgede anyonlar yığılmaktadır. Yarıiletken tabakaya yakın Na<sup>+</sup> katyonları kanal boyunca elektronların toplanmasına neden olurken, yarıiletken/yalıtkan arayüzeyindeki katyonlar kapı geriliminin pozitif değerden 0 V değerine doğru taranmasında bile arayüzeyde bulunmasından dolayı kanal boyunca elektron yoğunluğu başlangıç koşullarına göre daha fazla olmaktadır. Bu nedenle PVA dielektrik malzemenin kullanıldığı OFET yapılarında BSC akım değeri FSC akım değerinden yüksek çıkmaktadır (Egginger et al. 2008).

Eşitlik 3.6 ile verilen yarıiletken/BCB yalıtkan arayüzeyindeki maksimum tuzak durumlarının yoğunluğu,  $N_{ss}^{max}$ , EHPDI ve EHNDI için sırasıyla  $1,24 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  ve  $0,87 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  olarak bulunmuştur. PVA yalıtkan tabaka ile yarıiletken arayüzeyindeki  $N_{ss}^{max}$  değerleri ise EHPDI için  $3,51 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  ve EHNDI için  $2,72 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  ve olarak hesaplanmıştır. Arayüzeydeki tuzak durumlarının maksimum yoğunluğu arasındaki 3 katlık fark özellikle PVA yapısında bulunan hidroksil gruplarından kaynaklanmaktadır.

Alkil gruplarının yarıiletken film morfolojileri üzerindeki etkilerini incelemek için EHDI filmin PVA yalıtkan katmanı üzerinde ve EHPDI filmin BCB yalıtkan katman üzerinde AFM ile yüzey analizleri yapılmış ve Şekil 5.17 de iki boyutlu AFM görüntüleri verilmiştir. Şekil 5.17 (a) da görülen EHNDI molekülleri PVA yalıtkan tabaka üzerinde ortalama 13 nm genişlikteki çubuk şeklinde kümelenmektedir. EHNDI yarıiletken morfolojisinden elde edilen rms değeri 5,884 nm iken ortalama yükseklik değeri 26 nm değerine eşit olmaktadır. Şekil 5.17 (b) de yüzey morfolojisi verilen EHPDI yarı iletken filmde, moleküller BCB yalıtkan tabaka üzerinde ise 29 nm genişliğe sahip çubuk şeklindeki kümelerden oluşan ağa benzer yapıda düzenlenmektedir. EHPDI yarıiletken filmin rms değeri 33,3 nm değerine sahip olup ortalama yükseklik değeri 124 nm değerine eşit olmaktadır. Kümelerin ortalama genişlik değerlerinin artması ile mobilite doğru orantılı olarak değişmektedir.



(a)



(b)

Şekil 5.17. a) EHNDI yarıiletken filmin PVA üzerinde ve b) EHPDI yarıiletken filmin BCB üzerinde wave moda alınmış AFM görüntüleri.

### 5.3.3. Işık Duyarlı OFET (Foto-OFET) Çalışmaları

Üç elektrotlu foto-transistör yapıları ışık etkili anahtarlama, ışık tetikli yükseltici, foto-transistör dizinli yüksek duyarlılığa sahip görüntü sistemleri için anahtar parçadır (Muccini, 2006). Foto-OFET üzerine düşen organik yarıiletkenin enerji aralığına eşit ya da büyük enerjiye sahip ışıma bağlı olarak yarıiletken içerisinde ve kanal boyunca yük yoğunluğu değişir ve kanal boyunca geçen akım foton etkin ve alan etkin yük taşıyıcılarının toplamına eşit olmaktadır (Sze 2007). Işınım altında foto-OFET yapısının aktif alanında fotoiletkenlik ve fotovoltajik olmak üzere iki farklı etki gözlenmektedir. Transistörün açık konumda iken fotoakım üzerinde fotovoltajik olay baskın olmaktadır. Transistör açık konumda iken kanal boyunca geçen fotoakım Eşitlik 5.3 ile verilmektedir (Choi et al. 2005).

$$I_{ph,pv} = G_M \Delta V_{th} = \frac{AkT}{q} \ln \left( 1 + \frac{\eta q \lambda P_{opt}}{I_{pd} hc} \right) \quad (5.3)$$

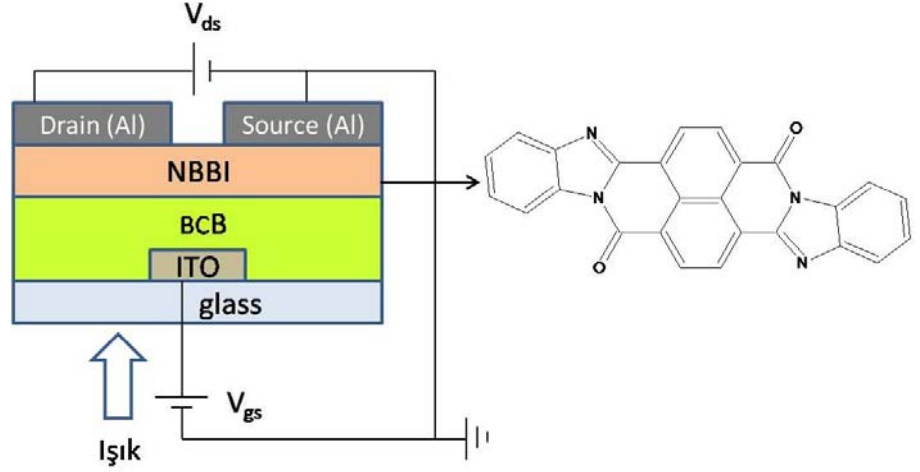
burada  $\eta$  gelen foton başına yaratılan yük taşıyıcı sayısını,  $q$  temel yükü,  $P_{opt}$  gelen ışık gücünü,  $I_{pd}$  karanlık altındaki akımı,  $hc/\lambda$  foton enerjisini,  $G_M$  geçiş iletkenliğini (transconductance),  $\Delta V_{th}$  eşik gerilim kayması ve  $A$  ise doğrulama parametresidir.

Transistörün kapalı konumunda yani kapı elektroduna uygulanan gerilimin eşik gerilim değerinden küçük olduğu gerilim değerlerinde kanal boyunca geçen fotoakım ışık şiddeti ile artmaktadır. Transistörün bu konumunda akım mekanizması fotoiletkenlik ile açıklanmata ve akım değeri (Sze 2007);

$$I_{ph,pc} = (q\mu nE)WD = BP_{opt} \quad (5.4)$$

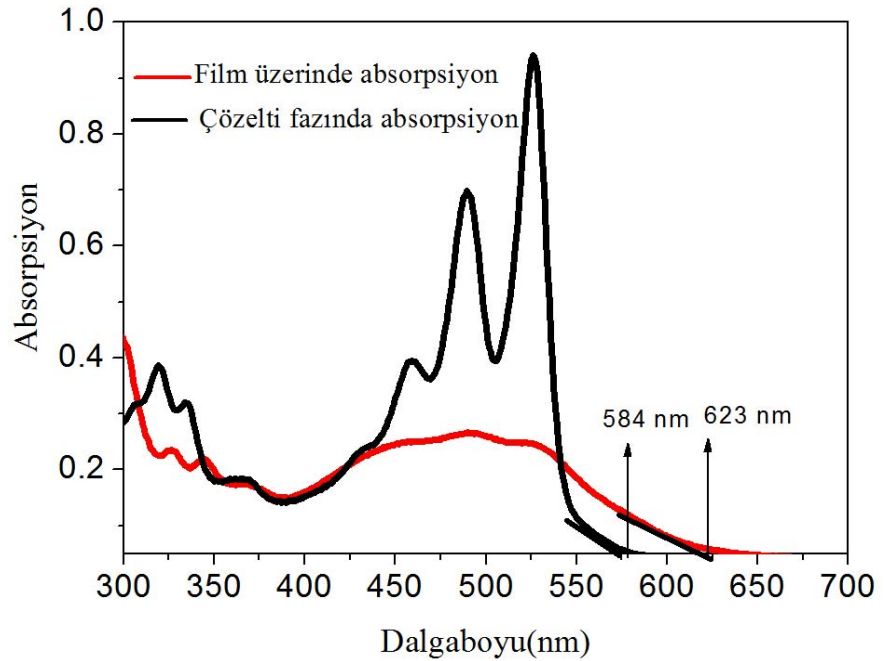
burada  $\mu$  yük taşıyıcı mobilitesi,  $n$  yük yoğunluğu,  $E$  kanaldaki elektrik alan,  $W$  kapı genişliği ve  $D$  yarıiletken tabakanın kalınlığı olmaktadır. Transistörün kapalı konumdaki fotoakım Eşitlik 5.3 den görüldüğü gibi gelen ışınım gücü ile doğru orantılı olarak değişmektedir.

Bu çalışmada BCB polimer yalıtkan tabaka üzerine termal buharlaştırma ile kaplanmış NBBI organik yarıiletkeni ile üst Alüminyum kontak/alt ITO kapı geometrisine sahip OFET yapısı elde edilmiştir. Transistör üzerine ışık Şekil 5.18 de gösterildiği gibi saydam kapı elektrodu bölgesinden gönderilmiştir. NBBI foto duyarlılığa karşı elektriksel karakteristiklerini incelemek için AM 1,5 spektral dağılımına sahip beyaz ışığın farklı ışınım şiddetlerinde ölçümler alınmıştır. NBBI organik yarıiletkenden oluşan aktif tabaka 0,04 nm/san. buharlaşma hızıyla kaplanmış ve 100 nm kalınlığa sahiptir. 60 nm kalınlıktaki Al metal kontakların buharlaştırılmasında kullanılan gölgeleme maske ile elde edilen kanal uzunluğu ve kanal genişliği sırasıyla 40  $\mu$ m ve 2 mm değerlerine eşit olmaktadır. BCB dielektrik malzemenin kaplanması ve diğer prosedürler Bölüm 4.2.1.2 de verilmiştir. Kaplanan dielektrik film kalınlığı 1,4  $\mu$ m değerine eşit olup, yalıtkan tabakanın birim alandaki kapasitans değeri 1,73 nF/cm<sup>2</sup> değerine eşit bulunmuştur. Işınım ve karanlık altındaki tüm elektriksel ölçümler inert azot gazı ortamı sağlayan glove box sistemi içerisinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.18. Foto-OFET yapısının arakesit görünümü.

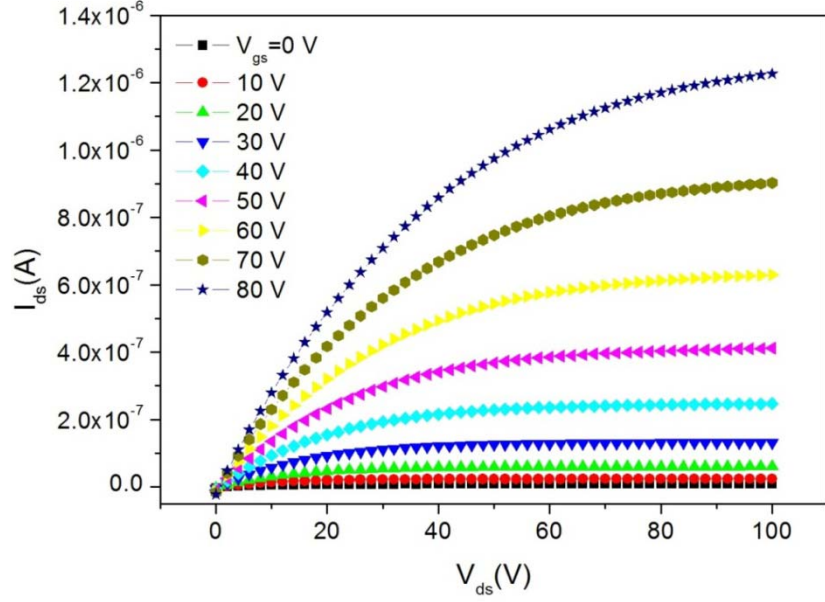
NBBI yarıiletkenin kloroform çözgeninde ve cam üzerinde 100 nm kalınlığa sahip kaplı filmin UV-Vis absorpsiyon spektrumu Şekil 5.19 da verilmektedir. Cam üzerine kaplı NBBI yarıiletken filmi çözgen içerisinde alınan NBBI molekülün soğurma spektrumuna göre 400 nm-623 nm aralığında geniş bir soğurma bandı vermektedir. Absorpsiyon bandındaki bu geniş dağılım NBBI moleküllerin agregasyonun sıkı istiflenmesi sonucu meydana gelen moleküller arası  $\pi$ - $\pi$  etkileşimi olarak gösterilebilir.



Şekil 5.19. NBBI organik yarıiletkenin çözelti içinde ve film üzerindeki absorpsiyon spektrumu.

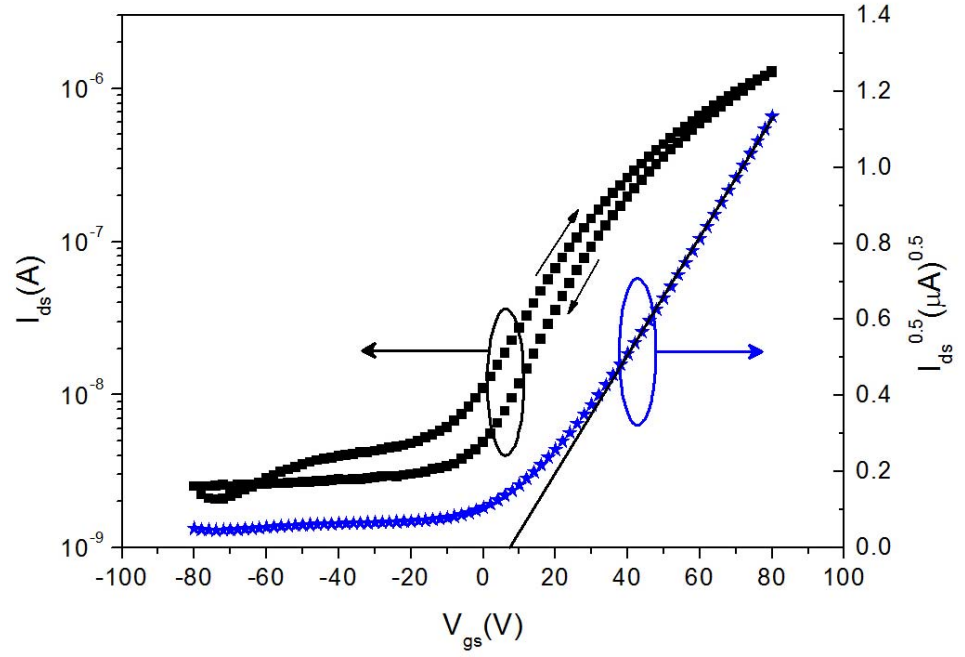


Alüminyum akaç ve kaynak elektrotlarına sahip NBBI temelli foto-OFET yapısının karanlık altında çalışma karakteristiği Şekil 5.20 de verilmektedir. Çalışma eğrisinden görüldüğü gibi transistörün lineer, kısırılma ve doyum bölgeleri kapı ve akaç gerilimine bağlı olarak net bir şekilde ortaya çıkmaktadır.



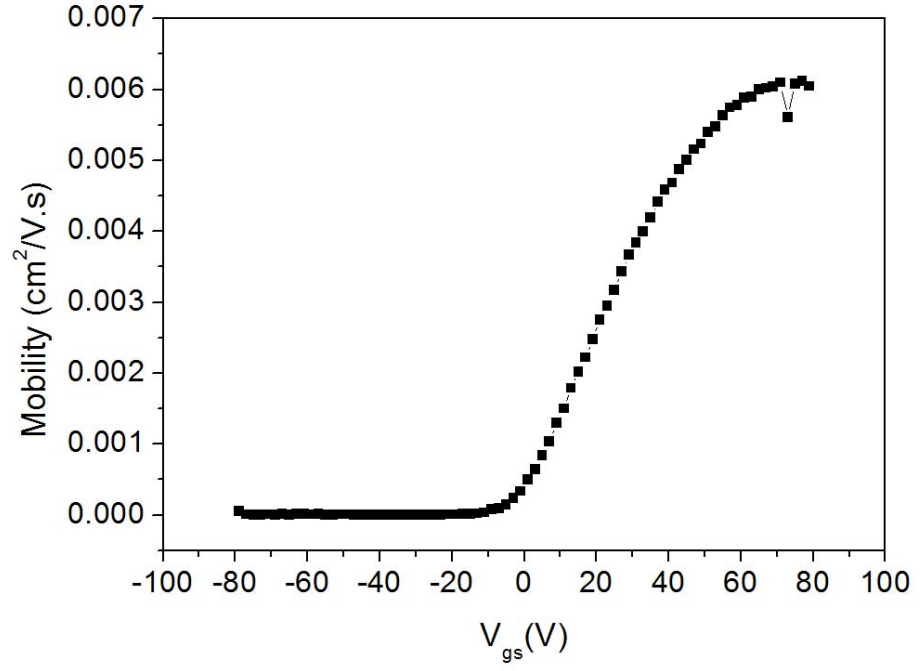
Şekil 5.20. NBBI temelli foto-OFET yapısının karanlık altında çalışma karakteristiği.

Karanlık altındaki foto-OFET yapısının karanlık altındaki transfer karakteristiği Şekil 5.21 de verilmektedir. Eğri üzerinde EHNDI ve EHPDI yarıiletken temelli transistörlerin transfer eğrilerinde görüldüğü gibi foto-OFET yapısında da aynı histeresis olayı ortaya çıkmaktadır. Foto-OFET yapısının Eşitlik (2.3) yardımı ile  $I_{ds}^{1/2}$  karşı  $V_{gs}$  eğrisinin eğiminden yola çıkılarak hesaplanan elektron mobilitesi  $6,06 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  olarak hesaplanmıştır. Eşik gerilim değeri ve açma/kapama oranı ise sırasıyla 7,2 V ve  $3,4 \times 10^2$  olarak bulunmuştur.



Şekil 5.21. Foto-OFET yapısının  $V_{ds} = 80$  V sabit gerilim ve karanlık altında transfer karakteristiği.

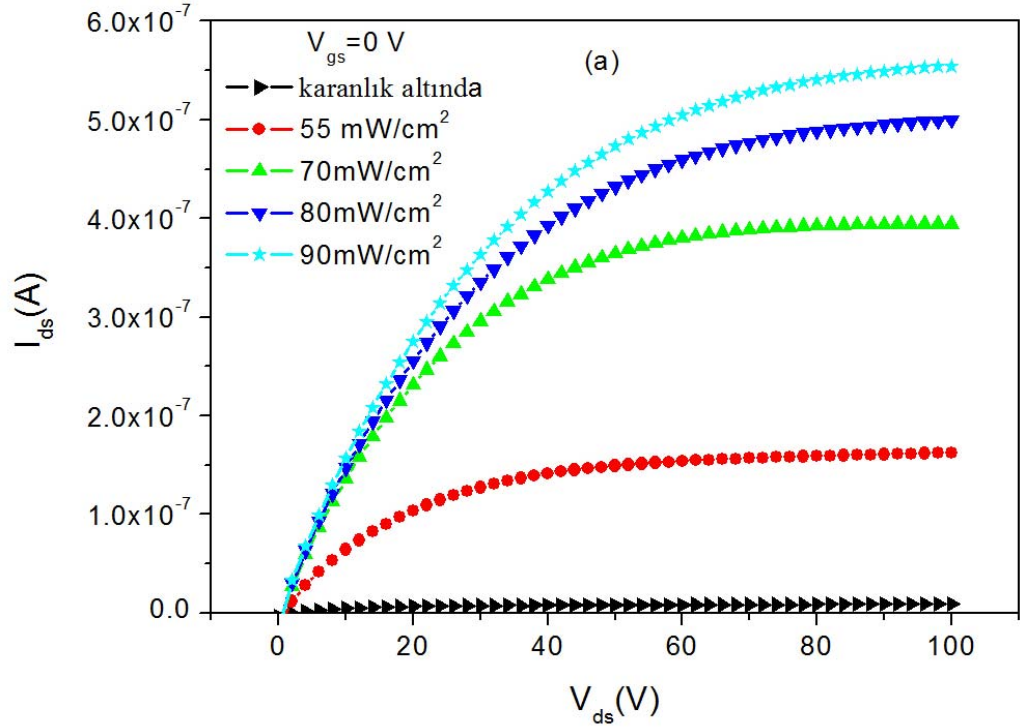
Eşik altı eğim  $S$  değeri  $V_{th}$  değerinin altındaki  $\log(I_{ds})$ 'e karşı  $V_{gs}$  eğrinin eğiminden  $28,5 \text{ V decade}^{-1}$  olarak hesaplanmıştır. Çıkan bu değer kanala yakın bölgede sığ tuzak seviyelerinin olduğunu göstermektedir (Newman et al 2004). Elektron mobilitesinin kapı gerilimine bağlı olarak değişimi incelendiğinde Şekil 5.22 de görüldüğü gibi artan kapı gerilimi ile mobilite değeri yükselmekte ve yüksek kapı gerilimlerinde sabitlenmektedir. Eşik altı eğim değerinin büyüklüğünden yola çıkarak, kapı gerilimine bağlı olarak mobilite değerinin değişmesinin temel sebebi olarak; geçiş bandına yakın (LUMO) seviyelerde bulunan sığ lokalize seviyelerin dağılımından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu seviyeler termal dengede ( $V_{gs} = 0 \text{ V}$ ) fermi enerji seviyesine kadar doludur. Kapı gerilimi artmaya başladığı zaman, yarıiletken/yalıtkan arayüzeyinde fermi seviyesi geçiş bandına doğru yükselerek, arayüzeydeki boş sığ lokalize seviyeler yük transferi nedeniyle dolmakta ve yüksek kapı gerilimlerinde serbest yük taşıyıcılarının tuzaklanmış yük taşıyıcılarına oranı artarak etkin mobilite değeri artmaktadır (Kalb et al. 2004). Eşik gerilim altındaki düşük kapı gerilim değerlerinde serbest yük taşıyıcı yoğunluğu arayüzeydeki tuzak seviyelerinin etkisiyle keskin şekilde artmamakta ve bu nedenle eşik altı eğim değeri oldukça yüksek çıkmaktadır.



Şekil 5.22. Kapı gerilimine bağlı elektron mobilite değerinin değişim grafiği

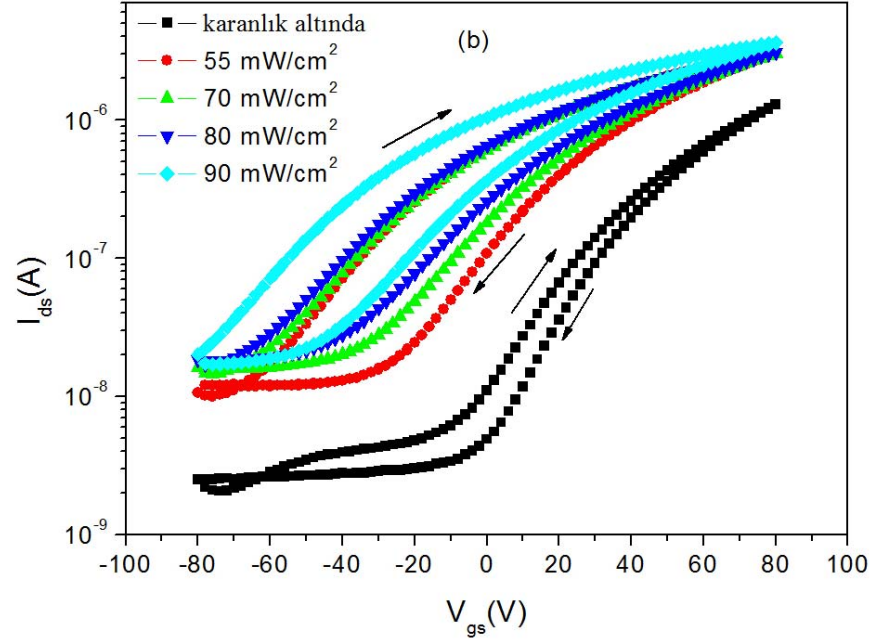
Eşik altı eğim değerinden yola çıkarak arayüzeydeki maksimum tuzak seviyelerinin yoğunluğu,  $N_{ss}^{max}$ , Eşitlik 3.6 da verilen ifadeden  $5,16 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  olarak hesaplanmıştır.

Foto-OFET yapısından kanal boyunca geçen  $I_{ds}$  akımının  $V_{ds}$  gerilimine bağlı  $55 \text{ mW/cm}^2$  ile  $90 \text{ mW/cm}^2$  arasında değişen ışınım şiddetleri ve  $V_{gs} = 0 \text{ V}$  gerilimi altındaki çalışma eğrisi Şekil 5.23 de verilmektedir. Işınım şiddetlerine bağlı olarak foto-etkin yük taşıyıcı yaratımı artan  $V_{ds}$  gerilimi ile net olarak gözlenmektedir. Çalışma eğrisinden görüldüğü gibi aynı  $V_{ds}$  gerilimlerinde artan ışınım şiddeti ile  $I_{ds}$  akımı artmakta ve transistör üzerine düşen ışık 3 elektrotlu transistör yapısında dördüncü elektrot gibi davranmaktadır. Çalışma eğrisinde görülen akım değerleri alan etkisi olmaksızın ışınım şiddetinin büyüklüğüne bağlı olarak oluşmaktadır. NBBI yarıiletkeni tüm görünür bölge spektral dağılımı altında ideal foto-OFET karakteristiği göstermektedir.



Şekil 5.23. NBI yarıiletken temelli OFET yapısının farklı ışınlam şiddetlerindeki çalışma karakteristiği. Tüm ışınlam şiddetlerinde  $V_{gs} = 0$  V değerinde sabit tutulmuştur.

Foto-OFET yapısının karanlıkta ve ışınlam altında kapı geriliminin iki yönlü taranması ile elde edilen transfer karakteristiği Şekil 5.24 de verilmektedir. Hysteresis etkisi artan ışınlam şiddeti ile önemli ölçüde artmaktadır. Karanlıkta görülen hysteresis etkisinin ışık şiddetine bağlı olarak artması, foto-etkin yük taşıyıcı yoğunluğunun artması ile ara yüzeyde tuzaklanan yük taşıyıcı konsantrasyonu artması olarak gösterilebilir. Transfer karakteristiğinde karanlık altındaki eşik gerilim değeri ışınlam altında negatif değere doğru kaymaktadır. Eşik gerilim değeri Eşitlik 3.4 ile verilen ifadeden görüldüğü gibi yük taşıyıcı yoğunluğuna bağlıdır. Eğer düz bant potansiyelini ışınlam altında değişmediğini varsayarsak, kanala yakın bölgede yük taşıyıcı yoğunluğu,  $n_o$ , önemli ölçüde ışınlama bağlı olarak değişmektedir. Foto-katkılama olarak adlandırabileceğimiz bu etki ile yük taşıyıcılarının sayısındaki artış transistörün yığınım bölgesi kıyısına ulaşılması için gerekli gerilim değerini düşürmekte ve dolayısı ile eşik gerilim değerini negatif eksene doğru kaydırmaktadır.

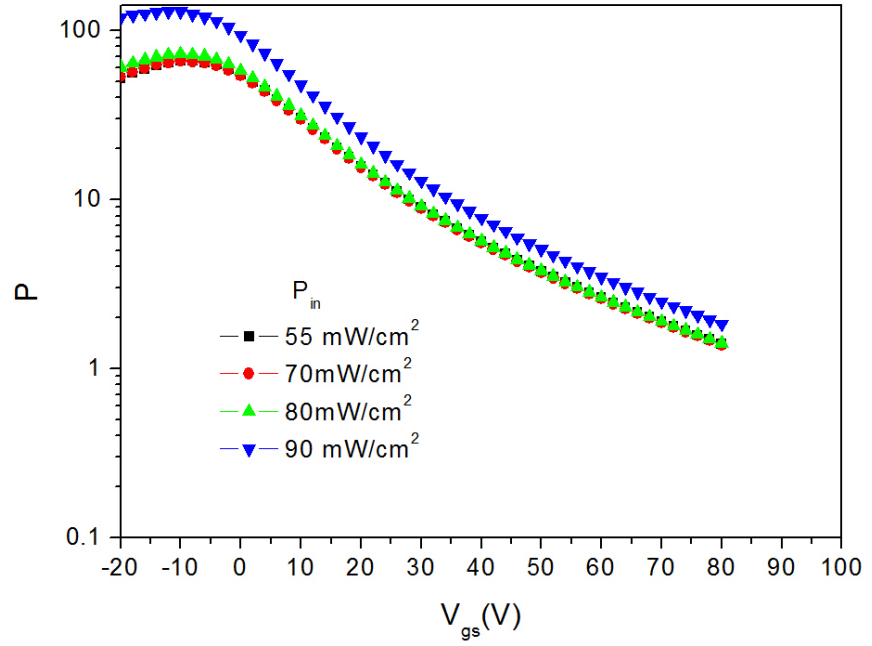


Şekil 5.24. NBBI yarıiletken temelli OFET yapısının farklı ışınım altında transfer karakteristiği.

Foto-transistörlerde foto-duyarlılık (photosensitivity) ışık altında transistörden elde edilen fotoakımın karanlıktaki akıma oranı olarak tanımlanmakta ve Eşitlik 5.5 ile tanımlanmaktadır (Hamilton et al. 2004).

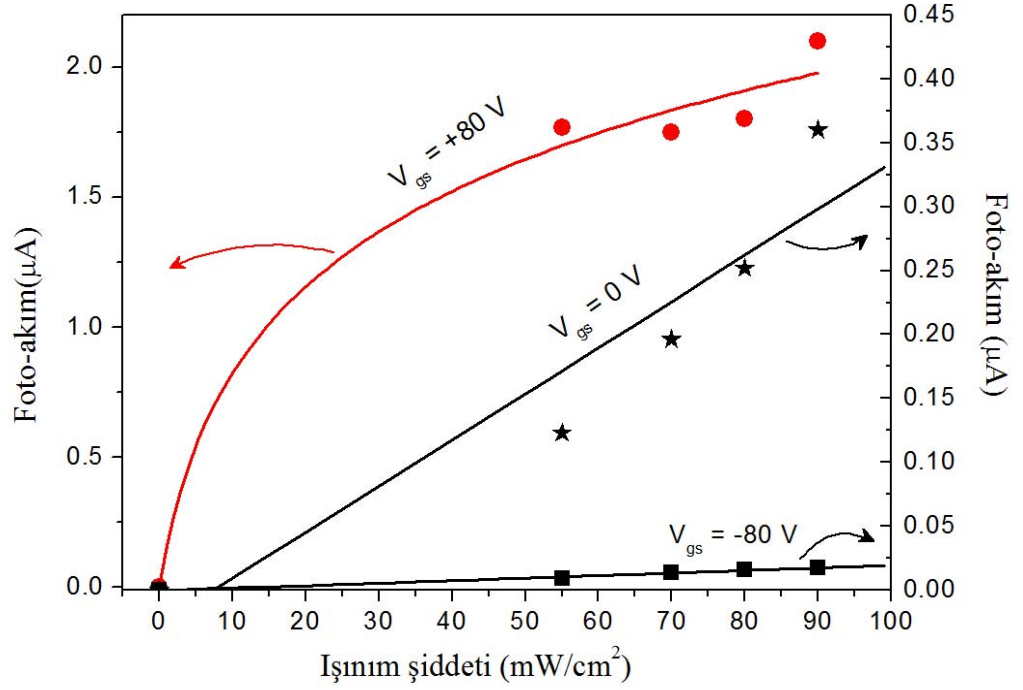
$$P = \frac{I_{ph}}{I_{ds,dark}} = \frac{I_{ds,illum} - I_{ds,dark}}{I_{ds,dark}} \quad (5.5)$$

burada  $I_{ds,illum}$  ışıma altında akaç-kaynak akımı,  $I_{ds,dark}$  karanlık altında akaç-kaynak akımını ifade etmektedir. Şekil 5.25 de verilen kapı gerilimine bağlı olarak transistörün foto-duyarlılığı incelendiğinde maksimum değerler transistörün tükenim (off-state) bölgesinde ve minimum değerlerde yığılma (on-state) bölgesinde görülmektedir. Yığılma (accumulation) bölgesinde ( $V_{gs} = 80$  V)  $90 \text{ mW/cm}^2$  ışıma altında foto-OFET in duyarlılığı 1,82 iken tükenim (depletion) bölgesinde ise ( $V_{gs} = 0$  V)  $90 \text{ mW/cm}^2$  ışıma altında 93,4 olarak bulunmuştur.



Şekil 5.25. Kapı gerilimine bağlı olarak transistörün yığınım ve tükenim bölgelerinde foto-duyarlılık değişimi

Şekil 5.26 da transistörün tükenim bölgesinde ( $V_{gs} < V_{th}$ )  $I_{ds}$  akım değeri ışık şiddetinin artması ile lineer olarak artarken, yığınım bölgesinde bu artış logaritmik olarak değişmektedir. Yığınım bölgesinde ışınım şiddetinin  $I_{ds}$  akımı üzerindeki kısmi etkisi tükenim bölgesindeki etkisine kıyasla oldukça az olmaktadır. Bunun nedeni yüksek kapı gerilimlerinde yani yığınım bölgesinde yük taşıyıcı yoğunluğu üzerinde elektrik alan etkisinin ışınım şiddetine göre daha baskın olması olarak açıklanabilir. Tükenim bölgesinde ise yük taşıyıcılarının yoğunluğu üzerinde ışınım şiddeti doğrudan etkili olmaktadır (Kang, 2004, Noh, 2005). Transistörün açık ve kapalı konumda iken ışıınıma bağlı olarak değişen foto-akımın Eşitlik 5.3 ve 5.4 ile verilen ifadeleri Şekil 5.26 da gösterilen deneysel verilerle uyum içerisinde olduğu net olarak görülmektedir. Transistörün foto-duyarlılık karakteristiği üzerinde kapı geriliminin etkileri grafikte verilen foto-akımın ışınım şiddetine karşı değişim eğrisinden anlaşılmaktadır. Tükenim bölgesindeki ışık şiddetine karşı yüksek foto-duyarlılık ve kapı geriliminden bağımsız olması, düşük güç tüketimli foto-detektör uygulamaları için önemli bir karakteristik olmaktadır.

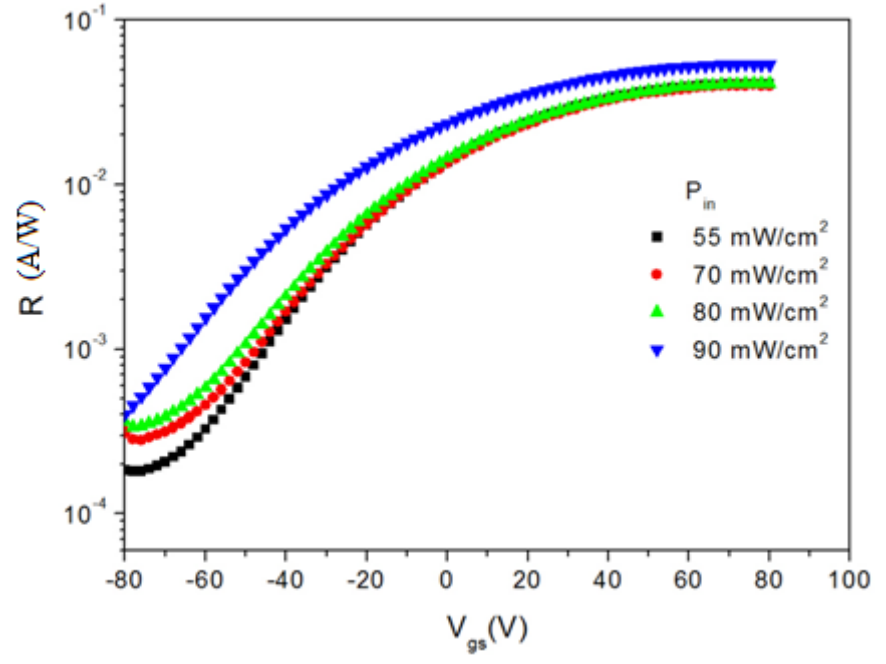


Şekil 5.26. Foto-akımın ışınım şiddetine bağlı tükenim ve yüksek yığılma bölgesinde değişimi.

Foto-OFET yapılarında diğer önemli parametre ise birim ışık şiddetine karşı elde edilen akım değerini veren foto-tepkidir (photoresponsivity). Bu parametre;

$$R = \frac{I_{ph}}{P_{opt}} = \left( \frac{I_{ds,illum} - I_{ds,dark}}{P_{inc} A_{aktif}} \right) \quad (5.6)$$

ifadesi ile verilmektedir (Hamilton et al. 2004). Burada  $I_{ds,illum}$  ışığa altında akış-kaynak akımı,  $I_{ds,dark}$  karanlık altında akış-kaynak akımını,  $P_{inc}$ , birim alana düşen ışınım şiddetini ve  $A_{aktif}$  foto-transistörün aktif alanını ifade etmektedir. Foto-OFET'in tükenim ve yüksek yığılma bölgesinde foto-tepki değerleri sırasıyla 14,3 mA/W and 32,7 mA/W olarak bulunmuştur. Tükenim bölgesine kıyasla yığılma bölgesindeki foto-tepki değerinin yüksek olması, kanaldaki yük taşıyıcı miktarının kapı gerilimine kıyasla büyük ölçüde ışınım şiddetine bağlı olmasına atfedilebilir (Tozlu et al. 2010).



Şekil 5.27. Kapı gerilimine bağlı olarak transistörün yığınım ve tükenim bölgelerindeki foto-tepki değişimi.



## 6. SONUÇLAR

Bu tezde amaçlanan, alan-etkili transistör yapısında n-kanal özellik gösterebilen perilen ve naftalen organik yarıiletken türevlerinin fonksiyonel gruplara bağlı olarak polimer yalıtkan tabakalar üzerindeki elektriksel parametrelerinin ve ışınım altında foto-fiziksel özelliklerinin incelenmesidir.

Tez çalışmalarında farklı moleküler yapıdaki perilen ve naftalen organik yarıiletkenlerin, aktif tabaka olarak kullanılan OFET yapısında farklı yüzey enerjilerine sahip polimer yalıtkan tabakalara bağlı elektriksel parametreleri bulunmuştur. Kullanılan organik yarıiletkenler; çekirdek yapılarına etil-hekzil ve benzimidazol fonksiyonel gruplarının bağlı olduğu naftalen ve perilen molekül yapılarıdır. Arilen bisimimid yapıları olarak da isimlendirilen aynı fonksiyonel grupların bağlı olduğu bu molekül yapıları kullanılması ile OFET uygulamalarında aralarındaki performans farklılıkları ve nedenleri açıklanmıştır. Ayrıca absorpsiyon bandları görünür bölgeye doğru kaydırılmış naftalen bis-benzimidazol organik yarıiletkenin AM 1,5 spektral dağılımına sahip ışınım altında foto-OFET uygulaması yapılarak, optiksel sinyalin elektriksel sinyale çevrimi incelenmiştir.

Bis-imidazol fonksiyonel grupların bağlı olduğu perilen (PBBI) ve naftalen (NBBI) organik yarıiletkenler ile üretilen OFET yapıların akım-gerilim ( $I_{ds}-V_{gs}$ ) eğrileri incelendiğinde, elektron mobilite ve transistörlerin açma/kapama oranları yalıtkan tabakanın yüzey özelliklerine göre değişmektedir. Hidrofobik BCB polimer yalıtkan tabaka üzerine kaplanan NBBI ve PBBI organik yarıiletkenlerden elde edilen alan etkili elektron mobilite değerleri sırasıyla  $1,04 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  ve  $1,62 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  olarak bulunmuştur. Hidrofilik PVA yalıtkan tabakası üzerine kaplanan NBBI ve PBBI yarıiletkenlerden elde edilen alan etkili elektron mobilite değerleri ise sırasıyla  $8,14 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  ve  $9,03 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  olarak bulunmuştur. PVA yalıtkan filmin birim alandaki kapasitans değeri BCB yalıtkan filmine göre yüksek olmasına rağmen BCB polimer yalıtkan üzerinde üretilen yarıiletkenlerin elektron mobilite değerleri daha yüksek çıkmıştır. Fonksiyonel grupların yüksek derecede aromatik yapıda olması buna bağlı olarak yarıiletken film yüzeyinin hidrofobik yapıya dönüşmesi, yük taşıyıcıların mobilite değerleri ve transistörlerin açma/kapama oranındaki farklılıkların sebebi olarak gösterilebilir. OFET yapılarında kullanılan yarıiletken ile yalıtkan malzemelerin eş yüzey enerjilerine sahip olması daha yüksek değerlere sahip yük taşıyıcı mobilite değerlerinin ve transistörlerin açma/kapama

oranın artmasında önemli bir faktör oluşturmaktadır. Yalıtkan malzemelerde bulunan polar gruplar yalıtkan malzeme içerisinde dipol alan oluşturmaları yarıiletken/yalıtkan arayüzeyinde enerji bandların eğilmesine neden olmakta ve transistörlerin yığının bölgesinde alan etkisi olmaksızın yük taşıyıcıların birikimine neden olabilmektedir. Ayrıca yalıtkan malzemede bulunan elektron çekici gruplar yarıiletken/yalıtkan arayüzeyinde tuzak seviyeler yaratmakta ve eşik altı eğim değeri yüksek çıkmaktadır. Yarıiletken filmlerin yüzey morfolojileri AFM ile incelendiğinde molekül kümelerinin şekilleri yalıtkan tabakaya bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Hidrofilik PVA yalıtkan tabaka üzerine kaplanan yarıiletken filmler amorf yapıya benzer şekilde büyürken, hidrofobik BCB yalıtkan tabaka üzerinden molekül kümeleri pürüzlü yapıya sahip olmakla birlikte, kümeler arası sınırlar belirginleşmektedir.

Etil hekzil hidro-karbon zincirlerinin bağlı olduğu perilen ve naftalen diimid yapıları ile yapılan çalışmalarda, aromatik benzimidazol fonksiyonel grup içeren perilen ve naftalen yapılarından çok farklı akım-gerilim eğrileri elde edilmiştir. Alkil gruplarına bağlı olarak perilen ve naftalen diimid yapılarından elde edilen alan etkili elektron mobilite değerleri ve transistörün açma/kapama oranları artmıştır. En yüksek elektron mobilitesi  $1,72 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  değeri ile BCB yalıtkan üzerine kaplanan EHPDI organik yarıiletkeninden elde edilmiştir. EHNDI organik yarıiletkenindeki en yüksek elektron mobilitesi  $9,06 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  değeri ile PVA yalıtkan tabaka üzerinde elde edilmiştir. Açma/kapama oranları ise  $2 \times 10^4$  değerine eşit olmaktadır. Benzimidazol fonksiyonel grupları içeren perilen ve naftalen organik yarıiletkenlerin aynı yalıtkan tabakalar üzerinde eşdeğer performans sergilemekte iken, alkil grupların bağlı olduğu organik yarıiletkenlerde bu uyumluluk ortadan kalkmaktadır. Buradaki temel faktör perilen ve naftalen çekirdek molekül yapısında bulunan aromatik halka yoğunluğunun ile karbonil polar grupların etkilerinden kaynaklanmaktadır. Naftalen diimid yapısında bulunan karbonil gruplarının polaritesinin aromatik halka sayısı daha çok olan perilen diimid yapısına göre daha baskın olması, molekülü daha polar hale getirmekte ve polar yalıtkan malzeme üzerinde daha iyi sonuçlar elde edilmektedir. Arayüzeydeki tuzak yoğunlukları ise organik yarıiletkenin molekül yapısına bağlı olup, benzimidazol gruplarına sahip arilen bisimid yapılarında alkil gruplu arilen bismide molekül yapılarına göre arayüzeydeki tuzak yoğunlukları artmaktadır. Sonuç olarak organik yarıiletken tabanlı alan etkili transistör uygulamalarında yarıiletken ile yalıtkan malzemelerin polaritelerinin birbirlerine uyumlu olması transistör

performansı üzerinde doğrudan etkili olmakta ve daha yüksek değerlere sahip transistör parametreleri elde edilmektedir.

NBBI organik yarıiletkenin aktif tabaka olarak kullanıldığı alan etkili transistörün AM 1,5 spektral dağılımına sahip beyaz ışığın farklı ışınım şiddetlerinde foto-fiziksel özellikleri incelenmiştir. Absorpsiyon bandı UV bölgede olan naftalen diimid molekülünün imide pozisyonlarına takılan aromatik gruplar ile molekülün absorpsiyon bandı yüksek konjugasyondan dolayı görünür bölgeye doğru kaymaktadır. Karanlık altında NBBI organik yarıiletkendeki elektronların alan etkili mobilite değeri  $6,06 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  olarak bulunmuştur. Eşik gerilim değeri ve açma/kapama oranı ise sırasıyla 7,2 V ve  $3,4 \times 10^2$  dir. Kapı gerilimi uygulanmaksızın yani alan etkisi olmaksızın  $55 \text{ mW/cm}^2$  ile  $90 \text{ mW/cm}^2$  arasında değişen ışınım şiddetlerinde kanal boyunca çalışma bölgeleri iyi tanımlanmış çalışma eğrisi ortaya çıkmaktadır. Işınım şiddetlerine bağlı olarak foto-transistörün eşik gerilim değeri negatif değerlere doğru kaymaktadır. Bu kaymanın başlıca nedeni olarak ışık stresinin yanında kanal boyunca birim alanda yaratılan fazlalık yük yoğunluklarından kaynaklanmaktadır. Çalışmalarda karanlık altında görülen düşük histeresis etkisi, ışıma altında daha büyük değerli olarak ortaya çıkmıştır. Arayüzeyde ışıma altındaki yük taşıyıcı kontrasyonun karanlık altında ki değere göre daha büyük olması nedeni ile kanal kıyısında birim alanda tuzaklanan yük taşıyıcı konsantrasyonu artmakta ve histeresis etkisi büyümektedir. Foto-OFET yapısının ışıma altında foto-duyarlılığı tükenim bölgesinde ve yığılma bölgesinde sırasıyla 93,5 ve 1,82 dir. Foto-OFET'in tükenim ve yüksek yığılma bölgesinde foto-tepki değerleri sırasıyla  $14,3 \text{ mA/W}$  and  $32,7 \text{ mA/W}$  olarak bulunmuştur. Elde edilen bu değerler bifonksiyonel spiro (Saragi et al. 2004) ve F8T2 [poli(9,9-dioktilfluoren-ko-bitiyofen)] (Hamilton et al. 2004) tek katmanlı organik yarıiletkenlerden elde edilen foto-duyarlılık değerlerinden yüksek bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde konjüge fonksiyonel grupların naftalen organik moleküllerin imid veya bay pozisyonlarına bağlanması ile yüksek foto-duyarlıklılı foto-OFET yapıları elde edileceği açıktır. Burada önemli olan yük taşıyıcı transferi ve ışığa karşı duyarlılık için naftalen çekirdek yapısına bağlanan aromatik halkaların rezonansa girmesidir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Adachi, M., Murata Y., Nakamura, S.,** 1995, Spectral similarity and differences of naphthalenetetracarboxylic dianhydride, perylenetetracarboxylic dianhydride and their derivatives, *J. Phys. Chem.*, 99 (39):14240-14246pp.
- Anthopoulos, T. D., Singh, B., Marjanovic, N., Sariciftci, N. S., Montaigne, A., Sitter, H., Cölle, M., and de Leeuw, D. M.,** 2006. High performance n-channel organic field-effect transistors and ring oscillators based on C<sub>60</sub> fullerene films, *Appl. Phys. Lett.*, 89:213504-213506pp.
- Anthopoulos, T. D., Tanase, C., Setayesh, S., Meijer, E. J., Hummelen, J. C., Blom, P. W. M. and D. M. de Leeuw,** 2004. Ambipolar organic field effect transistor based on a solution processed methaofullerene, *Adv. Mater*, 16 (23-24):2174-2178pp.
- Anthopoulos, T.D., Singh, B., Marjanovic, N., Sariciftci, N.S., Ramil, A.M. and Sitter, H.,** 2006, High performance n-channel organic field-effect transistors and ring oscilattors based on C<sub>60</sub> fullerene films, *Appl. Phys. Lett.* 89:213504-213506pp.
- Baeg, K. J., Khim, D., Kim, D. Y., Koo, J. B., You, I. K., Choi, W. S. and Noh, Y. Y.,** 2010. High mobility top-gated poly(3-hexylthiophene) field-effect transistors with high work-function Pt electrodes, *Thin Solid Films*, in press.
- Bao, Z. and Locklin, J.,** 2007. *Organic field effect transistors*, 2007, Taylor and Francis, 616p.
- Bao, Z., Dodabalapur, A. and Lovinger, A. J.,** 1996. Soluble and processable regioregular poly(3-hexylthiophene) for thin film field-effect transistor applications with high mobility, *Appl. Phys. Lett.* 69 (26):4108-4110pp.
- Bao, Z., Lovinger, A. J., and Brown, J.,** 1998. New air-stable n-channel organic thin film transistors, *J. Am. Chem. Soc.*, 120:207-208pp.
- Beechinor, J. T., Mcglynn, E., O'Reilly, M., and Crean, G. M.,** 1997. Optical characterization of thin film benzocyclobutene (BCB) based polymers. *Microelec. Engin.*, 33:363-368pp.
- Bhosale, S. V., Jani, C. H. and Langford, S. J.,** 2008. Chemistry of naphthalene diimides, *Chem. Soc. Rev.*, 37:331-342pp.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Boudinet, D., Le Blevenec, G., Serbutoviez, C., Verilhac, H. Y., Horrowitz, G.,** 2009. Contact resistance and threshold voltage extraction in n-channel organic thin film transistors on plastic substrate, *J. Appl. Phys.*, 105:84510-84517pp.
- Boudreault, P. T., Blouin, N. and Leclerc, M.,** 2008, Poly(2,7-carbazole)s and related polymers, *Adv. Polym. Sci.* 212:99–124pp.
- Brabec, C. J., Dyakonov, V., Parisi, J. and Sariciftci N.S.,** 2003. Organic photovoltaics concept and realization. 4p.
- Brown, A. R., Jarrett, C. P., De Leeuw, D. M. and Matters, M.,** 1997. Field-effect transistors made from solution processed organic semiconductors, *Synt. Met.*, 88:37-55pp.
- Chen, F. C., Liao, C. H.,** 2008, improved air stability of n-channel organic thin-film transistor with surface modification of gate dielectrics, *Appl. Phys. Lett.*, 93:103310-103313pp.
- Chen, H. Z., Ling, M. M., Mo, X., Shi, M. M., Wang, M. and Bao, Z.,** 2007. Air stable n-channel organic semiconductors for thin film transistors based on fluorinated derivatives of perylene diimides, *Chem. Mater.* 19: 816-824pp.
- Chesterfield, R. J., McKeen, J. C., da Silva Filho, D.A., Newman, C. R., Bre´das, J., Miller, P. Ewbank, L. L. C., Mann K. R. and Frisbie, C. D.,** 2004. Organic thin film transistors based on n-alkyl perylene diimides: charge transport kinetics as a function of gate voltage and temperature, *J. Phys. Chem. B.*, 108:19281-19292pp.
- Chikamatsu, M., Nagamatsu, S., Yoshida, Y., Saito, K., Yase, K., and Kikuchi, K.,** 2005, Solution processed n-type organic thin film transistors with high field-effect mobility, *Appl. Phys. Lett.*, 87:203504-203596pp.
- Choi, C.S., Kang, H.S., Choi, W.Y., Kim, D.H., Seo, K.S.,** 2005, Phototransistors based on InP HEMTs and their applications to millimeter-wave radio-on-fiber systems, *IEEE Microwave Theory and Tech.* 53:256-263pp.
- Chua, L. L., Ho, P. K. H., Sirringhaus, H., Friend, R. H.,** 2003, High stability ultrathin spin-on benzocyclobutene gate dielectric for polymer field effect transistors, *Appl. Phys. Lett.*, 84:3400-3403pp.

# KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Chua, L. L., Zaumseil, J., Chang, J. F., Ou, E. C. W., Ho, P. K. H., Sirringhaus, H. R. and Friend, H.,** 2005. General observation of n-type field-effect behaviour in organic semiconductors, *Nature*, 434:194-199pp.
- Cosseddu, P., and Bonfiglio A .,** 2007, A comparison between bottom contact and top contact all organic field effect transistors assembled by soft lithography, *Thin Solid Films* 515:7551 – 7555pp.
- Credelle, T.L.,** 1988. Proceedings of the International Display Research Conference, San Diego, IEEE, New York, 208p.
- Dinelli, F., Murgia, M., Levy, P., Cavallini, M., Biscarini, F. and de Leeuw, D.M.,** 2004, The spatially correlated charge transport in organic thin film transistors, *Phys. Rev. Lett.* 92:116802-116805pp.
- Egginger, M., Bauer, S., Schwödiauer, R., Neugebauer, H., Sariciftci, N.S.,** 2009, Current versus gate voltage hysteresis in organic field effect transistors, *Monatsh Chem.*, 140:735-750pp.
- Egginger, M., Irimia-Vladu, M., Schödiauer, R., Tanda, A., Frischauf, I., Bauer, S., and Sariciftci, N.S.,** 2008, Mobile ionic impurities in poly(vinyl alcohol) gate dielectric: possible source of the hysteresis in organic field-effect transistors, *Adv. Mater.*, 20:1018-1022pp.
- Erlen, C., and Lugli, P.,** 2009, Analytical model of trapping effects in organic thin film transistors, *IEEE Trans. Elect. Dev.* 56:546-552pp.
- Erten, S. and Icli, S.,** 2008, Bilayer heterojunction solar cell based on naphthalene bis-benzimidazole *Inor. Chim. Ac.* 361:595-600pp.
- Erten, S., Alp S., and Icli, S.,** 2005, Photooxidation quantum yield efficiencies of naphthalene diimides under concentrated sun light in comparisons with perylene diimides, 175:214-220pp.
- Erten, S., Meghdadi, F., Gunes, S., Koeppe, R., Sariciftci, N.S. and Icli, S.,** 2007, Donor-acceptor heterojunction solar cell based on perylenediimide and perylene bis-benzimidazole, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 36:225-229pp.
- Facchetti, A., Yoon, M. H. and Marks, T.,** 2005, Gate dielectrics for organic field effect transistors: new opportunities for organic electronics, *Adv. Mater.* 17:1705-1725pp.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Gao, J., Asadi, K., Xu, J.B., An, J.,** 2009, Controlling of the surface energy of the gate dielectric in organic field-effect transistors by polymer blend, *Appl. Phys. Lett.* 94:93302-93305pp.
- Gao, P., Beckmann, D., Tsao, H. N., Feng, X., Enkelmann, V., Baumgarten, M. and İsula, K. and Müllen, W. P.,** 2009, Dithieno[2,3-d;2',3'-d']benzo[1,2-b;4,5-b']dithiophene (DPBDT) as semiconductor for high performance, solution-processed organic thin film transistors, *Adv. Mater.*, 21:213-216pp.
- Gregg B. A. and Cormier, R.S.,** 1998, Liquid crystal perylene diimide films characterized by electrochemical, spectroelectrochemical, and conductivity versus potential measurements, *J. Phys. Chem. B*, 102:9952-9957pp.
- Hadziioannou, G. and van Hutten, P.F.,** 1999, Semiconducting polymers; chemistry, physics and engineering, Wiley-VCH, 613p.
- Halik, M., Klauk, H., Zschieschang, U., Schmid, G., Radlik, W., Ponomarenko, S., Kirchmeyer, S. and Weber, W.,** 2003, High-mobility organic thin-film transistors based on  $\alpha$ - $\alpha'$ -didecyloligothiophenes, *J. Appl. Phys.* 93:2977-2981pp.
- Hamilton, M. C., Martin, S., and Kanicki, J.,** 2004, Thin-film organic polymer phototransistors, *IEEE Trans. Electron. Dev.* 51:877-885pp.
- Hasegava, T., and Takeya, J.,** 2009, Organic field effect transistors using single crystals, *Sci. Tech. Adv. Mater.* 10:024314-024330pp.
- Heeger, A. J., Macdiarmid, A. G., and Shirakawa, H.,** 2000, The Nobel prize in chemistry, conductive polymers, <http://nobelprize.org/chemistry/laureates/2000/heeger-lecture.pdf>
- Hill, I.G., Weinert, C.M., Kreplak, L. and van Zyl B.P.,** 2009, Influence of self-assembled monolayer chain length on modified gate dielectric pentacene thin-film transistors, *Appl Phys A*, 95:81–87pp.
- Horowitz, G. and Delannoy, P.,** 1991, An analytical model for organic based thin film transistors, *J. Appl. Phys.*, 70, 469-475pp.
- Horowitz, G.,** 1998, Organic field-effect transistors, *Adv. Mater.*, 10, 365-377pp.

# KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Horowitz, G., Hajlaoui, R., Bouchriha, H., Bourguiga, R., and Hajlaoui, M.,** 1998. The concept of threshold voltage in organic field effect transistors, *Adv. Mater.* 10, 923-927pp.
- Hu, W., Liu, Y., Xu, Y., Liu, S., Zhou, S. and Zhu, D.,** 1999, The application of Langmuir-Blodgett films of a new asymmetrically substituted phthalocyanine in diodes and in all organic field effect transistors, *Synth. Met.*, 104, 19-26pp.
- 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, *Appl Phys Lett.*, 92:013304-013306pp.
- Irami-Vladu, M., Marjanovic, N., Vlad, A., Ramil, A. M., Sosa, G. H., Schwödiauer, R. Bauer, S., and Sariciftci, N.S.,** 2008, Vacuum-processed polyaniline-C<sub>60</sub> organic field effect transistors, *Adv. Mater.* 20:3887-3892pp.
- Jang, J., Kim, J. W., Park, N., and J.J. Kim,** 2008, Air stable C<sub>60</sub> based n-type organic field effect transistor using a perfluoropolymer insulator, *Org. Electron.*, 9:481486pp.
- Jang, Y, Cho, J.H., Kim, D.H., Park, Y.D., Hwang, M., and Cho, K.,** 2007, Effects of the permanent dipoles of self-assembled monolayer-treated insulator surfaces on the field-effect mobility of a pentacene thin-film transistor, *Appl. Phys. Lett.* 90:132104-132106pp.
- Jones, B. A., Facchetti, A., Marks T. J. and Wasielewski, M. R.,** 2007, Cyanonaphthalene diimide semiconductors for air-stable, flexible, and optically transparent n-channel field-effect transistors, *Chem. Mater.*, 19 (11):2703-2705pp.
- Jones, B. A., Facchetti, A., Wasielewski, M. R. and Marks, T. J.,** 2007, Tuning orbital energetics in arylene diimide semiconductors. materials design for ambient stability of n-type charge transport, *J. Am. Chem. Soc.*, 129:15259-15278pp.
- Kalb, W., Lang, Ph., Mottaghi, M., Aubin, H., Horowitz, G., and Wutting, M.,** 2004, Structure–performance relationship in pentacene/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin-film transistors, *Synth. Met.* 146:279-282pp.



### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- 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, *Appl. Phys. Lett.* 84:3780-3782pp.
- Karapire, C., Zafer, C., and İçli, S.,** 2004, Studies on photophysical and electrochemical properties of synthesized hydroxy perylenediimides in nanostructured titania thin films, *Synthetic Metals* 145:51–60pp.
- Katz, H. E., Lovinger, A. J., Johnson, J., Kloc, C., Siegrist, T., Li, W., Lin, Y.Y. and Dodabalapur, A.,** 2000, A soluble and air-stable organic semiconductor with high electron mobility, *Nature*, 404:478-480pp.
- Kim, S. J., Ryu, K. and Chang, S. W.,** 2010, Solution-processed organic field-effect transistors patterned by self-assembled monolayers of octadecyltrichlorosilane and phenyltrichlorosilane, *J Mater*, 45:566–569pp.
- Klauk, H., Halik, M., Zschieschang, U., Schmid, G. and Radlik, W.,** 2002, High- mobility polymer gate dielectric pentacene thin film transistors. *J. App. Phys.* 92:5259-5263pp.
- Kline, R. J., McGehee, M. D., Kadnikova, E. N., Liu, J. and Frechet, J. M. J.,** 2003, Controlling the field-effect mobility of regioregular polythiophene by changing the molecular weight, *Adv. Mater.*, 15:1519-1522pp.
- Krauss, T. N., et al.,** 2008, Three-dimensional molecular packing of thin organic films of PTCDI-C<sub>8</sub> determined by surface X-ray diffraction, *Langmuir*, 24:12742-12744pp.
- Kus, M.,** 2006, Sıvı kristal özellikli perilendiimidlerin sentezleri ve organik fotosensörlerin fotofiziksel fotokimyasal özelliklerinin incelenmesi, Doktora tezi, 102s.
- Kymissis, I.,** 2009, Organic field effect transistors, Springer science and business media, LLC, 148p.
- Kymissis, I., Dimitrakopoulos, C.D. and Purushothaman S.,** 2001, High performance bottom electrode organic thin-film transistors. *Electron devices, IEEE Transactions on*, 48 (6):1060-1064pp.
- Laquindanum, J. G., Katz, H. E., Dodabalapur, A. and Lovinger, A. J.,** 1996, N-channel organic transistor materials based on naphthalene framework, *J. Am. Chem. Soc.*, 11:11331-11332pp.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Lee, C.A., Park, D.W., Jung, K.D., Kim, B.J., Kim, Y.Ch., Lee, J.D., and Park, B.G.**, 2006, Hysteresis mechanism in pentacene thin film transistor with poly (4-vinyl phenol) gate insulator, Appl. Phys. Lett. 89:262120-262123pp.
- Lilienfeld, J. E.**, 1930, US patent 1745175
- Ling, M.M., Bao, Z., and Erk, P.**, 2006, Air-stable n-channel copper hexachlorophthalocyanine for field-effect transistors, Appl. Phys. Lett., 89:163516-1633518pp.
- Locklin, J., Li, D., Mannsfeld, S. C. B., Borkent, E. J., Meng, H., Advincula, R. and Bao, Z.**, 2005, Organic Thin Film Transistors Based on Cyclohexyl-Substituted Organic Semiconductors, Chem. Mater., 17:3366-3374pp.
- Marjanovic, N., et al.** 2005, Photoresponsive organic field-effect transistors using organic semiconductors and dielectrics, PhD thesis, 95p.
- Mills, M. E., Townsend, P., Castillo, D., Martin, S. and Achen, A.**, 1997, Benzocyclobutene (DVS-BCB) polymer as an interlayer dielectric (ILD) material. Microelec. Engin., 33:327-334pp.
- Muccini, M.**, 2006, A bright future for organic field-effect transistors, Nature Materials, 5:605-613pp.
- Murphy, R., A. and Fréchet, M., J.**, 2007, Organic semiconducting oligomers for use in thin film transistors, Chem. Rev., 107:1066-1096pp.
- Newman, C.R., Frisbie, C. D., Brédas, J.L., Ewbank, P.C., da Silva Filho, D. A. and Mann, K.**, 2004, Introduction to organic thin film transistors and design of n-channel organic semiconductors, Chem. Mater. 16:4436-4451pp.
- Noh, Y. Y., Kim, D. Y., Yoshida, Y., Yase, K., Jung, B. J., Lim, E., and Shim, H. K.**, 2005, High-photosensitivity p-channel organic phototransistors based on a biphenyl end-capped fused bithiophene oligomer, Appl. Phys. Lett. 86:043501-043504pp.
- Noh, Y.Y., Kim, J. J., Yoshida, Y. and Yase, K.**, 2003, Effect of molecular orientation of epitaxially grown platinum octaethyl porphyrin films on the performance of field effect transistors, Adv. Mater., 15, 699-702
- O'neil, M. and Kelly, S. M.**, 2003, Liquid crystals for charge transport, luminescence and photonics, Adv. Mater., 15:1135-1146pp.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ortiz, R. P., Facchetti, A. and Marks, T. J.,** 2010, High- k organic, inorganic, and hybrid dielectrics for low-voltage organic field-effect transistors, *Chem. Rev.*, 110:205-239pp.
- P.K. Weimer,** 1962, The TFT – a new thin film transistor. *Proc. IRE*, 50:1462-1469pp.
- Peng, X., Horowitz, G., Fichou, D. and Garnier, F.,** 1990, All organic thin-film transistors made of alpha-sexithienyl semiconducting and polymeric insulator layers, *Appl. Phys. Lett.* 57:2013-2015pp.
- Pernstich, K.P., Haas, S., Oberhoff, D., Goldmann, C., Gundlach, D.J., Batlogg, B., Rashid, A.N., and Schitter, G.,** 2004, Threshold voltage shift in organic field-effect transistors by dipole monolayers on the gate insulators, *J. Appl. Phys.* 96:6431-6438pp.
- Piliago, C., Jarzab, D., Gigli, G., Chen, Z., Fachetti A. and Loi, M. A.,** 2009, High electron mobility and ambient stability in solution processed perylene based organic field effect transistors, *Adv. Mater.* 21:1-4pp.
- Ponomarenko, S. A., Kirchmeyer, S., Halik, M., Klauk, H., Zschieschang, U., Schmid, G., Karbach, A., Drechsler, D. and Alpatova, N. M.,** 2005, 1,4-bis(5-decyl-2,2'-bithien-5-yl)benzene as new stable organic semiconductor for high performance thin film transistors, *Synth. Met.* 149:231-235pp.
- Popeand, M. and Swenberg, C. E.,** 1999, *Electronic Processes in organic crystals and polymers*, 2nd edit., Oxford university pres, New York, 1293p.
- Powell, M. J., Easton, B.C., and Hill, O.F.,** 1981, Amorphous silicon-silicon nitride thin-film transistors, *Appl. Phys. Lett.* 38:794-796pp.
- 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, *J. Electrochem. Soc.* 140:3679-3683pp.
- Saragi, T. P., Pudzich, R., Fuhrmann, T., and Salbeck, J.,** 2004, Organic phototransistor based on intramolecular charge transfer in a bifunctional spiro compound, *Appl. Phys. Lett.*, 84:2334-2336pp.
- Sariciftci, N. S., Smilowitz, L., Heeger, A. J., and Wudl, F.,** 1992, Photoinduced electron transfer from conducting polymer to small organic molecules, *Science*, 258:1474-1476pp.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Scheinert, S., Paasch, G., Schrödner, M., Roth, H.K., Sensfuß, S., and Doll, Th.,** 2002, Subthreshold characteristics of field effect transistors based on poly (3-dodecylthiophene) and an organic insulator, , J. Appl. Phys. 92:330-337pp.
- Scheinert, S., Perntich, K.P., Batlogg, B., and Paasch, G.,** 2007, Determination of trap distributions from current characteristics of pentacene field-effect transistors with surface modified gate oxide, J. Appl. Phys. 102:104503-104510pp.
- Schmidt R., et al.** 2009, High performance air stable n-channel organic thin film transistors based on halogenated perylene bisimide semiconductors, J. Am. Chem. Soc., 131:6215-6228pp.
- Schroder D.K.,** 2006, Semiconductor material and device characterization. Wiley, New York, 779p.
- See, K. C., Landis, C., Sarjeant A. and Katz, H. E.,** 2008, Easily synthesized naphthalene tetracarboxylic diimide semiconductors with high electron mobility in air, Chem. Mater., 20:3609-3616pp.
- Shekar, B. C., Lee, J. and Rhee, S. W.,** 2004, Organic thin film transistors: materials, processes and devices, Korean J. Chem. Eng., 21(1):267-285pp.
- Shekar, B. C., Veeravazhuthi, V., Sakthivel, S., Mangalaraj, D., and Narayandass, S.K.,** 1999, Growth, structure, dielectric and AC conduction properties of solution growth PVA films, Thin solid films, 349:122-129pp.
- Shin, K., Yoon, S., Yang, C., Jeon, H., and Park, C.E.,** 2007, Effects of polar functional groups and roughness topography of polymer gate dielectric layer on pentacene field-effect transistors, Org. Electron. 8:336-342pp.
- Shin, W. S., Jeong, H., Kim, M., Jin, S., Kim, M., Lee, J., Lee J. W. and Gal, Y.,** 2006, Effects of functional groups at perylene diimide derivatives on organic photovoltaic device application, 16:384-390pp.
- Shinar, J.,** 2003, Organic light emitting devices, Springer-Verlag, New York 303p.
- Shirota, Y. and Kageyama, H.,** 2007, Charge carrier transport molecular materials and their applications in devices, Chem. Rev. 107:953-1010pp.
- Singh, T. B. and Sariciftci, N. S.,** 2006, Annual Review of Material Research, 36:199-231pp.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Singh, Th. B., Marjanovic, N., Stadler, P., Auinger, A., Matt, G. J., Günes, S., Sariciftci, N. S., Schwödiauer R. and Bauer, S.,** 2005, Fabrication and characterization of solution-processed methanofluorene-based organic field-effect transistors, *J. Appl. Phys.* 97:83714-83718pp.
- Singh, Th. B., Marjanovic, N., Stadler, P., Auinger, M., Matt, G. J., Günes, S., Sariciftci, N. S., Schwödiauer R. and Bauer S.,** 2005, Fabrication and characterization of solution-processed methanofullerene-based organic field-effect transistors, *J. Appl. Phys.* 97:83714-83718pp.
- Singh, Th. B., Meghdadi, F., Günes, S., Marjanovic, N., Horowitz, G., Lang, P., Bauer, S. and Sariciftci, N. S.,** 2005, High performance ambipolar pentacene organic field effect transistors on PVA organic gate dielectric, *Adv. Mater.*, 17:2315-2320pp.
- Singh, Th. B., Meghdadi, F., Günes, S., Marjanovic, N., Horowitz, G., Lang, P., Bauer, S., and Sariciftci, N. S.,** 2005, High performance ambipolar pentacene organic field effect transistors on poly(vinyl alcohol) organic gate dielectric, *Adv. Mater.*, 17:2315-2320pp.
- Singh, Th., B., Marjanvic, N., Stadler, P., Auinger, M., Matt, G., J., Günes, S., Sariciftci, N., S., Bauer, S., and Schwödiauer, S.,** 2005, Fabrication and characterization of solution processed methanofullerene based organic field effect transistors, *J. Appl. Phys.*, 97:083714-083717pp.
- Sirringhaus, H., et al.,** 1999, Two-dimensional charge transport in self-organized, high-mobility conjugated polymers, *Nature*, 401:685-688pp.
- Stadler, P.,** 2006, Hysteresis in bio organic field effect transistors, Diploma thesis, 67p.
- Stadler, P., Track, A. M., Ullah, M., Sitter, H., Matt, G. J., Koller, G., Singh, T. B., Neugebauer H., Sariciftci, N. S. and Ramsey, M. G.,** 2009, The role of the dielectric interface in organic transistors: A combined device and photoemission study, *Organic Electronics*, 11:207-211pp.
- Street, A. and Salleo A.,** 2002, Contact Effects in Polymer Transistors, *Applied Physics Letters*, 81:2887-2889pp.
- Streetman, B. G.,** 1972, *Solid State Electronic Devices*, Prentice Hall, New York, 490p.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Suzuki, H. and Hoshino, S.,** 1996, Effects of doping dyes on the electroluminescent characteristics of multilayer organic light-emitting diodes, *J. Appl. Phys.*, 79: 8816-8122pp.
- Sze, S. M.** 1981, *Physics of Semiconductor Devices*. A Wiley-Intescience Publication, 2nd Ed, New York, 815p.
- Tang, C. W.,** 1986, Two-layer organic photocell, *Appl. Phys. Lett.*, 48 (2):183-185pp.
- Tang, C. W., and Vanslyke, S. A.,** 1987, Organic electroluminescent diodes, *Appl. Phys. Lett.*, 51 (12):913-915pp.
- Tang, M. L., Okamoto, T., and Bao, Z.,** 2006, High-Performance Organic Semiconductors: Asymmetric Linear Acenes Containing Sulphur, *J. Am. Chem. Soc.* 128:16002-16003pp.
- Tozlu, C., Erten-Ela, S., and Icli, S.,** 2010, Photo-responsive n-channel organic field effect transistor based on naphthalene bis-benzimidazole with divinyltetramethyl disiloxane-bis (benzo- cyclobutene) gate insulator, *Sens. Actua. A: Phys.*, 161:46-52pp.
- Veres, J., Ogier, S. D., Leening, S. W., Cupertino, D. C. and Khaffaf, S. M.,** 2003, Low- k insulator as the choice of dielectrics in organic field-effect transistors, *Adv. Funct. Mater.*, 13:199-204pp.
- Vissenberg, M.,** 1999, Opto-electronic properties of disordered organic semiconductors, PhD. Thesis, 161p.
- Wakim, S., XBlouin N., Gingras, E., Tao, Y. and Leclerc, M.,** 2007, Poly(2,7-carbazole) derivatives as semiconductors for organic thin-film transistors, *Macromol. Rapid Commun.*, 28:1798–1803pp.
- Wang, G., Hirasa, T., Moses, D. and Heeger, A. J.,** 2004, Fabrication of regioregular poly(3-hexylthiophene) field-effect transistors by dip-coating, *Synt. Met.*, 146:127-132.pp.
- Wang, G., Swensen, J., Moses, D. and Heeger, A. J.,** 2003, Increased mobility form regioregular poly(3-hexylthiophene) field effect transistors, *J. Appl. Phys.*, 93:6137-6141pp.
- Xiao, K., et al.** 2005, A Highly -Stacked Organic Semiconductor for Field-Effect Transistors Based on Linearly Condensed Pentathienoacene, *J. Am. Chem. Soc.* 127:13281-13286pp.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Xiao, K., Liu, Y., Guo, Y., Wan, L. and Zhu, D.,** 2005, Influence of self-assembly monolayers on the characteristics of copper phthalocyanine thin film transistor, *Appl. Phys.A* 80:1541–1545pp.
- Yamashita, Y.,** 2009, Organic semiconductors for organic field-effect transistors, 10:024313-124321pp.
- Yan, H., Yoon, M. H., Facchetti, A., and Marks, T. J.,** 2005, Organic field-effect transistors based on a crosslinkable polymer blend as the semiconducting layer, *Appl. Phys. Lett.*, 87:183501-183504pp.
- Yang, S.Y., Shin, K., and Park, C.E.,** 2005, The effect of dielectric surface energy on pentacene morphology and organic field-effect transistor characteristics, *Adv. Funct. Mater.* 15:1806-1814pp.
- Yildirim, F.A., Schlieve, R.R., Bauhofer, W., Meixner, R.M., Goebel, H., and Krautschneider, W.,** 2008, gate insulators and interface effects in organic thin-film transistors, *Organic Electronics* 9:70–76pp.
- Yoon, Y. H., Kim, C., Facchetti, A., and Marks T. J.,** 2006, Gate dielectric chemical structure-organic field-effect transistor performance correlations for electron, hole, and ambipolar organic semiconductors, *J. Am. Chem. Soc.*, 128:12851-12869pp.
- Zhou, L., Wanga, A., Wu, S. C., Sun, J., Park, S., Jackson, T.,** 2006, All-organic active matrix display, *Appl. Phys. Lett.*, 88:083502-083504pp.
- Zen, A., Pflaum, J., Hirschmann, S., Zhuang, W., Jaiser, F., Asawapirom, U., Reabe, J. P., Scherf, U. and D. Neher,** 2004, Effect of molecular weight and annealing of poly(3-hexylthiophene)s on the performance of organic field-effect transistors, *Adv. Func. Mater.*, 14:757-764pp.

**ÖZGEÇMİŞ**

**Düzenlenme tarihi:** Mayıs 2010

**Adı Soyadı:** Cem TOZLU

**Ünvanı:** Araştırma Görevlisi

**Doğum tarihi ve yeri:** 17.07.1978/MUĞLA

**Yazışma Adresi:** Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, Bornova  
İzmir/TÜRKİYE

**Telefon:** 0232-3886028/120

**Fax:** 0232-3886027

**e-posta:** cem.tozlu@ege.edu.tr

**EĞİTİM BİLGİLERİ**

**Lisans:** Anadolu Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü (1996-2000)

**Yüksek Lisans:** Muğla Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü  
(2001-2004)

**Doktora:** Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, Enerji bilim dalı  
(2005-2010)



## **YAYINLAR:**

### **Uluslararası Yayınlar:**

- 1- Cigdem SAHIN, Cem TOZLU, Kasim OCAKOGLU, Ceylan ZAFER, Canan VARLIKLI, Siddik ICLI, "Synthesis of an amphiphilic ruthenium complex with swallow-tail bipyridyl ligand and its application in nc-DSSC", *Inorganica Chimica Acta*, 361, 2008, 671-676
- 2- Ceylan ZAFER, Burak GULTEKIN, Cihan OZSOY, Cem TOZLU, Banu AYDIN, Siddik ICLI, "Carbazole-based organic dye sensitizers for efficient molecular photovoltaics", *Solar Energy and Materials*, 94, 2010, 655-661
- 3- Cem TOZLU, Sule Erten ELA, Siddik ICLI, Photo-responsive n-channel organic field effect transistor based on naphthalene bis-benzimidazole with divinyltetramethyl disiloxane-bis (benzo- cyclobutene) gate insulator, *Sensors and Actuators A: Physical*, 161, 2010, 46-52
- 4- Cem TOZLU, Sule Erten ELA, Th. Birendra SINGH, N. Serdar SARICIFTCI, Siddik ICLI, Sener OKTIK, "N-channel organic thin film transistor based on naphthalene bis-benzimidazole with polymer dielectric", *Balkan Physics Letter*, 16, 2009, 161010-161015

## **BİLDİRİLER:**

### **Uluslar Arası Kongre ve Sempozyumlarda Sunulan Bildiri ve Posterler**

- 1- Fabrication and characterization of perylene and naphthalene bis benzimidazole for n-type organic field effect transistors, *Condensed Matter Physics Conference of Balkan Countries (CMPC BC2008)*, Muğla University, Muğla, Türkiye, 26-28 Mayıs 2008.
- 2- Ceylan Zafer, Cem TOZLU, Banu AYDIN, Cihan OZSOY, Siddik ICLI, "Spectroskopik Investigation of Photoinduced Charge Separation in Perylenediimide-Conjugated Polymers Bulkheterojunction Organic Solar Cells", *7th International Conference on electroluminescence of molecular materials and related phenomena*, Dresden, Germany, 2-6 Eylül 2008

3- Ceylan Zafer, Burak Gultekin, Cihan Ozsoy, Cem Tozlu, Banu Aydin, Siddik Icli, “Carbazole Based Organic Dye Sensitizers for Efficient Molecular Photovoltaics”, E-MRS 2009, Strasburg, Fransa, 8-12 Haziran 2009

4- Cem TOZLU, Sule Erten ELA, Th. Birendra SINGH, N. Serdar SARICIFTCI, Siddik ICLI, Sener OKTIK, “N-channel organic thin film transistor based on naphthalene bis-benzimidazole with polymer dielectric”, 25. Uluslar arası Türk Fizik Kongresi, Bodrum-Muğla/Türkiye, 25-29 Ağustos 2008,

### **Ulusal Kongre ve Sempozyumlarda Sunulan Bildiri ve Posterler**

1- Çiğdem ŞAHİN, Cem TOZLU, Kasım OCAKOĞLU, Ceylan ZAFER, Canan VARLIKLI, Siddik İÇLİ, “Kırlangıç Kanatlı Bipridil Ligand İçeren Ampifilik Rutenyum Kompleksi Sentezi ve nc-Dssc Uygulaması”, XXI. Ulusal Kimya Kongresi, 23-27 August 2007, Malatya.

2- Cem TOZLU, Sule ERTEN, Th. Birendra SINGH, N. Serdar SARICIFTCI, “Organik Tabanlı İnce Film Transistörler”, Inno-Venture 2007 Proje Pazarı, 13-14 Aralık 2007, İzmir.

3- Cem TOZLU, Sule Erten ELA and Siddik İÇLİ, “Organic Thin Film Phototransistor Based On Naphthalene Bis-Benzimidazole”, Nanotr5, 8-12 Haziran 2009, Eskişehir.

4- Ozlem USLUER, Ali Kemal HAVARE, Cem TOZLU, Şerafettin DEMİÇ, Siddik İÇLİ, “LED based on novel second generation carbazole derivatives as HTM”, Nanotr5, 8-12 Haziran 2009, Eskişehir, TÜRKİYE

5- Ali Kemal HAVARE, Ozlem USLUER, Gamze SAYGILI, Cem TOZLU, Şerafettin DEMİÇ, Siddik İÇLİ, “The performance of OLEDs based on sorbitol doped PEDOT:PSS”, Nanotr5, 8-12 Haziran 2009, Eskişehir.

6- Gamze SAYGILI, Alikemal HAVARE, Cem TOZLU, Şerafettin DEMİÇ, Siddik İÇLİ, “Fabrication and Characterization of Organic Light

Emitting Device Using QD Dopant”, Nanotr5, 8-12 Haziran 2009, Eskişehir.

7- Ozlem USLUER, Cem TOZLU, Ceylan ZAFER, Serafettin DEMIC, Siddik ICLI, “Photovoltaic Application of Dendrimeric Fluorene-Carbazole Derivatives As HTMs” NANOMAT 2008, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, 24-25 Nisan 2008, Ankara.

8- Siddik ICLI, Cem TOZLU, Sule Erten ELA, “Photo-responsive n-channel organic field effect transistor based on naphthalene bis-benzimidazole with divinyltetramethyl disiloxane-bis (benzo-cyclobutene) gate insulator” Nanotr 6, 15-18 Haziran 2010, Izmir.

9- Cem TOZLU, Sule Erten ELA, Siddik ICLI, “Influences of polymer gate dielectrics on the performance of novel arylene bisimides organic thin film transistor”, Nanotr6, 15-18 Haziran 2010, Izmir.