

**SIVI KRİSTAL VE PCBM İÇEREN ORGANİK ALAN ETKİLİ  
TRANSİSTÖR (OFET) ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

**ŞULE ZEYNEP KİP**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
FİZİK ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN  
DOÇ. DR. AHMET DEMİR**

**DÜZCE, 2024**

**T.C.**  
**DÜZCE ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**SIVI KRİSTAL VE PCBM İÇEREN ORGANİK ALAN ETKİLİ  
TRANSİSTÖR (OFET) ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

Şule Zeynep KİP tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Doç. Dr. Ahmet DEMİR

Düzce Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Ahmet DEMİR

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Oğuz KÖYSAL

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Sadık BAĞCI

Sakarya Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 10/07/2024

## BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

10 Temmuz 2024

Şule Zeynep KİP

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında kıymetli bilgi birikimini ve alakasını esirgemeyen, gösterdiği her türlü destek ve yardımlarından dolayı çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Ahmet DEMİR'e sonsuz minnetimi ve saygılarımı sunarım.

Lisansüstü eğitimimin başından itibaren değerli katkılarda bulunan, bilgi ve tecrübelerini paylaşmaktan kaçınmayan ve her zaman desteğini gösteren saygıdeğer hocam Prof. Dr. Oğuz KÖYSAL'a şükranlarımı sunarım.

Tüm yaşamım boyunca her türlü destek ve koşulsuz sevgilerini eksik etmeyen, varlıklarıyla bana güç veren biricik anne, babama ve kardeşlerime de teşekkürü borç bilirim.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP-2021.05.02.1236 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

**10 Temmuz 2024**

**Şule Zeynep KİP**

# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

|                                                           |      |
|-----------------------------------------------------------|------|
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                        | vi   |
| TABLO LİSTESİ .....                                       | vii  |
| KISALTMALAR.....                                          | viii |
| SİMGELER .....                                            | ix   |
| ÖZET .....                                                | x    |
| ABSTRACT .....                                            | xi   |
| 1. GİRİŞ.....                                             | 1    |
| 2. ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLER.....                 | 2    |
| 2.1. OFET ÇEŞİTLERİ.....                                  | 5    |
| 2.2. OFET'LERİN ÇALIŞMA PRENSİBİ .....                    | 6    |
| 2.3. DİELEKTRİK KARAKTERİZASYON .....                     | 7    |
| 2.4. OFET PARAMETRELERİ .....                             | 7    |
| 2.4.1. Mobilité .....                                     | 7    |
| 2.4.2. Eşik Gerilimi.....                                 | 8    |
| 2.4.3. Histeresis .....                                   | 8    |
| 2.4.4. Açma/Kapama (On/Off) Oranı.....                    | 9    |
| 2.5. OFET FABRİKASYONLARINDA KULLANILAN MALZEMELER .....  | 9    |
| 2.5.1. Yarıiletkenler .....                               | 10   |
| 2.5.1.1. p-tipi Yarıiletkenler.....                       | 10   |
| 2.5.1.2. n-tipi yarıiletkenler .....                      | 11   |
| 2.5.2. Yalıtkanlar .....                                  | 12   |
| 3. SIVI KRİSTALLER.....                                   | 14   |
| 3.1. SIVI KRİSTALLERİN SINIFLANDIRILMASI.....             | 15   |
| 3.1.1. Termotropik Sıvı Kristaller .....                  | 15   |
| 3.1.2. Lyotropik Sıvı Kristaller .....                    | 16   |
| 3.2. SIVI KRİSTALLERİN DİELEKTRİK ÖLÇÜMLERİ .....         | 16   |
| 4. DENEYSEL YÖNTEM.....                                   | 18   |
| 4.1. LC-N-OFET CİHAZININ ÜRETİM AŞAMALARI .....           | 18   |
| 5. BULGULAR VE TARTIŞMA .....                             | 21   |
| 5.1. LC-N-OFET CİHAZININ ELEKTRİKSEL ÖLÇÜMLERİ.....       | 21   |
| 5.1.1. Dielektrik Özellikler.....                         | 21   |
| 5.1.2. Organik Alan Etkili Transistörün Özellikleri ..... | 26   |
| 6. SONUÇ .....                                            | 32   |
| 7. KAYNAKLAR .....                                        | 34   |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                             | 37   |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                                                | <u>Sayfa No</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Şekil 2.1. Organik alan etkili transistörün yapısı.....                                                        | 3               |
| Şekil 2.2. İletken, yarıiletken ve yalıtkanlarda bant yapısı.....                                              | 4               |
| Şekil 2.3. OFET çeşitleri.....                                                                                 | 5               |
| Şekil 2.4. OFET’lerde kullanılan başlıca p-tipi organik yarıiletken materyallerin kimyasal yapıları. ....      | 11              |
| Şekil 2.5. OFET’lerde kullanılan başlıca n-tipi organik yarıiletken materyallerin kimyasal yapıları. ....      | 12              |
| Şekil 3.1. Sıvı kristallerin sınıflandırılması. ....                                                           | 15              |
| Şekil 3.2. Termotropik sıvı kristaller. ....                                                                   | 15              |
| Şekil 4.1. LC-n-OFET cihazının üretim aşamaları. ....                                                          | 19              |
| Şekil 4.2. LC-n-OFET cihazının a) Elektriksel çıkış ve transfer eğrisi ölçümleri b) Dielektrik ölçümleri. .... | 19              |
| Şekil 5.1. LC-n-OFET cihazının $C$ - $f$ karakteristiğinin $V_{GS}$ 'ye bağlı değişimi. ....                   | 21              |
| Şekil 5.2. LC-n-OFET cihazının $G/\omega$ - $f$ karakteristiğinin $V_{GS}$ 'ye bağlı değişimi.....             | 22              |
| Şekil 5.3. LC-n-OFET cihazının dielektrik sabitinin karakteristik davranışı. ....                              | 23              |
| Şekil 5.4. LC-n-OFET cihazının sanal dielektrik sabitinin karakteristik davranışı. ....                        | 24              |
| Şekil 5.5. LC-n-OFET cihazının $V_{GS}$ 'ye bağlı Cole-Cole diyagramları. ....                                 | 25              |
| Şekil 5.6. LC-n-OFET cihazının $C_i$ - $f$ karakteristiğinin kanal uzunluğuna bağlı değişimi. ....             | 26              |
| Şekil 5.7. LC-n-OFET cihazının çıkış eğrileri.....                                                             | 27              |
| Şekil 5.8. Kanal uzunluğuna bağlı olarak $I_{DS}$ - $V_{GS}$ eğrileri. ....                                    | 28              |
| Şekil 5.9. Kanal uzunluğuna bağlı olarak $\sqrt{I_{DS}}$ - $V_{GS}$ eğrileri.....                              | 28              |
| Şekil 5.10. Işık şiddetine bağlı $I_{DS}$ - $V_{GS}$ eğrileri.....                                             | 30              |
| Şekil 5.11. Işık yoğunluğuna bağlı $\sqrt{I_{DS}}$ - $V_{GS}$ eğrileri. ....                                   | 30              |

## TABLO LİSTESİ

|                                                                                                        | <b><u>Sayfa No</u></b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Tablo 5.1. Farklı $V_{GS}$ değerleri için LC-n-OFET yapısının gevşeme süresi ve gevşeme frekansı. .... | 25                     |
| Tablo 5.2. Kanal uzunluğunun LC-n-OFET cihazının performans parametrelerine bağlılığı. ....            | 29                     |
| Tablo 5.3. Işık Şiddetinin LC-n-OFET cihazının performans parametrelerine bağlılığı. ....              | 31                     |

## KISALTMALAR

|           |                                                  |
|-----------|--------------------------------------------------|
| FET       | Alan Etkili Transistör                           |
| ITO       | İndiyum Kalay Oksit                              |
| LC        | Sıvı Kristal                                     |
| LC-n-OFET | Sıvı Kristal katkılı n kanal OFET                |
| NOA65     | Norland Optical Adhesive                         |
| OFET      | Organik Alan Etkili Transistör                   |
| P3HT      | Poly(3-hexylthiophene)                           |
| PCBM      | Phenyl-C <sub>61</sub> -Butyricacid-Methyl ester |
| PMMA      | Poly(methyl methacrylate)                        |
| SAM       | Self-Assembled Monolayer                         |



## SİMGELER

|                   |                                      |
|-------------------|--------------------------------------|
| AC                | Alternatif Akım                      |
| C                 | Karbon                               |
| C                 | Kapasitans                           |
| $C_i$             | Etkin Kapasitans                     |
| E                 | Elektrik alan                        |
| $\epsilon$        | Dielektrik sabiti                    |
| $\epsilon'$       | Gerçek dielektrik sabiti             |
| $\epsilon''$      | Kompleks dielektrik sabiti           |
| $\Delta\epsilon'$ | Dielektrik anizotropi                |
| $f$               | Frekans                              |
| $f_R$             | Gevşeme frekansı                     |
| I                 | Akım                                 |
| $I_D$             | Savak elektrotuna uygulanan akım     |
| $I_{DS}$          | Savak-Kaynak akımı                   |
| L                 | Transistörün kanal uzunluğu          |
| $\mu$             | Yük taşıyıcı mobilitesi              |
| $\tau$            | Gevşeme süresi                       |
| V                 | Gerilim, Voltaj                      |
| $V_D$             | Savak elektrotuna uygulanan gerilim  |
| $V_G$             | Kapı elektrotuna uygulanan gerilim   |
| $V_S$             | Kaynak elektrotuna uygulanan gerilim |
| $V_{DS}$          | Savak-Kaynak gerilimi                |
| $V_{GS}$          | Kapı-Kaynak gerilimi                 |
| $V_{Th}$          | Eşik gerilimi                        |
| W                 | Transistörün kanal genişliği         |
| $\omega$          | Açısal frekans                       |
| Z                 | Empedans                             |

# ÖZET

## SIVI KRİSTAL VE PCBM İÇEREN ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖR (OFET) ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Şule Zeynep KİP

Düzce Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi  
Danışman: Doç. Dr. Ahmet DEMİR

Temmuz 2024, 36 sayfa

Transistörler; anahtarlama, yükseltici ve sensör özellikleri ile elektronik cihazların merkezinde yer almaktadır. Ucuz, hafif ve çevreci organik elektronik cihazlar, özellikle de organik alan etkili transistörler (OFET) var olan inorganik tabanlı transistor teknolojilerine alternatif çözümler sunmaktadır. Bu çalışmada, Sıvı Kristal (LC) ile n-tipi yarıiletken olan PCBM (Phenyl-C<sub>61</sub>-Butyricacid-Methyl ester) karıştırılarak oluşturulan aygıt yapısının cihaz performansında iyileştirmeler yapılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda Nematik E7 sıvı kristali ve PCBM yapıları kullanılıp yüksek performanslı n-kanal LC-n-OFET cihazı üretilmiştir. LC-n-OFET cihazının dielektrik ölçümleri yapılarak elektriksel özellikleri ortaya konulmuştur. Bunlara ek olarak LC-n-OFET yapısının kanal aralığı ve ışık değişimine karşı transistör kalitesi incelenmiştir. Üretilen LC-n-OFET cihazının yüksek mobilite, yüksek on/off oranı, düşük eşik gerilimi gibi performans parametreleri açısından literatürdeki örneklerine göre daha üstün olduğu gözlemlenmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Organik alan etkili transistör, Sıvı kristal, n-tipi yarıiletken, PCBM

## ABSTRACT

### FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF THE ORGANIC FIELD EFFECT TRANSISTOR (OFET) CONTAINING LIQUID CRYSTAL AND PCBM

Şule Zeynep KİP

Düzce University

Graduate School, Department of Physics

Master's Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ahmet DEMİR

July 2024, 36 pages

Transistors are at the core of electronic devices with their switching, amplifying, and sensing capabilities. Affordable, lightweight, and environmentally friendly organic electronic devices, especially Organic Field Effect Transistors (OFETs), offer alternative solutions to existing inorganic transistor technologies. In this study, improvements in device performance were aimed by blending Liquid Crystal (LC) and n-type semiconductor PCBM (Phenyl-C<sub>61</sub>-Butyricacid-Methyl ester). Accordingly, a high-performance n-channel LC-n-OFET device was fabricated using Nematic E7 liquid crystal and PCBM structures. Dielectric measurements of the LC-n-OFET device were conducted to reveal its electrical properties and device characteristics. Additionally, the channel length and transistor quality against light induced changes were investigated for the LC-n-OFET structure. The produced LC-n-OFET device exhibited superior performance parameters such as high mobility, high on/off ratio, and low threshold voltage compared to examples in the literature.

**Keywords:** Organic field effect transistor, Liquid crystal, n-type semiconductor, PCBM

# 1. GİRİŞ

Elektronik sistemlerin üretiminde Organik Alan Etkili Transistör'lere (OFET) olan ilgi; üretim maliyetlerinin düşüklüğü ve esnek yapıları sayesinde, her geçen gün artmaktadır. OFET'ler; entegre devreler, radyo frekans tanımlama etiketleri, ince film ekranlar ve sensör uygulamaları gibi pek çok yeni teknoloji alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır.

OFET'lerde n-tipi ve p-tipi organik yarıiletken malzemeler kullanılmaktadır. Çözünebilirlik ve kolay işlenebilirlik açısından daha elverişli olmalarından dolayı, p-tipi organik yarıiletkenler daha sık tercih edilse de cihaz performansları açısından istenen seviyeye hala ulaşamamışlardır. Cihaz performansını iyileştirmek için p-tipi organik yarıiletkenlerde çeşitli malzeme türevleri ve yeni malzemeler sentezlenmesine rağmen yüksek mobilita, yüksek açma/kapama oranı ve iyi stabiliteyi aynı anda sağlamak zordur. Bu nedenle, cihaz performansını artırmak için n-tipi organik yarıiletkenler kullanılmakta ve bu malzemelerde de çeşitli tasarımsal geliştirme çalışmaları yapılmaktadır.

Sıvı kristal (LC) fazlara sahip malzemelerle üretilmiş cihazlar; esneklikleri, geniş alanlı ince film cihazlarındaki etkinlikleri, geniş bir sıcaklık aralığında çalışma yetenekleri, düşük maliyetleri ve kolay işlenebilirlikleri nedeniyle organik ve inorganik malzemelerle üretilmiş yarıiletken cihazlarla karşılaştırıldığında büyük potansiyel değere sahiptir. Hem OFET'ler hem de sıvı kristal ihtiva eden cihazlarda tercih edilen malzemeler, sergiledikleri başarıyla kendilerine kullanım alanı bulsalar da üretim tekniklerinde ve kullanılan malzemelerde iyileştirmelerle performanslarının artırılması için çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmada, E7 Nematik Sıvı Kristal (NLC) ve Phenyl-C<sub>61</sub>-Butyricacid-Methylester (PCBM) yapıları ile yeni bir n-kanallı sıvı kristal katkılı organik alan etkili transistör (LC-n-OFET) üretilmiştir. LC-n-OFET'in performansı, dielektrik özellikler, UV ışığına duyarlılık ve kanal uzunluğuna bağlılık açısından incelenmiştir. Çıkış ve transfer akım-gerilim (I-V) karakteristikleri, farklı kanal uzunlukları için karanlıkta ve UV ışığı altında elektriksel özelliklerin değerlendirilmesi için ölçülmüştür. Ayrıca, LC-n-OFET'in dielektrik özellikleri belirlenmiş ve besleme gerilimi değişimine bağlı olarak kapasitans-frekans karakteristiği ( $C_i-f$ ), eşik gerilimi ( $V_{Th}$ ), alan etkili mobilita ( $\mu_{FET}$ ) ve açma/kapama oranı ( $I_{on/off}$ ) incelenmiştir.

## 2. ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLER

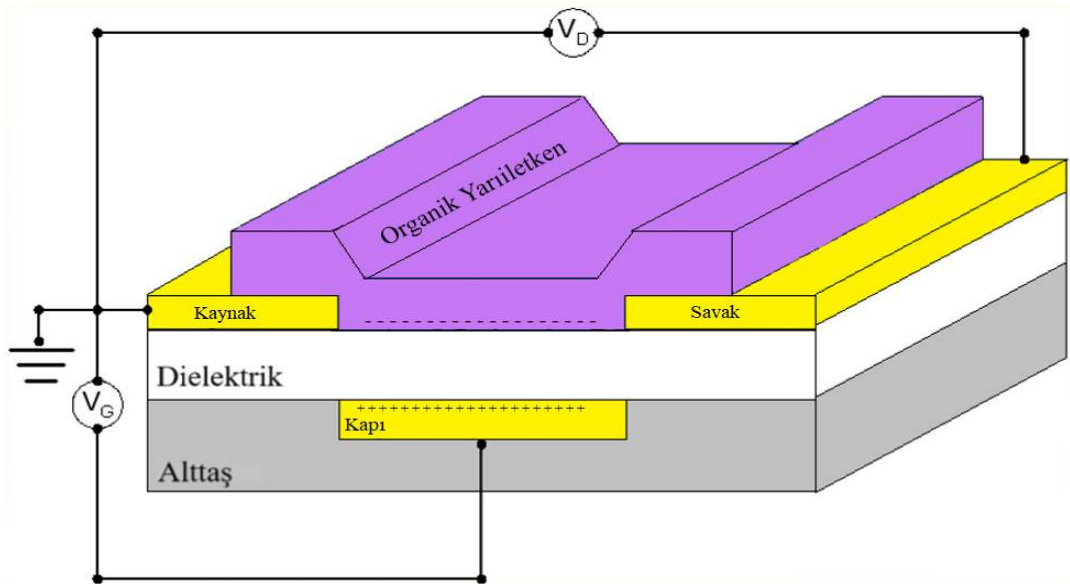
Organik alan etkili transistörler (OFET'ler), kapı, kaynak ve savak elektrotlarından oluşan bir yalıtkan, bir yarıiletken malzemenin bir araya getirildiği devre elemanlarıdır. Akım, gerilim, kapasitans kontrolü gereken devrelerde kullanılır. Geleneksel silikon tabanlı transistörlerin aksine, organik maddeler kullanılarak üretilirler. Bu transistörler, organik malzemelerin esneklikleri ve işlenebilirlikleri gibi avantajlarıyla özellikle esnek elektronik uygulamaları için potansiyel oluştururlar. OFET'ler; polimerler, organik moleküller ya da küçük organik bileşikler gibi organik malzemelerin bir tabakası üzerine inşa edilir. Bu organik malzemelerin moleküler düzeni ve kimyasal yapıları, elektronların taşınması ve kontrol edilmesi için temel oluşturur. OFET'lerin avantajları arasında düşük maliyet, esneklik, hafiflik ve büyük alanlarda üretilme potansiyeli sayılabilir. Bu transistörler, esnek elektronik cihazlar, bükülebilir ekranlar, akıllı giysiler, elektronik kağıt gibi birçok uygulama alanında kullanılabilirler. Üretim süreçleri hala geliştirilmekte olan OFET'ler genellikle üç temel bileşenden oluşur:

1. **Alt Tabaka:** OFET'in alt tabakasıdır ve genellikle cam veya esnek polimer malzemelerden oluşabilir.
2. **Dielektrik Tabaka:** Transistörün kontrol terminalidir. Alt tabakanın üzerine bir Kapı kontağı ile birlikte yerleştirilir ve transistörün kapasitansını kontrol eder. Kapı voltajı, kanalın iletkenliğini değiştirir ve böylece transistörün çıkış akımını kontrol eder.
3. **Yarıiletken Tabaka:** Dielektrik tabaka üzerine, organik yarıiletken tabaka yerleştirilir. Bu tabaka, elektrik akımının kontrol edildiği ve taşındığı yerdir. Organik yarıiletken malzemeler, elektronlarla (n-tipi) veya deliklerle (p-tipi) iletkenlik gösterebilir.

Kaynak ve savak elektrotları, bir elektrot kullanan bir kaynak yöntemi olan ark kaynağında kullanılan temel bileşenlerdir. Kaynak elektrotu, iki metali birleştirmek için kullanılan bir elektrottur. Elektrot, genellikle kaynak arkını oluşturan akımı taşır ve bu akımın kaynağını sağlar. Savak elektrotu, kaynak işlemi sırasında erimiş metal havuzunu stabilize etmek ve kaynağı şekillendirmek için kullanılır. Ark kaynağında, savak elektrotu, kaynak havuzunu korumak ve soğumasını sağlamak için kullanılır. Aynı

zamanda, kaynak işlemi sırasında erimiş metal havuzunun büyüklüğünü kontrol etmeye yardımcı olur.

Bu elektrotlar, kaynak işlemi sırasında elektrik arkının oluşmasına ve metalin erimesine yardımcı olur. Kaynak işleminde kullanılan elektrot türleri, kaynak yapılmak istenen malzemenin tipine, kaynak uygulamasına ve diğer çeşitli faktörlere bağlı olarak değişebilir. Kapı elektrotu üzerindeki yalıtkan tabaka ve polimer yapılı yalıtkan tabaka olarak başlıca 2 türlü yalıtkan tabakadan meydana getirilmekte, yapısına ve tasarımı istenilen özelliklere bağlı olarak tasarlanmaktadır. Kaynak ve savak elektrotları, yarıiletken tabakaya yük enjeksiyonunu sağlamaları açısından genellikle kaliteli metaller ile iletken polimerler tarafından oluşturulur. Organik alan etkili transistör yapısında voltaj, kapı elektrotuna ( $V_G$ ) ve savak elektrotuna ( $V_D$ ) uygulanır. Kaynak elektrotu, genellikle topraklanır ( $V_S=0$ ). Kaynak ile savak arasındaki potansiyel fark; kaynak savak voltajı olarak adlandırılır ( $V_{DS}$ ) [1].

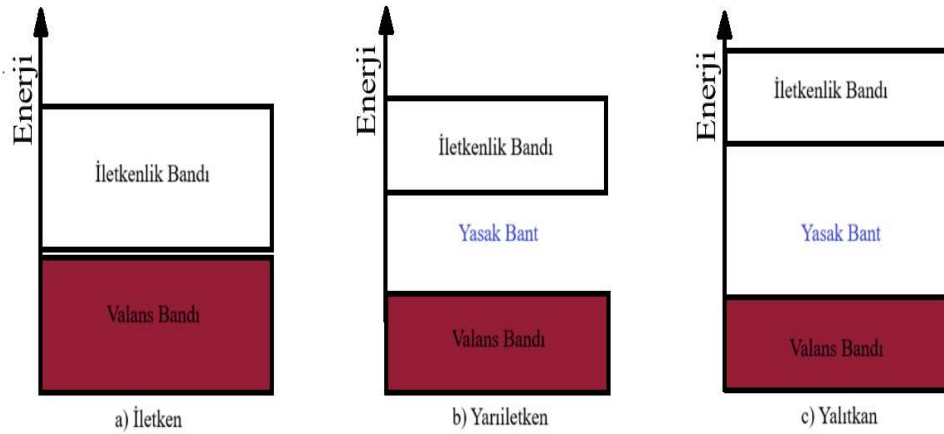


Şekil 2.1. Organik alan etkili transistörün yapısı.

Dielektrik malzeme ile yalıtılmış kapı elektrotu, yalıtkan tabakanın alt kısmında bulunan indiyum kalay oksit (ITO) denilen ince bir iletken tabakadan meydana gelmiştir. Kanal genişliği  $W$ , kaynak ve savak elektrotları arasındaki mesafe ise  $L$  ile ifade edilir. Organik alan etkili transistör yapısına pozitif kapı voltajı uygulandığında, kaynak elektrotundan enjekte edilen yükler kapı elektrotundan daha negatif bir değerde olduğu zaman elektron enjeksiyonu meydana gelmektedir. Negatif kapı voltajı uygulandığında kaynak

elektrotuna enjekte edilen yükler kapı elektrotundan daha pozitif bir değerde olduğunda ise delik (hole) enjeksiyonu oluşmaktadır. Savak ile kaynak arasında uygulanan gerilim ile de bu kanaldan akım geçmesi sağlanır. Kapı voltajını artırdığımızda bu kanalda oluşan deliklerin sayısı yalıtkanın özelliğinden dolayı artar ve akım değeri artar ve yalıtkanla yükler kapı voltajına göre tam olarak ayrıldığında savak akımı doyuma gider. Kapı voltajı arttırıldığında akım daha fazla artar sonra yine doyuma gider ve transistör karakteristiği elde edilmiş olur.

OFET'lerin bant yapısı, transistörün çalışma prensibini anlamak için önemli bir kavramdır. Bant yapısı, elektriksel iletkenlik ve taşıyıcıların (elektronlar ve delikler) davranışını belirleyen enerji seviyeleri arasındaki ilişkiyi gösterir (Şekil 2.2). Valans Bandı; bir malzemenin en dış elektronların yer aldığı en yüksek enerji seviyesidir. Bu bandın üst sınırı, malzemenin atomik yapısına ve kimyasal bileşimine bağlı olarak değişir. Malzemenin en yüksek enerji seviyesini temsil eder ve dolu olduğunda malzeme, elektronları kabul edemez, iletkenlik göstermez. İletim Bandı; elektronların serbestçe hareket edebildiği ve elektriksel iletkenlik sağladığı enerji bandıdır. Yasak Bant (Band Gap) ise; Valans Bandı ile İletim Bandı arasındaki enerji farkıdır. Bu enerji farkı, malzemenin iletkenlik özelliklerini belirler.



Şekil 2.2. İletken, yarıiletken ve yalıtkanlarda bant yapısı.

OFET'lerde kullanılan organik yarıiletkenler genellikle küçük moleküller veya polimerlerden oluşur ve bunların bant yapıları, cihazların performansını etkiler. Örneğin, geniş bir yasak bant genellikle düşük akım geçişini ve daha az iletkenlik sağlar, daha dar

bir yasak bant ise daha yüksek iletkenlik sağlar. Bant yapısının OFET'lerdeki rolü şu şekildedir:

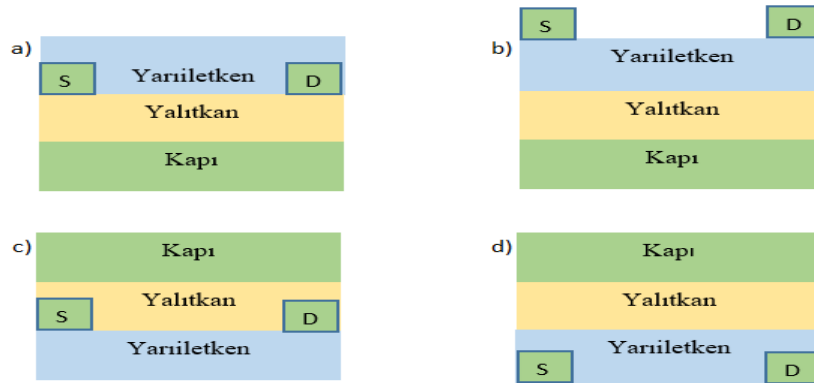
- OFET'in aktif tabakasında, organik yarıiletken malzemenin bant yapısı, kapı elektrotuna uygulanan gerilimle modüle edilir. Kapı elektrotuna uygulanan gerilim, Valans ve İletim bantları arasındaki enerji farkını değiştirir.
- OFET'in kapalı durumunda, Valans Bandı dolu olduğundan, elektronların taşınması engellenir. Bu, OFET'in kapasitesini azaltır.
- OFET'in açık durumunda kapı elektrotuna uygulanan gerilim, Valans ve İletim Bantları arasındaki enerji farkını değiştirir ve İletim Bandının yükselmesine neden olur. Bu, elektronların aktif tabakada serbestçe hareket etmesine ve böylece OFET'in iletken hale gelmesine izin verir.

Bant yapısı, OFET'lerin elektriksel performansını ve işlevselliğini etkiler ve organik yarıiletken malzemenin seçimi ve tasarımı sırasında dikkate alınması gerekir.

## 2.1. OFET ÇEŞİTLERİ

Organik alan ekili transistörler için bilinen başlıca transistör yapıları aşağıda ve Şekil 2.3'te belirtilmiştir.

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



Şekil 2.3. OFET çeşitleri.

Belirtilen yapılardan en çok tercih edileni, alt tabanı kapı elektrotu, üst kısmı kaynak ve savak elektrotları olarak tasarlanan yapılardır. Bu yapının yaygın olarak kullanılmasının nedeni, ince film transistörlerden örnek alınarak yüksek kalitede bir yalıtkan tabaka oluşturulması ve alt kısımda bulunan kapı yalıtkan maddesi sayesinde oluşturulan elektrik alanıyla kontrol edilmesidir. Üst kısım kapı elektrot alt kısım savak ve kaynak elektrotuna sahip OFET yapılarının en önemli avantajı ise, organik yarıiletken maddenin esnek alttaş yüzeyinde oluşturulması ve bu sayede uygun kullanım alanına rahatça entegre edilmesidir [2].

## 2.2. OFET'LERİN ÇALIŞMA PRENSİBİ

Kısaca OFET'lerin çalışma prensibini şu şekilde özetleyebiliriz; n-tipi bir yarıiletken pozitif bir Kapı voltajı uygulandığında dielektrik katmanda negatif yükler birikir ve kutuplanma meydana gelir. Yük ayrımından sonra yarıiletken tabakada Kaynak ve Savak arasında yük birikimi başlar. Yük birikimi maksimum seviyeye ulaştığında doyum meydana gelir ve Kaynak ile Savak elektrotları arasında akım sabit kalır. Buna “Saturasyon” adı verilir.

Cihazın transistör olarak çalışabilmesi için uygulanan voltajlara göre alınan akım modülasyonu; çıkış ve transfer karakteristiği olmak üzere iki şekilde ortaya çıkmaktadır. Çıkış karakteristiğinde lineer ve doyum bölgesi olmak üzere iki bölge bulunmaktadır. Lineer bölgede uygulanan savak-kaynak gerilimine ( $V_{DS}$ ) bağlı olarak savak-kaynak akımı ( $I_{DS}$ ) lineer olarak artmaktadır. Sonrasında belli bir  $V_{DS}$  gerilimine ulaşıldığında transistörün doyuma ulaştığı ve  $I_{DS}$  akımının daha fazla artmadığı görülmektedir. Bu bölge doyum bölgesi olarak tanımlanır. Bunun yanında taranan  $V_{DS}$  gerilimi için sabitlenmiş kapı-savak gerilimi ( $V_{GS}$ ) arttıkça yarıiletken aktif kanalda daha fazla yük taşıyıcısı ortama enjekte olduğundan  $I_{DS}$  akım seviyesinin de arttığı görülmektedir. Bu karakteristikte belli  $V_{DS}$  değerleri için  $V_{GS}$  gerilimi belli bir aralıkta taranmakta ve sonuçta  $I_{DS}$  akımı elde edilmektedir. Karakteristikte üç bölge bulunmaktadır. Birincisi eşik altı bölgesidir ancak düşük  $V_{GS}$  değerleri için geçerlidir. Bu bölgede  $V_{Th}$  geriliminin daha altında gerilim değerleri için akımın yükselişi görülmektedir. Gerilime karşılık akım yükselişi bu bölgede yüksektir. İkincisi doyum bölgesidir. Bu bölgede  $V_{GS}$  gerilimine karşılık akım yükselişi yavaşlamıştır ve akım neredeyse sabitlenmiştir. Üçüncü bölge ise lineer bölgedir. Bu bölgede akım lineer bir şekilde yükselir. Fakat akım artışı eşik altı bölgesine göre oldukça düşüktür. Burada özellikle  $V_{Th}$  geriliminden bahsetmek gerekir.

$V_{Th}$  gerilimi belli bir  $V_{GS}$  değerinden sonra akımın hızlı yükselmeye başladığı gerilimdir. Transistörün açık veya kapalı durumları arasındaki geçiş noktasını belirler. Eşik gerilimi, OFET'in kapı elektrotuna uygulanan gerilim düzeyini ifade eder ve OFET'in taşıyıcıların (genellikle elektronlar veya delikler) kanal boyunca serbestçe hareket edebilmesi için gereken minimum gerilimi belirtir.

## 2.3. DİELEKTRİK KARAKTERİZASYON

Dielektrik spektroskopisi, farklı moleküler hareketler ve gevşeme süreci hakkında bilgi elde etmek için önemlidir. Dielektrik karakterizasyon,  $10^{-5}$  Hz ile  $10^{11}$  Hz arasında geniş frekans aralığına sahiptir. Dielektrik bir malzemeye alan uygulandığında polarizasyon oluşturulabilen birkaç farklı mekanizma vardır. Bunlar; elektrik polarizasyonu, atomik polarizasyon ve dipol polarizasyonudur [3]. Deneysel sonuçların yorumlanması için iki ek indüklenmiş kutuplanma vardır. Bunlardan ilki, polimer elektrot arayüzünde iyonların birikmesinden kaynaklanan elektrot polarizasyonu, diğeri ise heterojen sistemlerdeki bileşenler arasında arayüzdeki yüklerden kaynaklanmakta olan arayüzey polarizasyonudur. Dielektrik ölçümler, elektrot arayüzüne gerilim uygulanmasıyla elde edilen akımın genlik ve faz kaymasının ölçülmesiyle yapılabilir. Empedans ( $Z$ ) aşağıdaki eşitlikteki gibi karmaşık sayı olarak ifade edilir.

$$Z = Z' - iZ'' \quad (2.1)$$

Burada empedansın gerçek ve sanal bileşenleri görülmektedir. Karmaşık dielektrik sabiti, dielektrik spektroskopiden elde edilebilir.

## 2.4. OFET PARAMETRELERİ

### 2.4.1. Mobilite

Mobilite, bir malzemedeki taşıyıcı hızı ile uygulanan elektrik alan arasındaki ilişkidir  $\mu$  ile ifade edilir ve birimi  $cm^2/(Vs)$ 'dir. Mikroskobik olarak elektrik alan tarafından uygulanan kuvvet nedeniyle taşıyıcılar hızlanır ve periyodik olarak dağılır. Böylece elde edilen momentumla çok sayıda taşıyıcı meydana gelir. Hız, belirli bir elektrik alanı için sabit görünür ve alana doğrusal olarak bağlıdır. Yüksek mobilite değerleri, malzemenin daha iyi iletkenlik özelliklerine sahip olduğunu gösterir. OFET'ler gibi organik elektronik cihazlar için, organik yarıiletkenlerin mobilitesi önemlidir çünkü bu, cihazların

performansını ve işlevselliğini belirler. Yüksek mobilité, OFET'lerin daha hızlı anahtarlama hızlarına, daha düşük çalışma gerilimlerine ve daha iyi genel elektronik performansa sahip olmasını sağlar. Bu nedenle, organik yarıiletkenlerin mobilitésini artırmak, organik elektronik cihazların geliştirilmesinde önemli bir hedeftir. Mobilité aşağıdaki eşitlikle tanımlanır:

$$\mu = \frac{2L I_{DS}}{WC_i (V_{GS} - V_{Th})^2} \quad (2.2)$$

Burada, L kanal uzunluğu,  $I_D$  savak elektrotuna uygulanan akım, W kanal genişliği,  $C_i$  etkin kapasitans,  $V_{GS}$  kapı-kaynak voltajını,  $V_{Th}$  ise eşik voltajını ifade etmektedir.

#### 2.4.2. Eşik Gerilimi

Eşik gerilimi  $V_{Th}$ , devrelerin doğru çalışmasını sağlamak için kontrol edilmesi gereken önemli bir parametredir. OFET'lerde eşik gerilimi terimi, transistörün anahtarlama işlevini başlatmak veya durdurmak için gerekli olan minimum voltajı ifade eder. OFET'lerde yük taşıyıcılarının birikmeye başladığı anda, akımın akmaya başladığı kapı gerilimini belirlemek için kullanılır. Eşik gerilimi belirlenirken  $\sqrt{I_{DS}} - V_{GS}$  eğrisinin doğrusal kısmının  $V_{GS}$  eksenine kesişme noktasına bakılır.

Eşik gerilimi çeşitli etkenlerden kaynaklanabilir ve güçlü bir şekilde kullanılan yarıiletken ve dielektriklere bağlıdır. Yapıdaki dipoller, safsızlıklar, arayüzey halleri ve özellikle yük tuzakları eşik gerilimini artırır. Kapı elektrotunun kapasitansı artırılarak azaltılabilir ve böylece uygulanan daha düşük gerilimlerde daha fazla yük indüklenir. Eşik gerilimi verilen aygıt için gerekli bir sabit değildir. Organik transistörler uzun zaman çalıştırıldığında  $V_{Th}$  artmaya meyillidir. Bu davranış, devrelerde organik transistörlerin uygulanabilirliğinde önemli etkiye sahiptir ve bu konuda yoğun araştırma yapılmaktadır.

#### 2.4.3. Histeresis

OFET'lerdeki histeresis, kapı voltajı ile çıkış akımı arasındaki iletişimde gecikme veya belirsizlik anlamına gelir. Bu, OFET'in açılış ve kapanış süreçlerindeki gecikme veya farklılıkları ifade eder. Histeresis, genellikle kapı voltajının yavaşça değiştirilmesi sırasında görülür. Histeresisin varlığı, OFET'in kapı elektrotuna uygulanan gerilimi değiştirirken transistörün çıkış karakteristiğindeki belirsizliği ve tekrarlanabilirliği

etkiler. Özellikle yüksek frekanslı anahtarlama ve hassas sensör uygulamalarında istenmeyen bir özelliktir. Histeresis, OFET'in geçiş özelliklerini etkileyen birkaç faktörden kaynaklanabilir:

1. Hapsolma Etkisi: Yükleme veya deşarj süreçlerinde, yüklerin OFET'in aktif tabakasında hapsolması nedeniyle geçici yüklerin birikmesi ve boşalması.
2. Arayüzey Etkisi: OFET'in elektrotları ve aktif tabakası arasındaki arayüzeydeki yüzey etkileşimlerinden kaynaklanan yük geçişleri.
3. Katman Geçişleri: OFET'in farklı katmanlarında yer alan farklı malzemeler arasındaki geçişlerden kaynaklanan yük taşıma süreçleri.

İyi bir OFET tasarımı ve üretimi, histeresisi minimize ederek tekrarlanabilir ve istikrarlı bir çalışma sağlamaya yardımcı olabilir.

#### **2.4.4. Açma/Kapama (On/Off) Oranı**

Açık durumdaki savak akımının, belirli bir kapı gerilimindeki savak akımına oranı; Açma/Kapama oranı olarak adlandırılır. ( $I_{on}/I_{off}$ ) transistörün anahtarlama davranışı (açma/kapama değişimi) için bu değer mümkün olduğunca büyük olmalıdır. Kapalı (off) akımın büyüklüğü kapı elektrotundaki yük sızıntısıyla alttaş arayüzeyindeki iletim yollarıyla ve yarıiletkenin hacimsel iletkenliğiyle belirlenir. Yüksek bir on/off oranı, OFET'in daha iyi bir performansa ve daha iyi bir elektronik işlevselliğe sahip olduğunu gösterir. Bu, OFET'in daha hassas sensörlerde, daha güvenilir anahtarlama uygulamalarında ve daha istikrarlı elektronik devrelerde kullanılmasını sağlar. OFET'in tasarımı, üretimi ve optimize edilmesi sırasında on/off oranının artırılması önemli bir hedeftir.

### **2.5. OFET FABRİKASYONLARINDA KULLANILAN MALZEMELER**

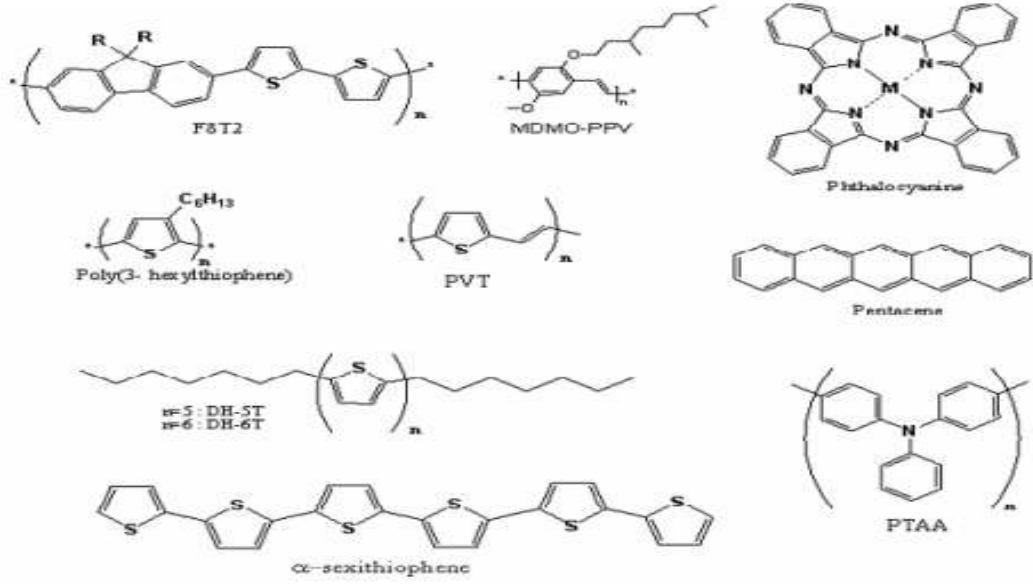
Organik alan etkili transistörler; kimyasal sensörler, esnek ekran, fotoğraf sensörleri gibi esnek yüzeyler için büyük bir potansiyel sağlayan geniş alan elektroniği olarak kullanılma potansiyeli sunar. Bu tür malzemelerin çözüm işlenebilirliği düşük maliyetlidir, yüksek hacimli üretime sahiptir. Bu malzemeleri üretebilmek için yarıiletkenler, iletkenler ve yalıtkanlar gibi farklı malzemeler gereklidir [4].

### 2.5.1. Yarıiletkenler

Yarıiletkenler; elektrik akımına karşı, ne iyi bir iletken ne de iyi bir yalıtıcıdır, bu da demektir ki son yörüngelerinde elektron alıcılığı veya vericiliği iletkenlerden fazla, yalıtıcıdan daha azdır. Elektronik endüstrisinin temelini oluşturan yarıiletken maddelere örnek olarak; Silisyum (Si), Germanyum (Ge) ve Karbon (C) elementleri verilebilir. Yarıiletkenlerin Valans Bandındaki boşlukların ve İletim Bandındaki serbest elektronların sayısı sınırlıdır. Saf Silisyum veya Germanyum' un mutlaka serbest elektron veya boşluk sayısı artırılarak iletkenliği ayarlanmalıdır. İletkenliği ayarlanabilen Silisyum veya Germanyum, elektronik devre elemanlarının yapımında kullanılır. Germanyum veya Silisyumun iletkenliği ise ancak saf malzemeye katkı maddesi eklenmesi ile sağlanır. Farklı yük taşıyıcı özelliği olarak, organik yarıiletken materyaller p-tipi ya da n-tipi taşıyıcı özelliğine sahiptir. p-tipi yarıiletken yapılarında çoğunluk taşıyıcıları boşluklar, n-tipi yarıiletken yapılarında çoğunluk taşıyıcıları elektronlar olarak tanımlanır.

#### 2.5.1.1. p-tipi Yarıiletkenler

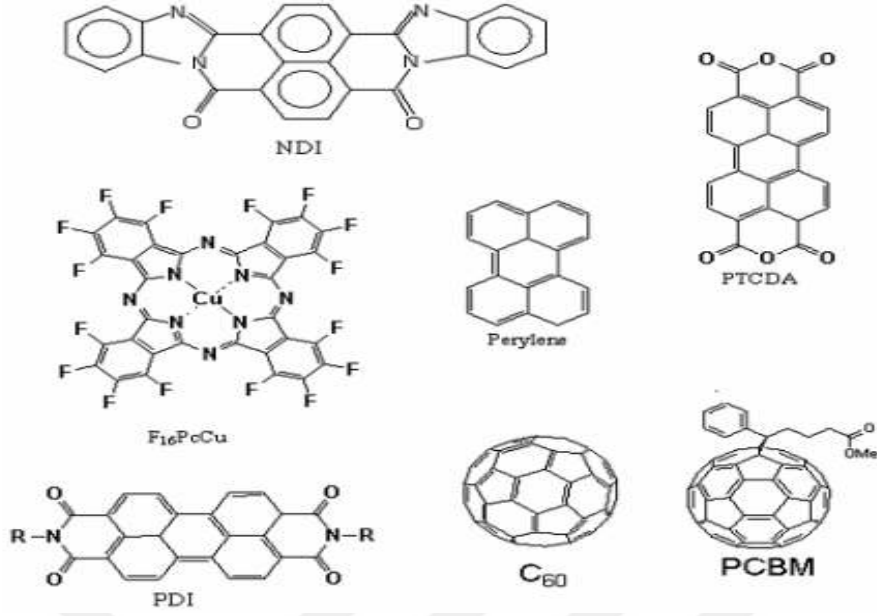
Atom numarası  $Z$  olan yarıiletkene  $Z-1$  atom numarasına sahip katkılandırıcı eklendiğinde, bağlardan birinde bir elektron eksikliği oluşur (hole) ve komşu atomdan bir elektron alır. Bu yöntemle elde edilen yeni malzemeye p-tipi yarıiletken malzeme denir. Organik yarıiletken materyaller içerisinde şimdiye kadar daha çok p-tipi olanların üzerine araştırmalar yapılmıştır. Bunun nedeni, organik alan etkili transistörlerde kullanılan p-tipi organik yarıiletken malzemelerin havaya karşı daha kararlı ve n-tipi organik yarıiletkenlere nazaran daha yüksek bir mobilite değerlerine sahip olmalarıdır.



Şekil 2.4. OFET’lerde kullanılan başlıca p-tipi organik yarıiletken materyallerin kimyasal yapıları.

#### 2.5.1.2. n-tipi yarıiletkenler

Atom numarası  $Z$  olan bir yarıiletkene  $Z+1$  atom numarasına sahip katkılandırıcı eklendiğinde kabuk elektronlarından sadece bir tanesi zayıf bağlı olduğundan termal uyarma ile İletim Bandına geçer, malzeme elektron vericisi olarak görev yapar böylece elektronlar hareketli yük taşıyıcıları gibi davranır ve n-tipi yarıiletken olarak adlandırılır. Birçok n-tipi organik yarıiletken materyaller, yapılarında bulunan oksijen ve su ile reaksiyona giren organik anyonlar ve birtakım karbanyonlar nedeniyle havaya hassastırlar [5]. Ayrıca n-tipi organik yarıiletken materyaller düşük alan etkili mobilite değerine sahiptir. Fakat n-tipi organik yarıiletkenler organik elektronikte ihtiyaç duyulan bir alana sahiptir. Organik elektronik içerisindeki bütünleyici devrelerde ve birçok elektronik devre uygulamalarında ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 2.5. OFET’lerde kullanılan başlıca n-tipi organik yarıiletken materyallerin kimyasal yapıları.

### 2.5.2. Yalıtkanlar

Elektrik akımını taşıyabilecekleri serbest elektronları bulunmayan, bir elektrik alanında kutuplaşma özelliği taşıyan, elektrik iletkenliği çok zayıf veya sıfır olan maddelere yalıtkan denilmektedir. Dielektrik malzemeler, yalıtkanlardan farklı olarak; bir elektrik alanına yerleştirildiklerinde polarize edilebilen bir tür elektriksel yalıtım malzemesidir. Bununla birlikte, iletkenlerden farklı olarak, dielektrikte bulunan elektrik yükü akamaz, ancak denge konumundan sadece hafifçe kayarak dielektrik polarizasyonun oluşmasına neden olur. Geçmiş yıllarda organik elektronikte dielektrikler, kapı yalıtkanı olarak kullanılmıştır. Bu malzemeler; inorganik dielektrikler, organik dielektrikler, SAM ve çok-komponentli dielektrikler olmak üzere sınıflandırılabilir. Alan etkili transistörlerdeki yalıtkan malzeme; yüksek dielektrik katsayısına sahip olmalı, istenmeyen tuzak etkisinden dolayı minimum safsızlık içermeli, yüksek sıcaklıklarda termal kararlılık sağlamalı, cam ve plastik yüzeylerde düzgün bir film yapısı oluşturmalı ve organik yalıtkan özelliği gösteriyor ise uygun kimyasal çözücülerde iyi çözülebilmelidir.

Organik elektronik teknolojilerin uygulamalarında, çözelti yöntemi uygulanarak elde edilen kapı yalıtkan tabaka oluşumu, döndürerek kaplama (spin coating), döküm tekniği (casting) ve baskı tekniği (printing) gibi basit tekniklerle oluşturulan film yapılarının çok iyi bir yalıtkan özelliği göstermesinden dolayı tercih edilmektedir. Ayrıca bu tip polimer

yapılar monomerleşme tasarımlarına ve polimerleşme reaksiyon koşullarına çok iyi uyum sağlayabilmektedirler. Birçok organik transistör tasarımlarında bu tip çözelti yöntemi ile oluşturulan polimer yalıtkan yapılar, kolay çözülebilir özellikte olmaları ve uygun dielektrik özelliklerinden dolayı istenilen yalıtkan materyal olmaktadır [7].

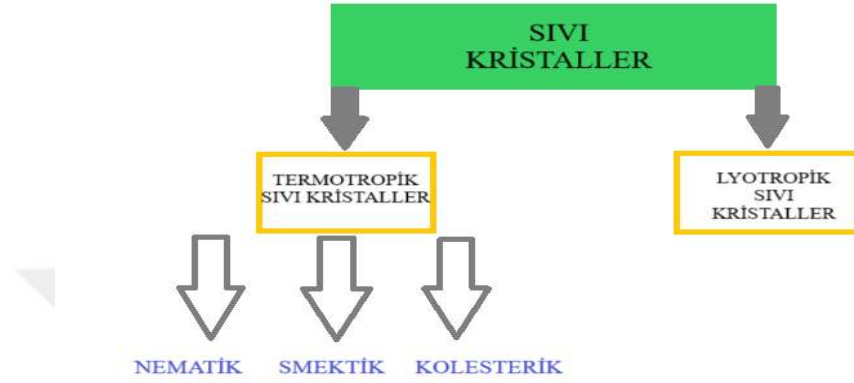
### 3. SIVI KRİSTALLER

Sıvı kristaller; kendilerine özgü yapılara sahip moleküllerin düzgün bir geometri oluşturacak şekilde bir araya gelmesiyle oluşan, katı ve sıvı hal özelliklerinin birleştiği özel yapılardır. Bu düzgün sıralanma; mekanik, elektrofiziksel, manyetik ve elektriksel anizotropilerinde çeşitliliğe sebep olmaktadır. Sıvı kristal özelliği gösteren malzemeler mezoform sistemler veya anizotropik sıvılar olarak adlandırılır. Sıvı kristallik halinde düzen azalmakta, yönelim düzeni artmaktadır.

Sıvı kristallerde moleküller arası kuvvetler zayıf olduğundan dış etkilere karşı yüksek hassasiyet gösterirler. Bu özelliklerinden yararlanılarak sıcaklık, basınç, elektrik ve manyetik alan gibi dış etkileri izlemek için çeşitli sensör uygulamalarında kullanılırlar. Sıvı kristallere uygulanan elektrik alan ile moleküllerin yeniden düzenlenmesi sağlanmakta ve ortamın anizotropisini değiştirmek mümkün olabilmektedir. Moleküler düzende meydana gelen bu değişimler gösterge amaçlı çeşitli cihazların gelişimine neden olmuştur. Günümüzde sıvı kristal gösterge cihazları (LCD'ler), teknolojinin birçok alanında kendine uygulama sahası bulmuştur. Sıvı kristallerin elektro-optik, manyeto-optik özellikleri üzerinde yoğunlaşan çalışmalar, hızlı anahtarlama, yüksek çözünürlüklü renkli görüntü cihazlarının yapımı için önemini daha da arttırmıştır. Sıvı kristal ekranların düşük güç tüketimi gerektirmeleri, küçük boyutları ve karmaşık devre elemanları ile uyumlu çalışabilmeleri teknolojik uygulamalardaki yerini daha da sağlamlaştırmıştır. LC fazında üretilen cihazlar, organik veya inorganik malzemelere dayalı yarıiletken cihazlara kıyasla esneklikleri, büyük alanlı ince film cihazlarda etkinlikleri, geniş sıcaklık aralığında çalışma yetenekleri, düşük maliyetleri ve işleme kolaylıkları nedeniyle büyük potansiyel değere sahiptir. OFET'lerde tercih edilen malzemelerin ve sıvı kristal cihazların başarısı nedeniyle kullanılmalarına rağmen, üretim tekniklerinin ve kullanılan malzemelerin iyileştirilmesi yoluyla performanslarının artırılmasına yönelik çalışmalar devam etmektedir [8]. OFET'lerle ilgili literatüre göre, LC molekülleri içeren cihazlar yapay dokunmatik sensör olarak kullanılmıştır. OFET yapısındaki LC malzemeler, mobilitayı artırır [9]. Öte yandan, geliştirilmiş tepki süreleri nedeniyle, ultra hassas sensör çalışmalarında da LC'ler kullanılmaktadır.

### 3.1. SIVI KRİSTALLERİN SINIFLANDIRILMASI

Sıvı kristal yapılar genellikle çubuk veya disk şeklindeki moleküllerin arasındaki zayıf moleküler kuvvetlerin etkisiyle kendi kendilerine uzun mesafe düzeninde olma eğilimindedirler. Yapılarına göre termotropik sıvı kristaller ve liyotropik sıvı kristaller olarak ikiye ayrılır.

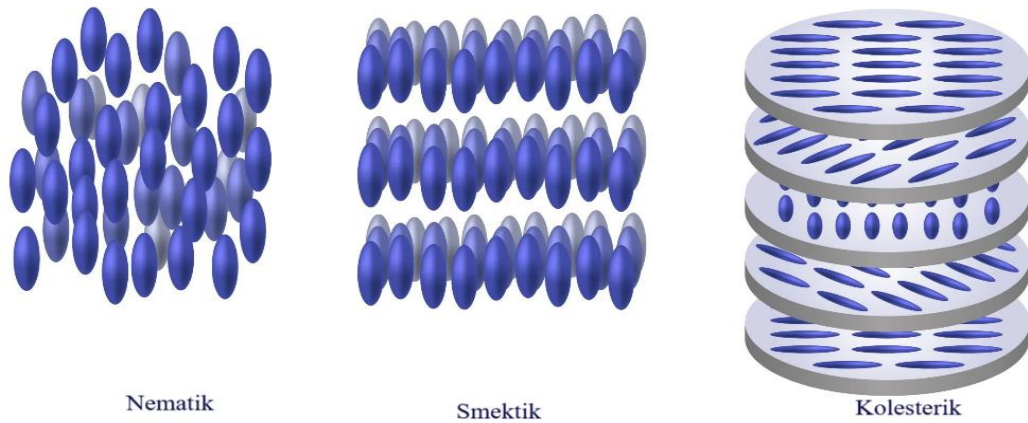


Şekil 3.1. Sıvı kristallerin sınıflandırılması.

#### 3.1.1. Termotropik Sıvı Kristaller

Isıtma işlemi uygulandığında sıvı kristal yapı, izotropik sıvıya geçişte tek basamaklı bir geçiş yerine birkaç geçişten oluşuyor ve sıcaklıkla değişim gösteriyorsa bu kristallere, termotropik sıvı kristaller denir [10]. Bu kristaller belirli bir sıcaklık aralığında oluşurlar ve bu sıcaklığın üstünde izotropik, altındaki sıcaklıklarda katı kristal halde bulunurlar.

Termotropik sıvı kristaller üzerlerine uygulanan sıcaklığa bağlı olarak üç sınıfa ayrılırlar. Bunlar; nematik, smektik ve kolesterik sıvı kristallerdir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Termotropik sıvı kristaller.

Nematik sıvı kristaller, molekülleri herhangi konumsal düzene sahip olmayan fakat yönlendirici yönünde yönelme olan materyallerdir. Hizalanma sadece bir yönde olduğu için, sıvı kristallerin en düşük düzenli fazı olarak kabul edilir. Smektik sıvı kristallerde moleküller; katmanlar içinde belirli aralıklarla fakat aynı doğrultu boyunca yönelim düzeni gösteren çubuksu veya disk şeklindeki bir yapıya sahiptir. Katmanlar arasında hareket edemeyen, yalnızca kendi katmanları arasında hareket edebilen Smektik sıvı kristaller, yönelimlerine bağlı olarak Smektik A, Smektik B ve Smektik C olarak sınıflandırılabilir [11]. Kolesterik sıvı kristal fazı ise genellikle biri, diğeri ile küçük bir açı oluşturacak şekilde moleküllerin dizilmesine neden olan moleküller arası kuvvetler oluşturan, kiral merkeze sahip nematik mezogenik moleküllerden oluşmuş sıvı kristal fazıdır [12].

### **3.1.2. Lyotropik Sıvı Kristaller**

Lyotropik sıvı kristaller, belli konsantrasyonlarda bir maddenin uygun çözücülerde çözünmesiyle oluşan yapılardır. Bu tür maddeler için sıvı kristalin dayanıklılığını, sıcaklıktan daha çok konsantrasyonu belirler. Lyotropik sıvı kristaller iki veya daha çok bileşenlerden oluşur. Genellikle bileşenlerden biri amfilik moleküller (suyla güçlü bir şekilde etkileşen hidrofilik ve suyla etkileşmeyen hidrofobik kısma sahip moleküller) ve diğeri ise sudur [13].

Lyotropik sıvı kristallerin meydana getirdiği fazda sıcaklık yerine bir araya getirilen organik bileşiklerin çeşitli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen yeni oluşum söz konusudur. Bu noktada sıcaklık değişik bileşiklerin konsantrasyonları önemlidir.

Lyotropik fazdaki kristallerin günümüzde en fazla dikkat çeken uygulama alanları; deterjansız yapılar, gıda sanayi, petrol çıkarma ve tıp alanlarıdır.

## **3.2. SIVI KRİSTALLERİN DİELEKTRİK ÖLÇÜMLERİ**

Sıvı kristaller, biraz düşük optik alanlar altında aktive olan hassasiyetlerinden dolayı doğrusal olmayan optik malzemelerdir. Ayrıca uygulanan elektrik alana karşı çok hassastırlar, yönlendirici eksenleri yeniden yönlendirilecektir. Kırılma indisinin değişmesine neden olan bu etkiler ve çeşitli ilginç özellikleri şimdiye kadar kapsamlı bir şekilde incelenmiştir [14]. LC moleküllerinin uygulanan alanlar nedeniyle moleküler oryantasyonu, sistemin elektro-optik davranışını belirler ve dış etkiler moleküler etkileşimlerle moleküllerin yeniden yönlendirilmesine neden olabilir. Elde edilen dielektrik

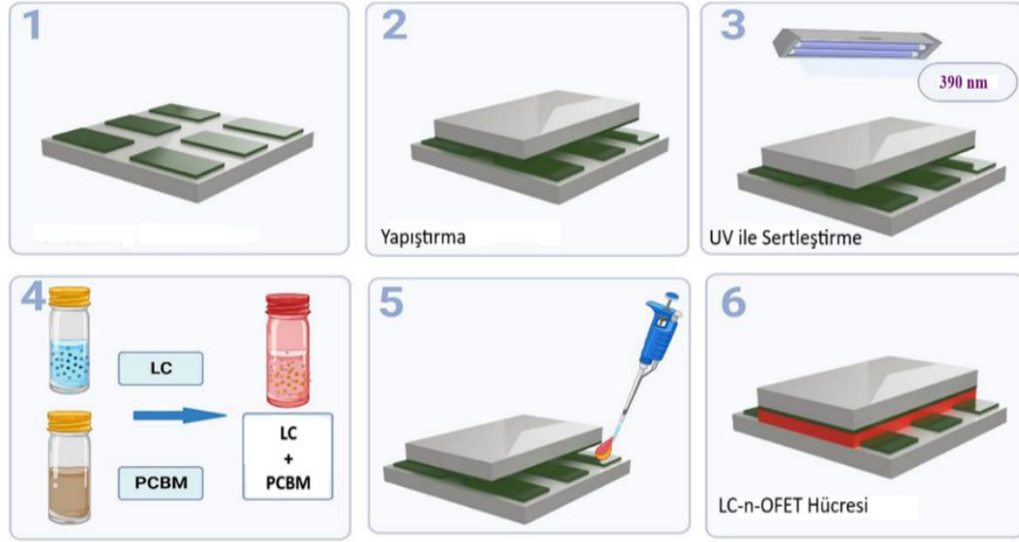
davranışları nedeniyle iki yapı tipi vardır. Birincisi pozitif dielektrik anizotropi (p-tipi) olarak adlandırılır ve direktör eksenini boyunca dielektrik sabiti, direktöre dik eksenlerdekenden daha büyüktür. Dielektrik anizotropi ( $\Delta\epsilon'$ ), bu durumda sıfırdan büyüktür. Diğer tip negatif dielektrik anizotropi (n-tipi) olarak adlandırılır ve  $\Delta\epsilon'$  sıfırdan küçüktür. Spot frekanslarına göre  $\Delta\epsilon'$ 'nin değişimi, LC yöneliminin düşük frekanslarda p-tipi özelliği olduğunu ve frekans arttıkça dielektrik anizotropi karakterinin n-tipine kaydığını ortaya koymaktadır. Dielektrik gevşemenin farklı frekanslarda ölçülmesi, polar grupların dinamikleri ve moleküler hareket hakkında bilgi verir [15].



## 4. DENEYSEL YÖNTEM

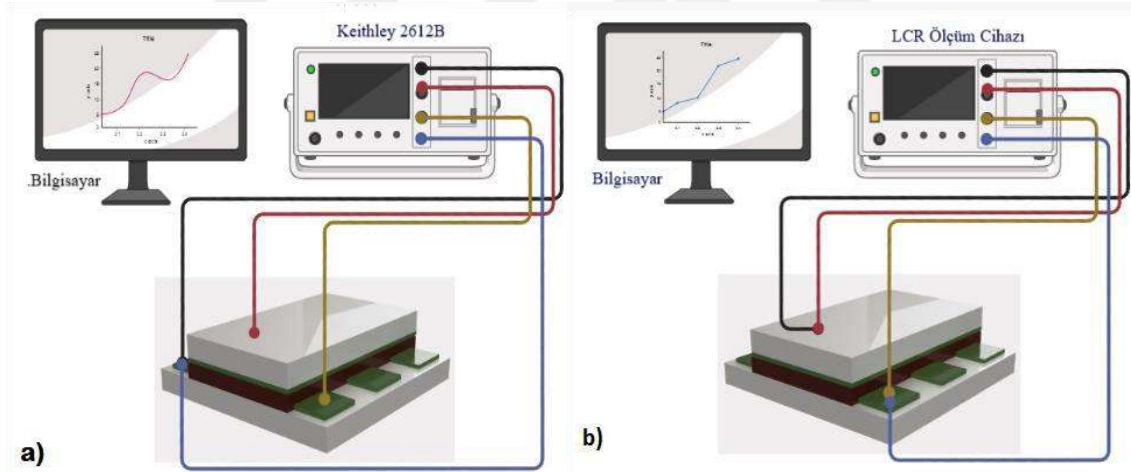
### 4.1. LC-n-OFET CİHAZININ ÜRETİM AŞAMALARI

Bu çalışmada LC-n-OFET üretimi için; n-tipi PCBM yarıiletkeni ve E7 Nematik Sıvı Kristal karışımı, Sigma-Aldrich Chemical Company'den satın alınmıştır. Nematik LC karışımı E7; 4-siyano-4'-n-pentil-bifenil (5CB), 4-siyano-4'-n-heptilbifenil (7CB), 4-siyano-4'-n-oktiloksi-bifenil (8OCB) ve 4-siyano-4''-n-pentil-p-terfenil (5CT) içerir. E7, geniş bir nematik aralığa sahiptir ( $-10^{\circ}\text{C}$ - $59^{\circ}\text{C}$ ), bu da çeşitli LC cihaz uygulamaları için tercih edilmesini sağlar. Ayrıca, E7, düşük frekansta büyük bir pozitif dielektrik anizotropisine ( $\Delta\epsilon' \sim 13.8$ ) sahiptir. Boş bir OFET hücresinin üretimi için ticari olarak temin edilen desenli ve desensiz ITO alttaşları kullanılmıştır. Kimyasal maddelerle temizlenip hazır hale getirilen desenli ve desensiz ITO'ların iletken yüzeyleri, Norland Products'ten temin edilen Norland Optical Adhesive (NOA65) isimli yapıştırıcı ile birbirine yapıştırılmasıyla boş bir OFET hücresi elde edilmiş; NOA65 yapıştırıcısı, yaklaşık 10  $\mu\text{m}$  poliimid filmi bir ayraç olarak kullanılarak, 390 nm dalga boyu UV ışığı altında 100  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 'lik bir yoğunlukta 10 dakika boyunca sertleştirilmiştir. Yarıiletken olarak kullanılan n-tipi PCBM malzemesi 1,2 diklorobenzen içinde 20  $\text{mg}/\text{ml}$  oranında, 30 dakika boyunca  $60^{\circ}\text{C}$ 'de titreştirilerek çözülmüştür. PCBM çözeltisi ve E7 sıvı kristali, hacimce bire bir oranda eklenerek birbirleriyle tamamen karıştırılmak üzere yaklaşık 30 dakika boyunca ultrasonik bir banyoda titreştirilmiş, elde edilen karışım; 10 dakika boyunca  $120^{\circ}\text{C}$ 'de tutulmuştur. Karışım, boş OFET hücresine  $120^{\circ}\text{C}$ 'de kapiler etki yoluyla enjekte edilmiş, boş OFET hücresi doldurularak yeni bir LC-n-OFET cihazı elde edilmiştir. Üretim aşamaları Şekil 4.1'de görsel olarak verilmiştir.



Şekil 4.1. LC-n-OFET cihazının üretim aşamaları.

LC-n-OFET cihazının elektriksel ölçümleri, bir Keithley 2612 SMU cihazı, bir GPIB arayüzü ve bir bilgisayar kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.2 (a)).



Şekil 4.2. LC-n-OFET cihazının a) Elektriksel çıkış ve transfer eğrisi ölçümleri  
b) Dielektrik ölçümleri.

Karanlıkta ve farklı kanal uzunlukları için UV aydınlatması altında çeşitli çıkış akım-gerilim ( $I_{DS}$ - $V_{DS}$ ) karakterizasyonlarına olanak sağlayan -1 V ile 5 V ( $V_{GS}$ -Step) gerilimleri ve 0 V-5 V ( $V_{DS}$ -Sweep) gerilimleri kullanılmıştır. Transfer eğrileri ( $I_{DS}$ - $V_{GS}$ ),  $V_{DS}$  voltajını 5 V'da sabit tutarak -2 V'den 5 V'e kadar  $V_{DS}$  taraması yapılarak belirlenmiştir. Transfer karakteristikleri ayrıca, 0-100 mW/cm<sup>2</sup> UV yoğunlukları ve 50-200  $\mu$ m kanal uzunlukları ile 30 mm genişlikte ölçülmüştür. Son olarak, LC-n-OFET'in kaynak-kapı bağlantıları arasına AC elektrik alanı uygulayarak tüm dielektrik ölçümleri

gerçekleştirilmiştir. Kapasitans ve iletkenlik ölçümleri için GW-Instek 8105 LCR ölçüm cihazı kullanılmış olup dielektrik ölçüm düzeneği ve LC-n-OFET ile LCR ölçüm cihazı arasındaki bağlantı Şekil 4.2 (b)'de gösterilmiştir.



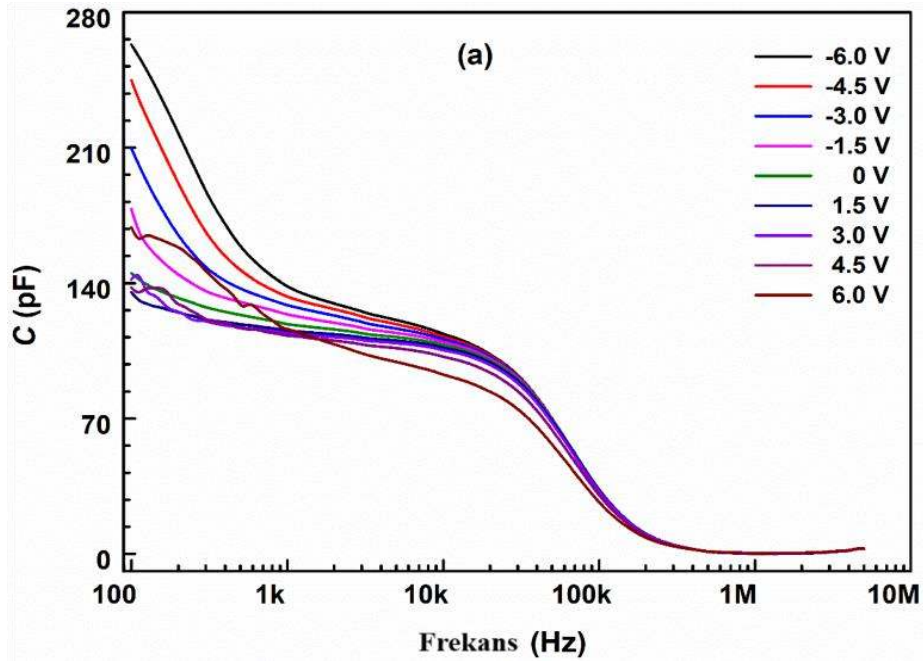
## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 5.1. LC-n-OFET CİHAZININ ELEKTRİKSEL ÖLÇÜMLERİ

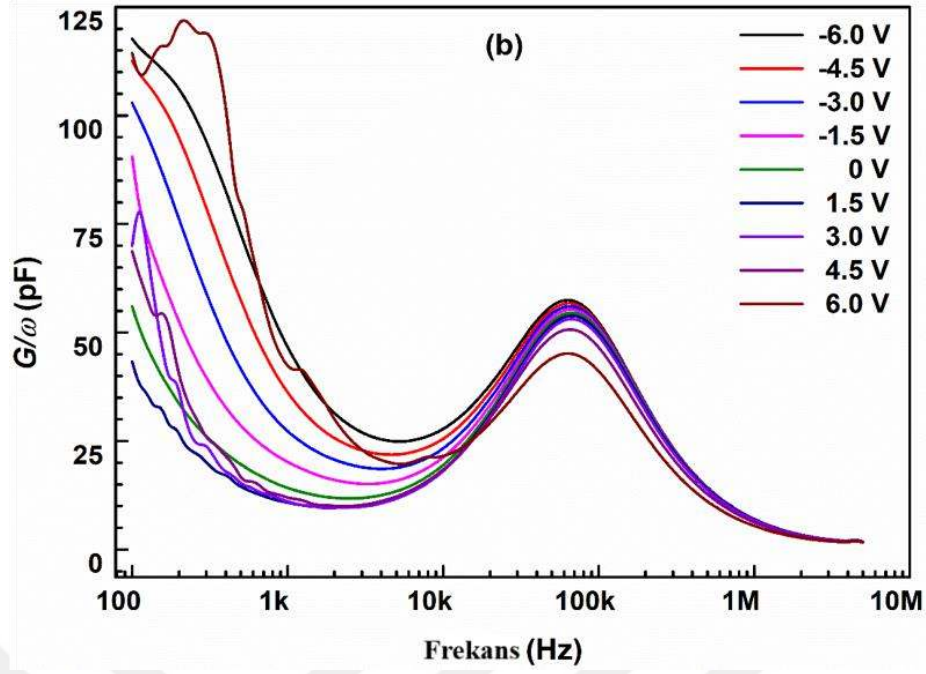
OFET'lerin elektriksel performansını belirlemek için, cihazın dielektrik spektroskopisi de detaylı bir şekilde incelenmelidir. Bu amaçla elde edilen LC-n-OFET cihazının temel parametrelerini doğru bir şekilde belirlemek için, öncelikle cihazın dielektrik özellikleri belirlenmiştir.

#### 5.1.1. Dielektrik Özellikler

Dielektrik özellikler, cihaz ve malzemelerin özelliklerini ve temel parametrelerini belirlemede çok önemli bir rol oynamaktadır. Tüm dielektrik spektroskopi parametreleri, küçük bir AC sinyali uygulandığında frekansa bağlı olarak kapasitans ( $C$ ) ve kondüktans ( $G/\omega$ ) verileri kullanılarak ölçülmüştür. LC-n-OFET cihazının dielektrik özellikleri, bir kontak kapıdan ve diğeri kaynaktan bir dış elektrik alan uygulanarak belirlenmiştir. Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de farklı kapı gerilimleri ( $V_{GS}$ ) altında frekansa ( $f$ ) bağlı olarak  $C$  ve  $G/\omega$  değişimlerini göstermektedir.



Şekil 5.1. LC-n-OFET cihazının  $C$ - $f$  karakteristiğinin  $V_{GS}$ 'ye bağlı değişimi.



Şekil 5.2. LC-n-OFET cihazının  $G/\omega$  - $f$  karakteristiğinin  $V_{GS}$ 'ye bağlı değişimi.

Şekil 5.1’de görüldüğü gibi,  $C$  değerleri düşük frekans aralığında ( $-6,0$  V ile  $+6,0$  V arasında) ve  $100$  Hz ile  $10$  kHz arasında artan  $V_{GS}$  ile azalmaktadır. Düşük frekans bölgesinde, kapı yalıtkanındaki yük ayrışmasına bağlı dipoller AC frekansına ve uygulanan  $V_{GS}$ 'ye kolayca yanıt verebilir. Ancak,  $V_{GS}$  pozitif beslemeye doğru arttıkça, LC-n-OFET’in yüksek besleme voltajlarında kapasitif etkilerinde bozulma meydana gelmektedir. Yüksek pozitif besleme voltajlarında kapasitif yük doygunluğu gerçekleştikten sonra, kapasitif yanıt  $10$  kHz ile  $100$  kHz arasındaki orta frekans aralığında neredeyse sabit kalır ve kararlı bir durum oluşmaktadır.  $100$  kHz’den sonra yüksek frekans aralığında, kapasitif davranış hızlı bir şekilde azalmış ve dipollerin AC sinyalini takip etmesi zor olduğundan minimum kapasitans değerine ulaşılmıştır. Yani, dipoller AC sinyalini takip edemedikçe, LC-n-OFET cihazı yeterli yük biriktirememiştir. Bu durum, cihaz arayüzünde hapsolmuş yükler, AC sinyalini takip edemeyen her dipol tarafından üretilen ek arayüz durumlarının arayüz enerji yoğunluğundaki artışı ve cihazın seri direnci nedeniyle oluşur. [13].

Şekil 5.2’de,  $100$  Hz ile  $10$  kHz arasında artan  $V_{GS}$  ile  $G/\omega$  değerlerinde bir azalma meydana gelmiştir. Bu frekans değerleri arasında rastgele yönelmiş durumdaki moleküllere uygulanan AC sinyaliyle birlikte oluşan dipoller; AC sinyali yönünde yönelmeye başlamış, bütün dipollerin yönelmesini tamamlamasıyla birlikte  $100$  kHz frekans değerinde bir pik noktası meydana gelmiştir. Bu frekans değeri “kritik frekans”

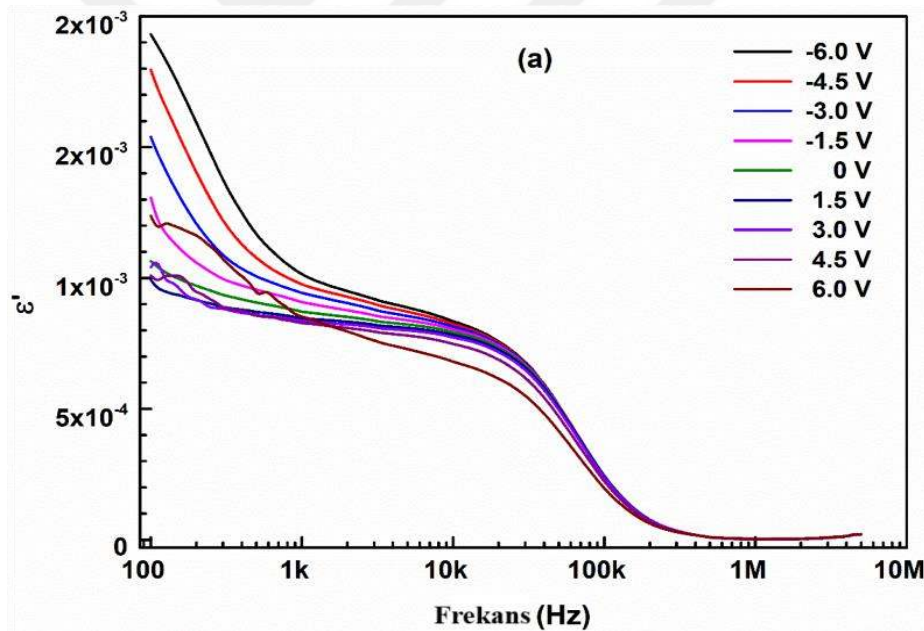
olarak adlandırılır. Kritik frekans değerinden sonra meydana gelen gevşeme ile birlikte  $G/\omega$  değerleri azalmıştır.

LC-n-OFET cihazının 100 Hz ile 1 MHz arasındaki frekans aralığında gerçek ve sanal dielektrik sabit ( $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$ ) gibi tüm dielektrik parametrelerinin hesaplanmasında (Denklem 5.1) kullanılmıştır. Ayrıca, Cole-Cole diyagramları ( $\epsilon'$ - $\epsilon''$ ) cihazın dielektrik davranışını tam olarak anlamak için incelenmiştir.

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' = \frac{c}{c_0} - j \frac{G/\omega}{c_0} \quad (5.1)$$

Burada, kompleks dielektrik sabiti,  $\epsilon^*$  ile gösterilmiştir.

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te farklı  $V_{GS}$  değerlerinde  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$ 'nin frekansa bağlı olarak değişimini göstermektedir.

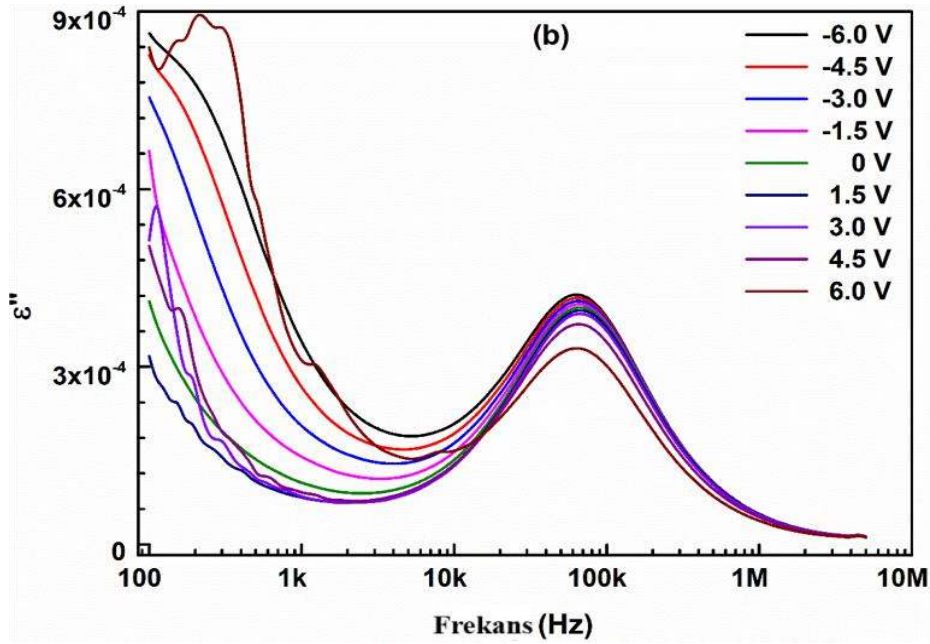


Şekil 5.3. LC-n-OFET cihazının dielektrik sabitinin karakteristik davranışı.

Frekansa bağlı dielektrik sabiti, PCBM katkılı sıvı kristal moleküllerinin dipol momentinin yeniden hizalanmasıyla ilgilidir. Grafiklerde görülebileceği gibi,  $\epsilon'$  değerleri 100 Hz'de maksimum değerini almış ve her  $V_{GS}$  değeri için 100 Hz-10 kHz arasındaki düşük frekans aralığında dielektrik sabit değerleri yavaşça azalmıştır. Ancak, bileşik yapıların  $\epsilon'$  değerlerinin negatif çalışma voltajlarında en yüksek dielektrik sabit değerine ulaştığı ve gerilim azaldıkça dielektrik sabit değerlerinin azaldığı görülebilir. Bu durumun

nedeni, n-tipi PCBM malzemesinin yükleme yoğunluğunun sıvı kristal molekülü ile etkileşimi olabilir. Bu yeni LC-n-OFET cihaz yapısında, PCBM verici malzeme olarak hareket ederken, E7 alıcı olarak davranır. Ana ve yardımcı malzemeler arasındaki bu aramoleküler yük transferi, ek bir dipol momenti yaratmış ve LC-n-OFET yapısındaki genel kutuplaşmayı artırmıştır.

LC-n-OFET yapısındaki ekstra dipol momentlerinin ters besleme voltajındaki yönelimine bağlı olarak LC moleküllerinin,  $V_{GS}$  voltajındaki değişimlerle elektrik alan yönünde yeniden hizalanması nedeniyle dielektrik özellikleri önemli ölçüde değişebilir. Diğer olası nedenin, E7 NLC'deki safsızlık iyonları tarafından neden olunan iyonik yük yoğunluğundaki artış olduğu düşünülmektedir. Ancak,  $V_{GS}$  pozitif kaynak voltajına doğru arttıkça, özellikle  $V_{GS} = 6$  V olduğunda, Şekil 5.3, LC-n-OFET yapısındaki bozulmalar nedeniyle dielektrik sabit  $\epsilon'$  davranışının yüksek besleme voltajlarında değiştiğini göstermektedir. Bu davranış 100 Hz'den sonra değişmekte ve  $\epsilon'$  tüm  $V_{GS}$  değerleri için ~500 kHz'ye hızla azalmaktadır.  $\epsilon''$ 'deki azalma, dipol momentinin net azalmasıyla açıklanabilir, çünkü dipol momentleri test sinyalini takip edememektedir. Ayrıca, ~500 kHz'den sonra  $\epsilon'$  değerleri sabit ve yüksek frekans aralığında birbirine yakındır.  $\epsilon'$ , LC-n-OFET cihazının ITO kaplı elektrotlarının sonlu direncinden etkilenmektedir [14,15].



Şekil 5.4. LC-n-OFET cihazının sanal dielektrik sabitinin karakteristik davranışı.

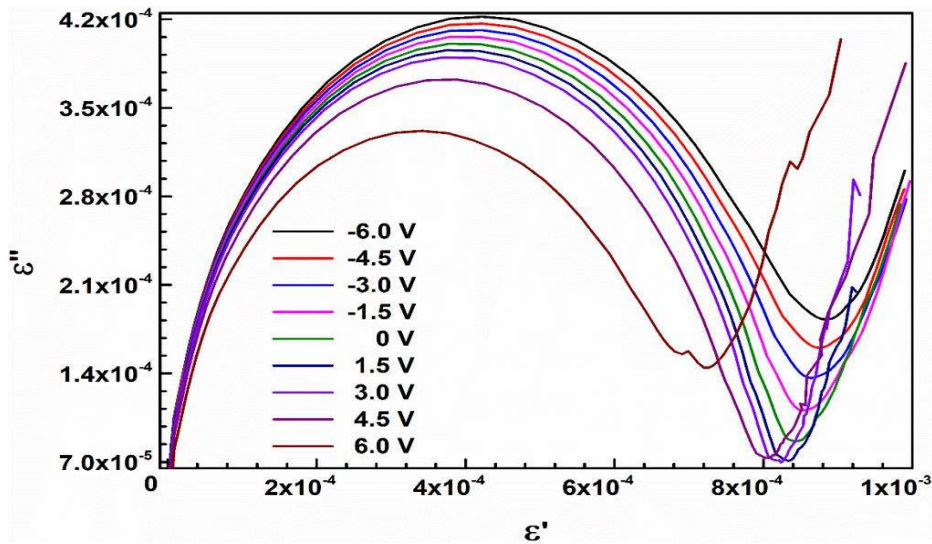
Şekil 5.4'te, frekansa bağlı  $\epsilon''$  değerleri verilmiştir. 10 kHz-1 MHz frekans aralığında tek bir gevşeme zirvesinin gözlemlendiği dikkat çekmektedir. Bu grafiklerin zirve pozisyonları, gevşeme frekansını ( $f_R$ ) belirlemek için kullanılmış ve hesaplanan değerler Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Farklı  $V_{GS}$  değerleri için LC-n-OFET yapısının gevşeme süresi ve gevşeme frekansı.

| $V_{GS}(V)$ | -6                   | -4.5                 | -3                   | -1.5                 | 0                    | 1.5                  | 3                    | 4.5                  | 6                    |
|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $\tau$ (s)  | $2.5 \times 10^{-6}$ | $2.5 \times 10^{-6}$ | $2.5 \times 10^{-6}$ | $2.5 \times 10^{-6}$ | $2.2 \times 10^{-6}$ | $2.2 \times 10^{-6}$ | $2.2 \times 10^{-6}$ | $2.2 \times 10^{-6}$ | $2.5 \times 10^{-6}$ |
| $f_R(kHz)$  | 63.7                 | 63.7                 | 63.7                 | 63.7                 | 72.4                 | 72.4                 | 72.4                 | 72.4                 | 63.7                 |

$V_{GS}$  polarizasyon gerilimi -6.0 V'den +6.0 V'ye değiştirildiğinde  $f_R$  değerlerinin daha yüksek frekans aralığına doğru kaydığını gözlemlemek mümkündür.  $V_{GS}$  değişimine bağlı olarak artan  $f_R$ , LC molekülleri ve PCBM molekülleri arasındaki yüksek tutunma gücü tarafından açıklanabilir. Bu sonuçlar, tutunma gücü nedeniyle moleküllerin negatif  $V_{GS}$  değerlerinde daha kolay hizalandığını göstermektedir. Ayrıca, şekilde görülebileceği gibi, pozitif  $V_{GS}$  değerlerinde enerji kaybı negatif değerlere göre daha düşüktür. Bu sonuçların bir sonucu olarak, optoelektronik cihaz teknolojisinde düşük frekans aralığında çalışabilen yeni bir yapılandırılmalı LC-n-OFET yapısı elde edilmiştir.

LC-n-OFET yapısının dielektrik gevşeme mekanizması, Şekil 5.5'te gösterilen Cole-Cole grafiği kullanılarak incelenmiştir.

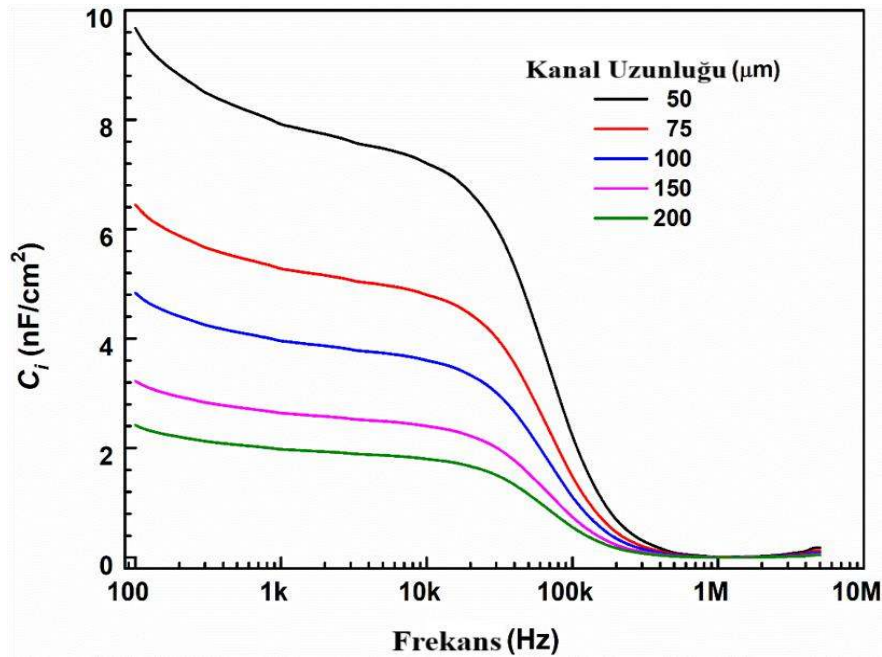


Şekil 5.5. LC-n-OFET cihazının  $V_{GS}$ 'ye bağlı Cole-Cole diyagramları.

Cole-Cole diyagramları, OFET malzemelerinin gevşeme davranışı hakkında bilgi sağlar. Şekil 5.5'te görüldüğü gibi, her gerilim değeri için LC-n-OFET yapısı Cole-Cole grafiklerinde tek bir yarı çember gösterir. Gevşeme zamanı  $\tau$ , Cole-Cole grafiğinin en üst noktası üzerinden kullanılan  $\omega = 1/\tau$  denklemi kullanılarak belirlenmiştir. ( $\omega = (2\pi f)$  açısal frekans,  $\tau$  ise gevşeme süresidir.) Örneklerin  $\tau$  değerlerinin, negatif  $V_{GS}$  voltaj değerlerinde sabit olduğu görülmektedir. Bu değerler pozitif  $V_{GS}$  değerlerinde, +6.0V hariç, artar. Bu sonuç, LC-n-OFET'teki moleküler etkileşim nedeniyle açıklanabilir. Yardımcı malzemeler (PCBM) ile ana malzemeler (LC) arasındaki güçlü dipol moleküler etkileşim nedeniyle, yapıdaki dipoller,  $V_{GS}$  değerleri pozitif yönde arttığında uygulanan voltaja daha hızlı yanıt vermiş ve LC-n-OFET yapısındaki gevşeme zamanı hafifçe artmıştır.

### 5.1.2. Organik Alan Etkili Transistörün Özellikleri

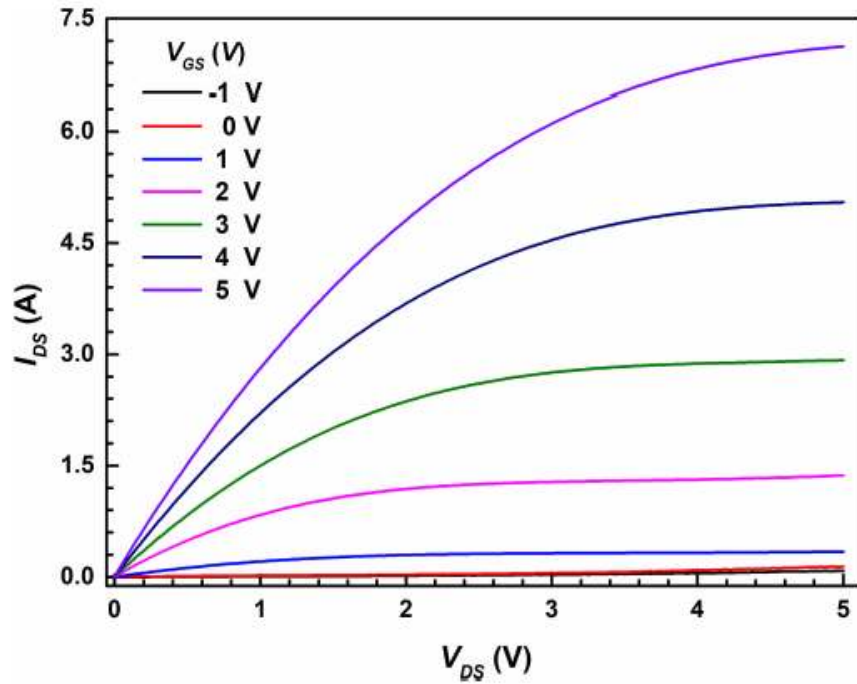
LC-n-OFET cihazının kaynak-savak teması arasındaki kanal uzunluğu 50  $\mu\text{m}$  ile 200  $\mu\text{m}$  arasında değişmektedir. Kapı ve Kaynak temasları arasında harici bir elektrik alan uygulayarak mobilitayı belirlemek için LC-n-OFET cihazının etkin kapasitesi ( $C_i$  - birim alan başına kapasite değeri) her kanal uzunluğu için AC frekansları arasında 100 Hz ile 5 MHz arasında belirlenmiştir. LC-n-OFET cihazının frekans bağımlı  $C_i$  karakteristikleri Şekil 5.6'da gösterilmektedir.



Şekil 5.6. LC-n-OFET cihazının  $C_i$ -f karakteristiğinin kanal uzunluğuna bağlı değişimi.

LC-n-OFET'in  $C_i$  verilerinden, kanal uzunluğu 1 kHz'de arttıkça LC-n-OFET'in  $C_i$ 'si 9.7 nF/cm<sup>2</sup>'den 2.3 nF/cm<sup>2</sup>'ye kadar azalmaktadır. Mobilitiyi belirlemek için, cihazın kapasitif özelliklerini ve yalıtım tabakasının kapasitansını elde etmek çok önemlidir. Bu tür cihazlar için, ölçüm cihazının çalışma frekansına karşılık gelen düşük frekanslardaki statik kapasite değeri, mobilitiyi güvenilir bir şekilde belirlemek için dikkate alınmaktadır [16].

Şekil 5.7'de gösterilen Keithley 2612B SMU cihazı ile ölçülen LC-n-OFET cihazının çıkış karakteristikleri, karanlık bir ortamda ölçülmüş olup sonuçlar, LC-n-OFET cihazının  $V_{DS} = 5$  V polarizasyon geriliminde tam doygunluğa ulaştığını göstermiştir. Bu sonuç, LC malzemelerinin yüksek dipol momentleri ile PCBM'in n-tipi yarıiletken özelliklerinin birleştirilmesine atfedilebilir [17].

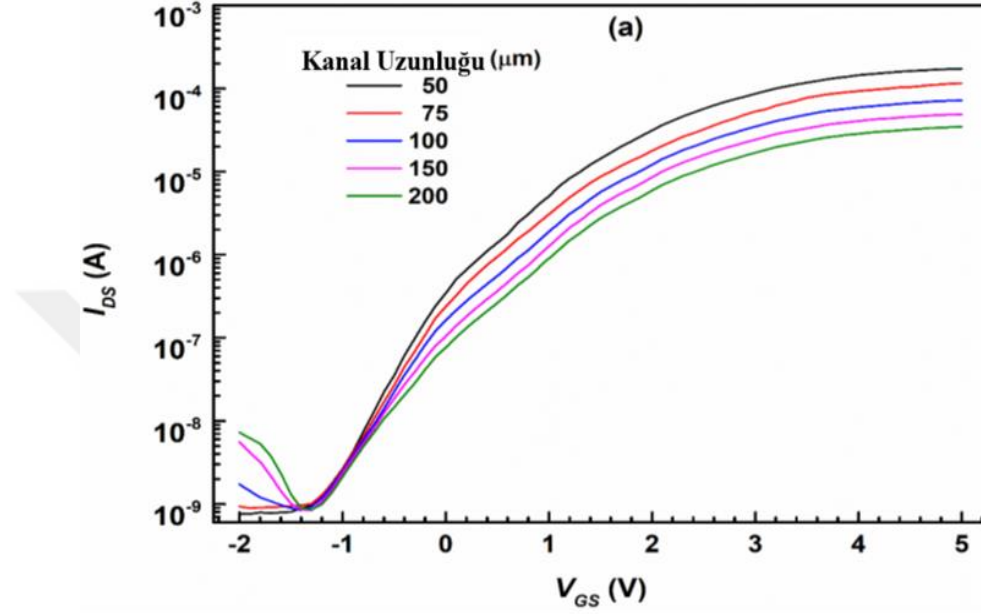


Şekil 5.7. LC-n-OFET cihazının çıkış eğrileri.

OFET'lerin performans parametreleri kutuplu kapı yalıtkanları tarafından kontrol edilebilir ve yüksek dipol kapı yalıtkanları tarafından modüle edilebilir; kaynak varyasyonu, LC malzemesinin kalıcı dipollerinden kaynaklanır [18]. Kutuplu yalıtkanların kolay kutuplaşması ve LC moleküllerinin yüksek dipol eğilimi nedeniyle, hem LC hem de PCBM'den oluşan bileşik ortamda kutuplaşma, PCBM/LC bileşik ortamında hapsolmuş yük taşıyıcılarının uyarılmasını sağlamıştır. Yük taşıyıcılarının uyarılması ve yüksek dipol kutuplaşması nedeniyle, LC-n-OFET, -1 V-(+5 V) aralığında

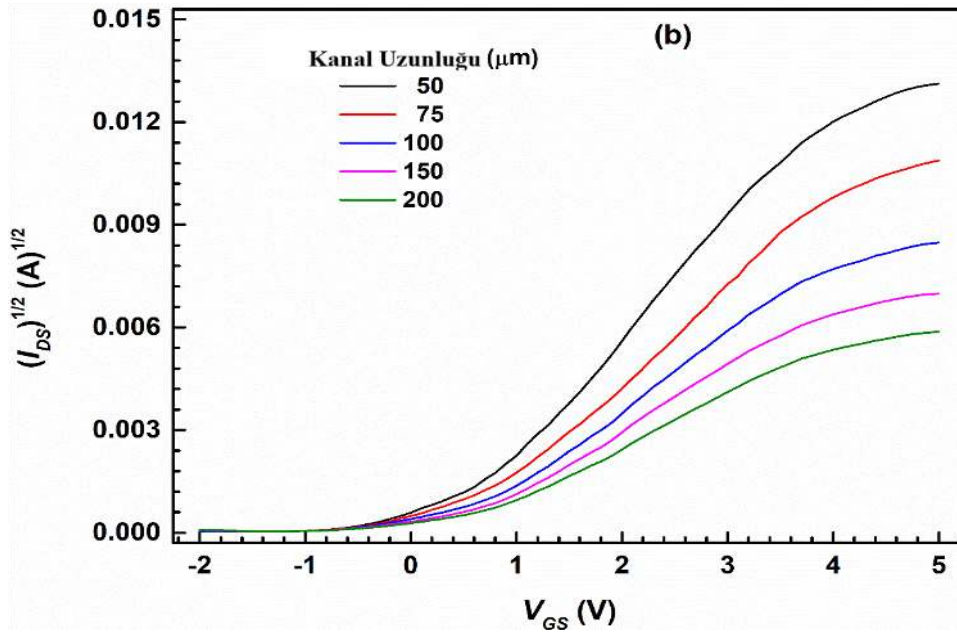
$V_{GS}$  adımları ile çok stabil doygunluk davranışı sergilemiştir [19].

Farklı kanal uzunlukları için sabit bir  $V_{DS}$  polarizasyonu altında  $I_{DS}$ 'in logaritmik ölçeği ve  $\sqrt{I_{DS}}$ 'nin özellikleri Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da ortaya konulmuştur. OFET'lerin akım açma/kapatma oranlarını  $I_{on/off}$  (maksimum  $I_{DS}$ /minimum  $I_{DS}$ ) belirlemek için Şekil 5.8 kullanılmıştır.



Şekil 5.8. Kanal uzunluğuna bağlı olarak  $I_{DS}$ - $V_{GS}$  eğrileri.

Diğer yandan, alan etkili transistörlerin eşik voltajını ( $V_{Th}$ ) belirlemek için Şekil 5.9 eğrilerinin en iyi doğrusal uyumlu çizgilerinin x-ekseni ile kesişimi elde edilmiştir.



Şekil 5.9. Kanal uzunluğuna bağlı olarak  $\sqrt{I_{DS}}$ - $V_{GS}$  eğrileri.

Şekil 5.8'e göre,  $I_{on/off}$  değeri kanal uzunluğunun artmasıyla yaklaşık beş kat ( $2.13 \times 10^5$ 'ten  $3.91 \times 10^4$ 'e) azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi kanalda artan delikler ve yük tuzaklarıdır. Daha uzun bir kanal uzunluğunun dipol momenti üzerinde daha az etki etmesi beklenirken,  $I_{on/off}$  değeri kutuplaşma/rahatlama geçişi sırasında yüksek sayıda dipolün azalması nedeniyle azalmaktadır. Şekil 5.9'da görüldüğü gibi, kanal uzunluğunun artması, birinci uyarılmış dipol sayısının önemli ölçüde değişmemesi nedeniyle  $V_{Th}$ 'da hafif bir değişime neden olmuştur. Son olarak, her  $V_{GS}$  için maksimum  $I_{DS}$  değeri, aşağıdaki Denklem 5.2 formülüne göre alan etkili hareketlilik ( $\mu_{FET}$ ) değerini verir [20]:

$$I_{DS} = \left[ \mu_{FET} \frac{WC_i}{2L} \right] (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (5.2)$$

LC-n-OFET cihazının temel performans parametreleri, kanal uzunluğunun bir fonksiyonu olarak, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'daki eğriler kullanılarak ve Denklem (5.2)'ye göre hesaplanarak Tablo 5.2'de verilmiştir.

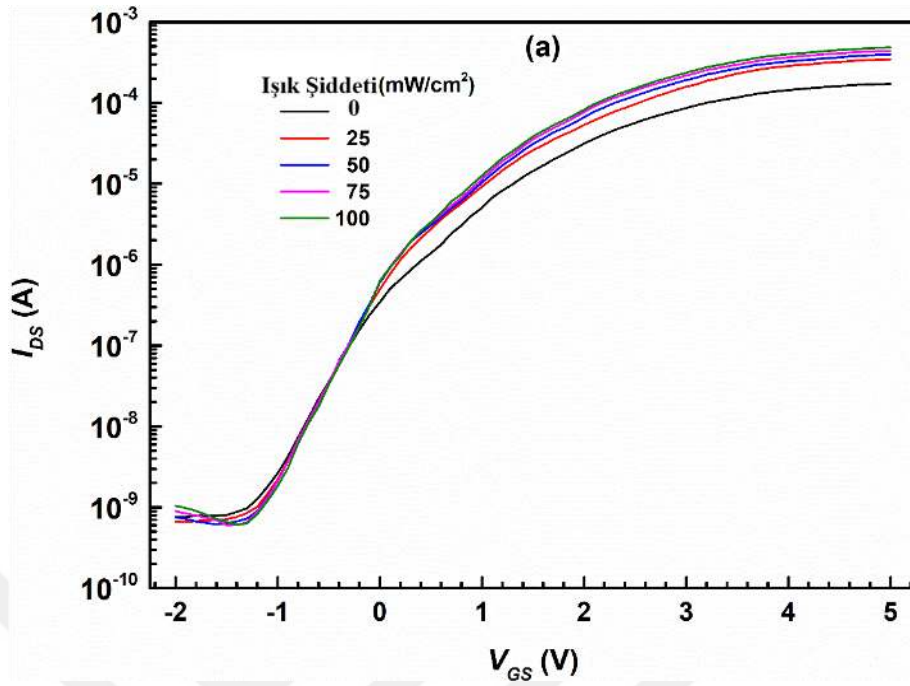
Tablo 5.2. Kanal uzunluğunun LC-n-OFET cihazının performans parametrelerine bağlılığı.

| Kanal Uzunluğu-L( $\mu m$ ) | $V_{Th}(V)$ | $I_{on/off}$       | Mobilite- $\mu_{FET}(cm^2/V.s)$ |
|-----------------------------|-------------|--------------------|---------------------------------|
| 50                          | 0.45        | $2.13 \times 10^5$ | 6.73                            |
| 75                          | 0.47        | $1.27 \times 10^5$ | 7.52                            |
| 100                         | 0.51        | $8.71 \times 10^4$ | 9.48                            |
| 150                         | 0.53        | $5.77 \times 10^4$ | 15.2                            |
| 200                         | 0.53        | $3.91 \times 10^4$ | 18.9                            |

PCBM moleküllerinin aktif hale gelmesi ve yük birikmesine başlaması için gereken minimum besleme gerilimi olan  $V_{Th}$ , kanal uzunluğunun artmasıyla hafifçe artmıştır. Bu küçük varyasyon, E7 molekülünün PCBM molekülleriyle birlikte hızlı dipol oluşumunu zorlayarak ve elektrik alanla yük birikmesini artırması nedeniyle oluşur [21]. Ayrıca,  $\mu_{FET}$ 'in kanal uzunluğunun artmasıyla üstel olarak artması, kanal içindeki aktif alanın artması ve zorlanmış dipol yönelimiyle açıklanabilir [22]. Kanal uzunluğunun artmasıyla  $I_{on/off}$  oranının azaldığı gözlemlenmiştir [23]. Bu, E7'nin dış kusurlarının ve safsızlık iyonlarının miktarının kanal uzunluğuyla birlikte artması, ayrıca bu safsızlıkların tuzak yoğunluğunun artmasıyla ilişkilendirilebilir [24].

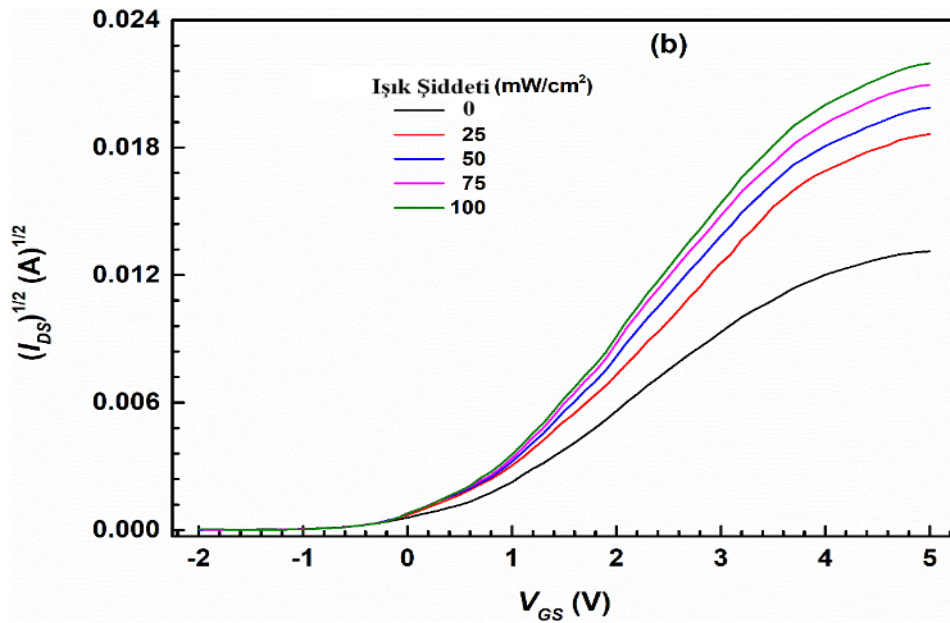
Öte yandan, sabit bir  $V_{DS}$  polarizasyonunda  $I_{DS}$ 'nin logaritmik ölçeği ve  $\sqrt{I_{DS}}$  ile  $V_{GS}$ 'nin

karakteristikleri farklı ışık şiddetlerindeki durumları Şekil 5.10 ve 5.11'de gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Işık şiddetine bağlı  $I_{DS}$ - $V_{GS}$  eğrileri.

E7 gibi nematik sıvı kristaller ve PCBM gibi n-tipi yarıiletkenler hem fotodirenç hem de fotovoltaj katkısında bulunabilirler. Bu nedenle, her iki malzeme de ışığa maruz kaldığında fotoindüksiyona bağlı olarak artan fotovoltaj üretebilirler. Buna göre, fotoiletkenlik nedeniyle kanalda ışıkla indüklenen yüklerin oluşması LC-n-OFET'in kanal iletkenliğini artırmaktadır.



Şekil 5.11. Işık yoğunluğuna bağlı  $\sqrt{I_{DS}}$ - $V_{GS}$  eğrileri.

Şekil 5.11,  $(I_{DS})_{max}/(I_{DS})_{min}$  oranından her bir ışık yoğunluğu için LC-n-OFET cihazının  $I_{on/off}$  oranının hesaplanmasını sağlar. Bu şekilde, her bir ışık yoğunluğu için sabit bir  $V_{DS}$  polarizasyon geriliminde  $I_{on/off}$  değerleri elde edilir. Işık yoğunluğundaki artışın, ışığa bağlı yüklerin artması nedeniyle  $I_{on/off}$  değerinde bir artışa neden olduğu varsayılır. PCBM/E7 bileşiğinde, E7'nin iyonik safsızlıklara rağmen ışığa maruz kalmanın kanal iletkenliğindeki artışı daha büyük ışığa bağlı yük üretimine bağlanabilir. Öte yandan, doygunluk rejimindeki karekök transfer karakteristiğinin (Şekil 5.11) eğimi,  $V_{Th}$  ve  $\mu_{FET}$  gibi LC-n-OFET'nin önemli performans parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Her bir ışık yoğunluğu için,  $\mu_{FET}$ , Şekil 5.11'deki eğim kullanılarak Denklem 5.2 ile belirlendi ve  $V_{Th}$ , bu eğimin x-eksenini kestiği noktanın tahmini ile belirlenmiştir.

LC-n-OFET cihazının temel performans parametreleri, Şekil 5.10 ve Şekil 5.11 eğrileri ve Denklem 5.2 kullanılarak ışık yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak elde edilmiş Tablo 5.3'te verilmiştir.  $V_{Th}$ , Tablo 5.2'deki değişiklikten daha fazla ışık yoğunluğu ile artmıştır. Bu değişiklik, foto indüklenmiş tuzaklar ve foto indüklenmiş yüklerin aynı anda artması ile ilişkilendirilebilir.  $\mu_{FET}$ , Tablo 5.2'deki değişiklikten daha fazla artan ışık yoğunluğu ile ilişkilendirilebilir. Bu, dipol oluşumundan sonra kanalda foto indüklenmiş yük miktarındaki tuzakların baskılanması ve pasifizasyonu ile açıklanabilir [25]. Tablo 5.3'teki durumun aksine,  $I_{on/off}$  oranı artan ışık yoğunluğu ile artmıştır. Bu, foto-indüklenmiş yüklerin kanal iletkenliğine ek katkısı, foto-indüklenmiş yükler tarafından tuzak yoğunluğunun pasifleştirilmesi ve fotoakımın artması ile ilişkilendirilebilir [26].

Tablo 5.3. Işık Şiddetinin LC-n-OFET cihazının performans parametrelerine bağlılığı.

| <b>Işık Şiddeti-P(mW/cm<sup>2</sup>)</b> | <b><math>V_{Th}</math>(V)</b> | <b><math>I_{on/off}</math></b> | <b>Mobilite-<math>\mu_{FET}</math>(cm<sup>2</sup>/V.s)</b> |
|------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 0                                        | 0.45                          | $2.13 \times 10^5$             | 6.73                                                       |
| 25                                       | 0.46                          | $5.20 \times 10^5$             | 11.90                                                      |
| 50                                       | 0.49                          | $6.45 \times 10^4$             | 15.10                                                      |
| 75                                       | 0.54                          | $7.31 \times 10^5$             | 18.50                                                      |
| 100                                      | 0.60                          | $7.83 \times 10^5$             | 19.00                                                      |

## 6. SONUÇ

Günümüz teknolojisinin birçok uygulamasında ileri fonksiyonel malzemeler arasında yer alan LC'ler ve umut vaadeden teknolojik uygulamalar için aday olan organik alan etkili transistörler, özellikle düşük güç tüketimi ve hızlı anahtarlama özellikleri nedeniyle sıklıkla tercih edilen yapılar arasındadır. Bu çalışmada, tasarlanan özel LC-n-OFET hücresinin elektriksel ve dielektrik karakterizasyonları hem farklı ışık yoğunluklarında hem de farklı kanal uzunluklarında gerçekleştirilmiştir. LC-n-OFET cihazının elektriksel çıkış ve transfer karakteristikleri oda sıcaklığında, farklı UV ışık yoğunlukları altında ve farklı kanal uzunluklarında incelenmiştir. LC-n-OFET cihazının elektriksel çıkış ve transfer karakteristikleri, oda sıcaklığında ve çevresel koşullarda UV ışığı altında değişmezken, farklı kanal uzunluklarında gözle görülür bir değişim göstermiştir.

Elde edilen sonuçlardan, cihazın yeniden üretilebilirlik ve kararlılık açısından çok uygun olduğu, nem ve oksijenden etkilenmediği görülebilir. LC-n-OFET'in bu mükemmel performansı, Elektrik alanına yanıt veren LC'lerin, hücre içindeki dipol hizalanması ve dipol momentinden kaynaklanmaktadır. Kanal uzunluğu arttıkça pin delikleri ve yük tuzağı sayısının artması nedeniyle LC-n-OFET cihazının  $I_{on/off}$  'u beş kat azalmıştır ( $2.13 \times 10^5$ 'ten  $3.91 \times 10^4$ 'e). Daha uzun kanal aralıklarının daha fazla dipol yönlendirme alanına izin vermesi nedeniyle  $\mu_{FET}$  hafifçe azalmıştır ( $2.99 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ 'den  $2.43 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ 'ye). Öte yandan, kanal uzunluğu arttıkça, E7 molekülü elektrik alan nedeniyle yük birikimini artırmış ve PCBM molekülleriyle hızlı dipol oluşumunu zorlamasıyla da  $V_{Th}$  hafifçe artmıştır. Diğer yandan, ışık yoğunluğunun artmasıyla  $I_{on/off}$  oranı 3.5 kat ( $2.13 \times 10^5$ 'ten  $7.83 \times 10^5$ 'e) artmıştır. Işığın etkinleştirdiği yükler, tuzak pasifleştirme nedeniyle tuzakları bastırır. Böylece  $\mu_{FET}$ , yaklaşık üç kat artmıştır ( $2.99 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ 'den  $8.43 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ 'ye). Bununla birlikte,  $V_{Th}$  değerlerinin ışık yoğunluğuna göre değişimi, kanal uzunluğundaki değişimine göre daha fazladır bu da fotoindüklenen yükler ve fotoindüklenen tuzakların aynı anda artmasından kaynaklanmaktadır.

LC-n-OFET cihazının kanal uzunlukları ve UV ışık yoğunluklarındaki değişikliklere verdiği tepkiler, yük taşıyıcılarının oluşturdukları fotojenerasyon, yük rekombinasyonu ve dipol oluşumu, artan fotoakım, kanalda artan yük birikimi ve LC'nin güçlü polarizasyonu gibi faktörlere bağlı olarak açıklanabilir. Üretilen yeni LC-n-OFET, sıvı

kristalleri ve organik transistörleri entegre ederek temel parametreler açısından üstün yetenekler sergilemiştir. Dielektrik özelliklerinin yanı sıra, cihazın içindeki güçlü dipol momentinin etkileri, yük rekombinasyonu ve LC'nin hızlı anahtarlama özellikleri de gevşeme zamanları açısından LC-n-OFET cihazının performansı için oldukça önemlidir. UV ve kanal uzunluğu gibi önemli parametrelerdeki değişimlerin; yüksek mobilite, yüksek  $I_{on/off}$  oranı ve düşük  $V_{Th}$  gibi yeni nesil cihazın önemli parametrelerine katkıda bulunacağı düşünülmektedir, böylece düşük güç elektroniği uygulamalarında kullanımı ileri cihaz endüstrisine katkı sağlayacaktır. Son olarak, bu çalışma, LC içeren organik elektronik cihazların özelliklerine daha fazla ışık tutacak ve yeni çalışmaları teşvik edecektir.



## 7. KAYNAKLAR

- [1] Facchetti, Yoon M. H., Marks T. J., “Gate Dielectrics For Organic Field Effect Transistors: New Opportunities For Organic Electronics”, *Advanced Materials*, c. 17, sf.1705-1725, 2005.
- [2] Singh, T. B., Sariçiftçi, N. S., “Progress in Plastic Electronics Device”, *Annual Review of Materials Research*, c. 36, sf. 199-230, 2006.
- [3] Block, H., “The nature and application of electrical phenomena in polymers, in Electric Phenomena in Polymer science”, *Springer*. sf. 139-205, 2005.
- [4] Yasin M., Tauqeer T., Karimov K. S., San S. E., Kösemen A., Yerli Y., Tunc A. V., “P3HT:PCBM blend based photo organic field effect transistor”, *Microelectronic Engineering*, c.130(2), sf. 13-17, 2014.
- [5] De Leeuw D. M., Simenon J. M. M., Brown A. R., Einerhand R. E. F., “Stability of n-type doped conducting polymers and consequences for polymeric microelectronic devices”, *Synthetic Metals*, c.87, sf.53, 1997.
- [6] P.R. Berger, M. Kim, “Polymer Solar Cells: P3HT:PCBM and Beyond”, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2018.
- [7] Facchetti, Yoon M. H., Marks T. J., “Gate Dielectrics for Organic Field Effect Transistors: New Opportunities for Organic Electronics”, *Advanced Materials*, c. 17, sf. 1705-1725, 2005.
- [8] M. J. Han et al., “Highly Oriented Liquid Crystal Semiconductor for Organic Field Effect Transistors”, *ACS Central Science*, c. 4/11, sf. 1495–1502, 2018.
- [9] R. Raveendran, M. Nagaraj, and M. A. G. Namboothiry, “High-Performance, Transparent Solution-Processed Organic Field-Effect Transistor with Low-k Elastomeric Gate Dielectric and Liquid Crystalline Semiconductor: Promises and Challenges”, *ACS Applied Electronic Materials*, c. 2/10, sf. 3336–3345, 2020.
- [10] H. Iino and J. Hanna, “Liquid crystalline organic semiconductors for organic transistor applications”, *Polymer Journal*, c. 49/1, 2016.
- [11] X. Fang, “Patterning Liquid Crystalline Organic Semiconductors via Inkjet Printing for High- Performance Transistor Arrays and Circuits”, *Advanced Functional Materials*, c. 31/21, sf. 210-237, 2021.
- [12] J. Seo, S. Park, S. Nam, H. Kim, and Y. Kim, “Liquid Crystal-on-Organic Field-Effect Transistor Sensory Devices for Perceptive Sensing of Ultralow Intensity Gas Flow Touch”, *Scientific Reports*, c.3/1, 2013.

- [13] M. Song, J. Seo, H. Kim, and Y. Kim, “Ultrasensitive Multi-Functional Flexible Sensors Based on Organic Field-Effect Transistors with Polymer-Dispersed Liquid Crystal Sensing Layers”, *Scientific Reports*, c. 7/1, 2017.
- [14] Okutan M., San S. E., Köysal O., “Dielectric spectroscopy analysis of molecular reorientation in dye doped nematic liquid crystals having different preliminary orientation”, *Science Direct*, c. 65/2, sf. 169-174, 2005.
- [15] A. Tataroğlu, “Dielectric Permittivity, AC Conductivity and Electric Modulus Properties of Metal/Ferroelectric/Semiconductor (MFS) Structures”, *Gazi University Journal of Science*, c.26, sf. 501-508, 2013.
- [16] C. Wang, “Significance of the double-layer capacitor effect in polar rubbery dielectrics and exceptionally stable low-voltage high transconductance organic transistors”, *Scientific Reports*, c. 5/1, 2015.
- [17] P. Durmuş, Ç. Bilkan, and M. Yıldırım, “Effects of Frequency and Bias Voltage on Dielectric Properties and Electric Modulus of Au/Bi<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>12</sub>/n-Si (MFS) Capacitors”, *Journal of Polytechnic*, sf. 1003–1008, 2017.
- [18] J. Wu, J. Luo, N. Cernetic, K. Chen, K.-S. Chiang, and A. K.-Y. Jen, “PCBM-doped electro-optic materials: investigation of dielectric, optical and electro-optic properties for highly efficient poling”, *Journal of Materials Chemistry C*, c.4/43, sf. 10286–10292, 2016.
- [19] P. Paoprasert, “Dipolar Chromophore Functional Layers in Organic Field Effect Transistors”, *Advanced Materials*, c. 20/21, sf. 4180–4184, 2008.
- [20] J. J. Schwartz, “Surface Dipole Control of Liquid Crystal Alignment”, *Journal of the American Chemical Society*, . 138/18, sf. 5957–5967, 2016.
- [21] Chi-Le Chen, “A physics-based model of threshold voltage for amorphous oxide semiconductor thin-film transistors”, *AIP Advances*, c. 6/3, 2016.
- [22] F. Chianese, A. Candini, M. Affronte, N. Mishra, C. Coletti, and A. Cassinese, “Linear conduction in N-type organic field effect transistors with nanometric channel lengths and graphene as electrodes”, *Applied Physics Letters*, c. 112/21, sf. 2-5, 2018.
- [23] E. H. Minhaj, S. R. Esha, Md. M. R. Adnan, and T. Dey, “Impact of Channel Length Reduction and Doping Variation on Multigate FinFETs”, *2018 International Conference on Advancement in Electrical and Electronic Engineering (ICAEEE)*, Gazipur, Bangladesh, 2018, sf. 1–4.
- [24] T. Nagase, T. Hirose, T. Kobayashi, R. Ueda, A. Otomo, and H. Naito, “Influence of Substrate Modification with Dipole Monolayers on the Electrical Characteristics of Short- Channel Polymer Field-Effect Transistors” *Applied Sciences*, C. 8/8, 2018.
- [25] B. K. Kaushik, “*Nanoscale Devices: Physics, Modeling, and Their Application*”, CRC Press, 2018.

- [26] V. Marzal, M. Caño-García, J. C. Torres, X. Quintana, I. Pérez, and B. Garcia-Camara, “Electrical Behavior of Liquid Crystal Devices with Dielectric Nanoparticles”, *Journal of Nanomaterials*, c. 2020, sf. e4515432, 2020.



# ÖZGEÇMİŞ

## KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Şule Zeynep KİP

Yabancı Dili :İngilizce

## ÖĞRENİM DURUMU

| Derece    | Alan                        | Okul/Üniversite      | Mezuniyet Yılı |
|-----------|-----------------------------|----------------------|----------------|
| Y. Lisans | Fizik                       | Düzce Üniversitesi   | 2024           |
| Lisans    | Astronomi ve Uzay Bilimleri | Erciyes Üniversitesi | 2014           |
| Lise      |                             | Hakkı Altop Lisesi   | 2010           |

## TEZDEN ÇIKAN YAYIN

Sule Zeynep Kip, Keziban Gegin, Ahmet Demir, Oguz Koysal, Sadullah Oztürk, Arif Kosemen, “The novel n-channel liquid crystal organic field effect transistor (LC-n-OFET): A promising technology for low-power electronics”, *Organic Electronics*, c.125/ 106965, 2024.