



**ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLERİN ANALİTİK İNCELENMESİ**

**VE SİMÜLASYONU**

**BEKTAŞ DOĞAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**FİZİK ANA BİLİM DALI**

**DOÇ. DR. SALİH SAYGI**

**TEMMUZ - 2019**

**Her hakkı saklıdır.**

**T.C.  
TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLERİN ANALİTİK İNCELENMESİ  
VE SİMÜLASYONU**

**BEKTAŞ DOĞAN**

**TOKAT  
TEMMUZ - 2019**

Her hakkı saklıdır.

Bektaş DOĞAN tarafından hazırlanan “Organik Alan Etkili Transistörlerin Analitik İncelenmesi ve Simülasyonu” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 23.07.2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen Jüri üyeleri tarafından Oy Birliği ile Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Doç. Dr. Salih SAYGI  
Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi

Üye  
Prof. Dr. Bahtiyar MEHMETOĞLU  
Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi

Üye  
Prof. Dr. İskender ASKEROĞLU  
Giresun Üniversitesi

ONAY

Prof. Dr. Çetin ÇEKİC  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



## **TEZ BEYANI**

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

**BEKTAŞ DOĞAN**  
**23 Temmuz 2019**

## **ÖZET**

### **YÜKSEK LİSANS TEZİ ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLERİN ANALİTİK İNCELENMESİ VE SİMÜLASYONU**

**BEKTAŞ DOĞAN**

**TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANA BİLİM DALI  
TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. SALİH SAYGI**

Silisyum, germanyum gibi inorganik yarıiletkenlerin; üretim maliyetlerinin yüksek olması, zorlu üretim teknikleri ile üretilmeleri bu yarıiletkenlerin olumsuz taraflarıdır. Yarıiletken aygıt teknolojisi bu alanın atası olan silisyumla başlamış ve sonrasında birçok materyal üzerinde çalışılmıştır. İlk silisyum tabanlı aygıtların üretiminden birkaç on yıl sonra, karbon tabanlı olarak anılan organik yarıiletkenler keşfedilmiştir. İlk keşifleri itibariyle düşük iletkenlik gösteren organik yarıiletkenlerin iletkenlikleri, çeşitli yöntemlerle geliştirilmiş ve amorf silikon ile rekabet eder hale getirilmiştir. Bu organik materyaller daha sonra bilinen yarıiletken aygıtların fabrikasyonunda kullanılmışlar ve uygulamalara yönelik olarak gayet iyi sonuçlar vermişlerdir. Öyle ki esnek ekranlar, oled tv'ler, güneş pilleri, batarya malzemeleri, yapay kaslar, sensörler ve özellikle biyosensörler olarak organikler kendilerine geniş bir kullanım alanı bulmuşlardır. Bunda organik yarıiletken aygıtların esnek yapılı, düşük maliyetli olmaları, kolay fabrikasyon teknikleri ile üretilmeleri, yüksek absorblama katsayılarına sahip olmaları etkili olmuştur.

2019, 49 SAYFA

**ANAHTAR KELİMELER:** Karbon, Organik Yarıiletkenler, HOMO, LUMO, OFET

**ABSTRACT**  
**THESIS OF MASTER OF SCIENCE**  
**ANALYTICAL INVESTIGATION AND SIMULATION OF ORGANIC FIELD**  
**EFFECT TRANSISTORS**

**BEKTAS DOGAN**

**TOKAT GAZIOSMANPASA UNIVERSITY**  
**GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**  
**DEPARTMENT OF PHYSICS**  
**SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. SALIH SAYGI**

To have high production cost and difficult production techniques are negative aspects of inorganic semiconductors such as Silicon and Germanium. Semiconductor device technologies have begun by Silicon applications and later on many semiconductor materials have been involved to work on. After a few decades, Silicon based semiconductor devices have fabricated, organic semiconductors which have been known carbon based organic semiconductors have revealed. The conductivity of organic semiconductors, which showed low conductivity as a result of their initial discoveries, has been improved by various methods and has become competitive with amorphous silicon. These organic materials were then used in the fabrication of semiconductor devices, such as inorganic, and gave good results for applications. Such that flexible screens, oled tvs, solar cells, battery materials, artificial muscles, sensors, especially biosensors, have found wide usage area. Thus, organic semiconductor devices by flexible structures, low cost, easy fabrication techniques and high absorption coefficients have been found wide range of usage.

2019, 49 PAGES

**KEYWORDS:** Carbon, Organic Semiconductors, HOMO, LUMO, OFET

## ÖNSÖZ

Hem ders aşamasında hem de tez aşamasında birçok emeği geçen danışman hocam Doç. Dr. Salih Saygı'ya; ders hocalarım Prof. Dr. Hayati Sarı'ya, Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Serhat Can'a, Dr. Öğr. Üyesi Bülent Turan'a; yakın arkadaşlarımdan Okan Yaman'a, Efkân Balcı'ya, diğer lisans arkadaşlarıma ve özellikle üzerimdeki tüm emeklerinden dolayı sevgili aileme - anneme, babama ve kardeşime - teşekkürlerimi sunarım.

**BEKTAŞ DOĞAN**

**23 Temmuz 2019**

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ .....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER .....	2
2.1. Yarıiletkenlere Giriş .....	2
2.1.1. Enerji Bantları: Valans Bandı ve İletim Bandı.....	3
2.1.2. Direk ve Direk Olmayan Bant Yapıları.....	3
2.1.3. İş Fonksiyonu(WF), Elektron Alınganlığı(EA) ve İyonizasyon Enerjisi(IE) .....	4
2.1.4. Asal Yarıiletkenlerde Fermi Seviyesi ve Asal Taşıyıcı Sayısı.....	5
2.1.5. Katkılama ile N-Tipi ve P-Tipi Yarıiletken Oluşturma.....	6
2.1.6. Katkılanmış Yarıiletkenlerde Fermi Seviyesi .....	7
2.1.7. Fermi Potansiyeli .....	8
2.1.8. Akım Yoğunluğu, İletkenlik ve Mobilite .....	8
2.2. Spektroskopik Yöntemler .....	10
2.2.1. İletkenlik Ölçümleri.....	10
2.2.2. 4 Prop Tekniği.....	10
2.2.3. Van der Pauw Metodu.....	11
2.2.4. Sıcak Prop Tekniği ile Taşıyıcı Tipi( N – P ) Belirleme.....	13
2.2.5. Hall Olayı.....	13
2.2.6. TOF(Time of Flight) .....	15
2.2.7. UPS (Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy) .....	16
2.2.8. IPES (Inverse Photoemission Spectroscopy).....	16
2.2.9. Siklotron Rezonans ( <i>Cyclotron Resonance</i> ) ile Etkin Kütle Hesabı .....	16
2.3. Organik Yarıiletkenler.....	18
2.3.1. Organik Kelimesi ve Organik Bileşikler.....	18
2.3.2. Organik Bileşiklerin Genel Özellikleri .....	18
2.3.3. Sigma ve Pi Bağları .....	19
2.3.4. Karbon Atomunun Orbital Enerjileri .....	19
2.3.5. Atomik ve Moleküler Orbitaler ve Hibritleşme.....	19



2.3.6. Karbon Atomunun Allotropları-Grafen .....	22
2.3.7. Karbon Atomunun Allotropları-Grafit .....	22
2.3.8. Karbon Atomunun Allotropları-Elmas.....	23
2.3.9. Polimerler.....	23
2.3.10. Küçük Moleküller .....	24
2.3.11. Organik Yarıiletkenler .....	24
2.3.12. Neden Organik Yarıiletkenler .....	25
2.3.13. Organik Yarıiletkenlerin Enerji Bant Aralığı .....	25
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	29
3.1. OFET .....	29
3.1.1. IGFET, MOSFET-OFET Genel Özellikler .....	29
3.1.2. MIS(Metal Insulator Semiconductor), Kontaklar ve Bant Diyagramları .....	30
3.1.3. OFET Akım-Gerilim Denklemleri .....	30
3.1.4. Eşik Voltajı.....	32
3.1.5. Dielektrik Kapasitesinin Eşik Voltajına ve $I_d$ Akımına Etkisi .....	33
3.1.6. Kontakların Hizalanması .....	36
3.1.7. OFET Yapıları ve İletkenliğe Etkileri .....	37
3.1.8. Elektrik Alana ve Sıcaklığa Bağlı Mobilite .....	38
3.1.9. Kanal Uzunluğu Modülasyonu .....	38
3.1.10. Literatür Karşılaştırma.....	41
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	43
5. SONUÇ .....	44
6. KAYNAKLAR .....	45
7. ÖZGEÇMİŞ .....	49

## SİMGELER VE KISALTMALAR

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A	Yüzey Alanı
B	Manyetik Akı Yoğunluğu
$\beta$	Poole-Frenkel Sabiti
$C_i$	Birim Dielektrik Kapasitesi
$\Delta E$	Aktivasyon Enerjisi
E	Elektrik Alan Şiddeti
e	e sayısı
$E_a$	Akseptör Enerji Seviyesi
$E_c$	İletim Bandının Minimumu
$E_d$	Donör Enerji Seviyesi
$E_f$	Fermi Seviyesi
$E_i$	Asal Fermi Seviyesi
$E_{opt}$	Optik Enerji bant Aralığı
$\epsilon_0, \epsilon$	Boşluğun Dielektrik Geçirgenliği
$\epsilon_r, \kappa$	Bağıl Dielektrik Sabiti
$E_v$	Valans Bandının Maksimumu
$f_{cr}$	Siklotron Rezonans frekansı
h	Planck Sabiti
$I_d$	Akaç(Drain) Akımı
J	Akım Yoğunluğu
k	Boltzmann Sabiti
L	Uzunluk, Kanal Uzunluğu
$m^*$	Etkin Kütle
$\mu$	Mobilite
n	Taşıyıcı Sayısı
$n_i$	Asal Taşıyıcı Sayısı
N	Taşıyıcı Yoğunluğu
$N_a$	Akseptör Safsızlık Atom Sayısı
$N_c$	İletim Bandındaki Elektronların Etkin Hal Yoğunluğu
$N_d$	Donör Safsızlık Atom Sayısı
$N_v$	Valans Bandındaki Hollerin Etkin Hal Yoğunluğu

$\phi_F$	Fermi Potansiyeli
$q$	Elektronun Yüğü
$r$	Yarıçap
$\rho$	Özdirenç, Yüğü Yoğunluğu
$\sigma$	İletkenlik
$T$	Mutlak Sıcaklık
$\tau$	İki Çarpışma Arasındaki Ortalama Süre
$v$	Hız
$V_A$	Early Voltajı
$V_{ds}$	Akaç(D)-Kaynak(S) Arası Gerilim
$V_{gs}$	Kapı(G)-Kaynak(S) Arası Gerilim
$V_H$	Hall Voltajı
$V_{th}$	Eşik Gerilimi
$W$	Kanal Genişliği

### **Kısaltmalar**

### **Açıklama**

BGBC	Bottom Gate Bottom Contact
BGTC	Bottom Gate Top Contact
EA	Electron Affinity
HOMO	the Highest Occupied Molecular Orbital
IE	Ionization Energy
IGFET	Insulated Gate Field Effect Transistor
LED	Light Emitting Diode
LUMO	the Lowest Unoccupied Molecular Orbital
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
OFET	Organic Field Effect Transistor
TGBC	Top Gate Bottom Contact
TGTC	Top Gate Top Contact
WF	Work Function

## ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Materyallerin enerji bant aralıkları(Anonim19, 2019) .....	2
Şekil 2.2. a) Direk ve b) direk olmayan enerji bant yapıları(Colinge, 2011) .....	4
Şekil 2.3. Bir yarıiletkende IE, WF, EA (Anonim21, 2019; Anonim8, 2019).....	4
Şekil 2.4. a) $N_c$ , $N_v$ b) $n_i$ sayılarının sıcaklıkla değişimi.....	6
Şekil 2.5. $E_a$ veya $E_d$ seviyeleri(Hu, 2009) .....	7
Şekil 2.6. 4 Prop Tekniği(Anonim9, 2019).....	11
Şekil 2.7. Van der Pauw metodunda kullanılan yapılar(Anonim10, 2019) .....	12
Şekil 2.8. Hall Olayı(Anonim3, 2019).....	14
Şekil 2.9. TOF ile mobilite ölçümü(Anonim1, 2019; Anonim2, 2019).....	15
Şekil 2.10. Siklotron rezonans ile etkin kütle ölçümü(Hu, 2009).....	17
Şekil 2.11. Karbon atomunun orbital enerjileri(Anonim19, 2019).....	19
Şekil 2.12. Bağ yapıcı ve bağ bozucu moleküler orbitaller(Anonim19, 2019) .....	20
Şekil 2.13. Silisyumda hibritleşme(Anonim4, 2019; Anonim6, 2019) .....	20
Şekil 2.14. Karbonda hibritleşmeler(Anonim19, 2019) .....	21
Şekil 2.15. Sigma ve pi bağlarının gösterimi(Anonim14, 2019) .....	21
Şekil 2.16. Eten ve benzende sigma ve pi bağı enerjileri(Anonim14, 2019) .....	21
Şekil 2.17. P orbitallerinin bağ ve antibağ yapısı(Anonim15, 2019).....	21
Şekil 2.18. Karbonun allotropları(Anonim16, 2019; Anonim17, 2019).....	23
Şekil 2.19. Benzen ailesi a) benzen b) naftalin c)anthracene d) tetracene.....	24
Şekil 2.20. Organik materyallerde enerji bant aralığı (Anonim20, 2019) .....	26
Şekil 2.21. a) Amorf b) yarı kristal c) amorf-yarı kristal (Anonim25, 2019) .....	27
Şekil 2.22. a) Molekülde ve katıda enerji bantları b) Jablonski diyagramı .....	27
Şekil 2.23. N tip organik yarıiletkenler.....	28
Şekil 2.24. P tip organik yarıiletkenler .....	28
Şekil 2.25. Organik dielektrik materyaller.....	28
Şekil 3.1. OFET Yapısı(Anonim22, 2019; Anonim26, 2019).....	29
Şekil 3.2. Kontak potansiyelleri ve taşıyıcı hareketi(Newman ve ark., 2004) .....	30
Şekil 3.3. Lineer ve Triode $I_d$ akımı.....	31
Şekil 3.4. OFET I-V karakteristiği.....	32
Şekil 3.5. Eşik gerilimi .....	33
Şekil 3.6. Kapasitör yapısı ve moleküllerin polarize olması .....	34
Şekil 3.7. Frekansa bağlı dielektrik sabiti(Anonim12, 2019).....	35
Şekil 3.8. Azalan dielektrik sabitine göre dielektrik kapasitesi .....	36
Şekil 3.9. Kontaklar arasındaki kapasiteler (Colinge, 2011) .....	36
Şekil 3.10. OFET Yapıları.....	37
Şekil 3.11. Farklı OFET yapılarında I-V karakteristiği(Mittal ve ark., 2016).....	37
Şekil 3.12. Elektrik alana ve sıcaklığa bağlı mobilite.....	38
Şekil 3.13. Kontak potansiyellerine bağlı kanal uzunluğu(Anonim2, 2019).....	39
Şekil 3.14. Kanal uzunluğu modülasyonunun $I_d$ akımına etkisi .....	40
Şekil 3.15. Kanal uzunluğu modülasyonu; normal ve lineer değeri.....	40
Şekil 3.16. Literatürdeki bir OFET yapısı .....	41
Şekil 3.17. Sabit mobilite ile OFET I-V karakteristiği .....	42
Şekil 3.18. Elektrik Alana bağlı mobilite ile OFET I-V karakteristiği .....	42

## 1. GİRİŞ

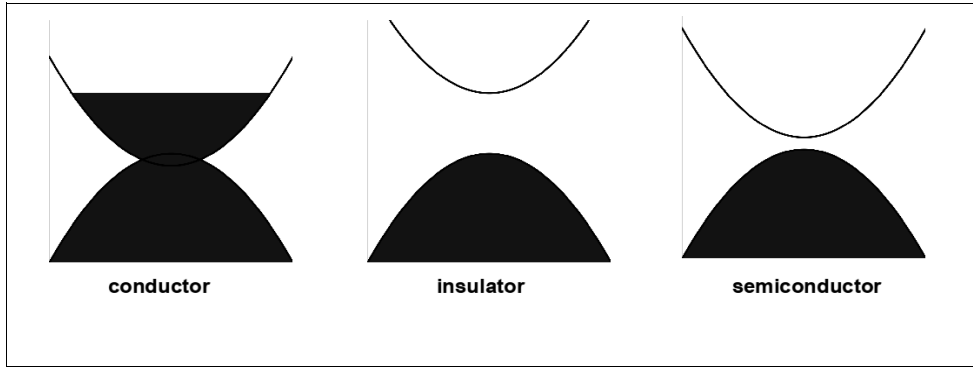
1976 yılında, Alan J. Heeger, Alan Mac Diarmid ve Hideki Shirakawa poliasetileni katkılayarak iletkenliğini metallerin iletkenliğine yaklaştırarak polimerlerin de iletken özellik gösterebileceğini göstermişlerdir. Bu üç arkadaşın yaptığı çalışmalar sonucunda yarıiletken teknolojisi alanında plastik-organik elektronik diye anılan yeni bir kavram ortaya çıkmıştır. Kısa sürede popülerleşen organik elektronik birçok alanda kendini ifade etmiş ve katı(esnek olmayan), pahalı ve çevreye zararlı inorganiklerin yerini almıştır.

Tezin ilk kısmı yarıiletkenlerin temellerine ayrılmış inorganik yarıiletkenlerde kullanılan temel kavramlar açıklanmıştır. İkinci kısımda ise yarıiletkenlerin karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılan teknikler üzerinde durulmuş ve bu spektroskopik teknikler kısa ve net olarak açıklanmaya çalışılmıştır. Ardından üçüncü bölümde ise organik olarak ifade edilen yarıiletkenlere giriş yapılmış, organik ifadesi, organik materyaller ve özellikleri, enerji bant yapıları, atomlar arası bağlanma, hibritleşme gibi kavramlar ele alınmış ve bölüm sonunda en çok bilinen bazı organik materyaller verilmiştir. Dördüncü bölümde ise OFET aygıt yapısına ve akım-gerilim denklemlerine değinilmiştir. Akım-gerilim karakteristiğinin nelerden etkilendiği literatürden de örnekler verilerek açıklanmaya çalışılmıştır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Yarıiletkenlere Giriş

Maddeler elektriksel iletkenliklerine göre iletken, yarıiletken ve yalıtkan olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. İletkenlerin ısı ve elektriksel iletkenlikleri çok iyi iken yalıtkanlarınkı ise çok kötü, yarıiletkenlerinki ise iletkenlerin ve yalıtkanların iletkenliklerinin arasında yer almakta ve çeşitli katkılama yöntemleri ile değiştirilebilmektedir.



Şekil 2.1. Materyallerin enerji bant aralıkları(Anonim19, 2019)

Aslında enerji bantları sürekli değildir. Düzeyler arasında  $10^{-14}$  eV enerji farkı bulunur(Özek, 1998). Ama bu seviye farkı değeri yarıiletkenin enerji bant aralığından(Si: 1.12 eV, Ge: 0.67 eV) kat kat küçük olduğu için bantlar sürekli olarak kabul edilir.

Bilindiği üzere elektronlar atom çekirdeğinin çevresinde belli orbitallerde bulunmakta ve her orbitalin belirli bir enerjisi bulunmaktadır. Temel haldeki atom uyarıldığında elektron(valans elektronu) bir üst enerji seviyesine çıkmakta ve önceki yörüngesine dönerken iki enerji düzeyi arasındaki enerji farkının büyüklüğüne eşit değerli bir foton yayınlamaktadır. Bu iki enerji düzeyi arası yasak bölge, bant aralığı, olarak ifade edilmekte ve elektron bu aralıkta bulunamamaktadır.(Sadece belirli enerji düzeylerinde bulunabilir.)

Elektronlar birer fermiyondur ve Fermi-Dirac istatistiğine ve Pauli Dışarlama ilkesine uyarlar. Yani aynı enerji seviyesinde sadece bir fermiyon bulunabilir.

Mutlak sıfırda(0 K) elektronların sahip oldukları enerjinin üst noktası(valans bandının maksimumu) Fermi Enerjisi olarak ifade edilir. Fermi Enerjisi sadece mutlak sıfırda tanımlıdır. Fermi seviyesi ise istatistiksel olarak bir enerji düzeyinin %50 doldurulma olasılığıdır ve sıcaklığa bağlıdır ki sıcaklık artışıyla Fermi seviyesi de yükselir.

Enerjiye bağlı Fermi-Dirac istatistiği:

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)} \quad (1.1)$$

şeklinde verilir ve Fermi-Dirac istatistiği 0-1 aralığındadır.

### **2.1.1. Enerji Bantları: Valans Bandı ve İletim Bandı**

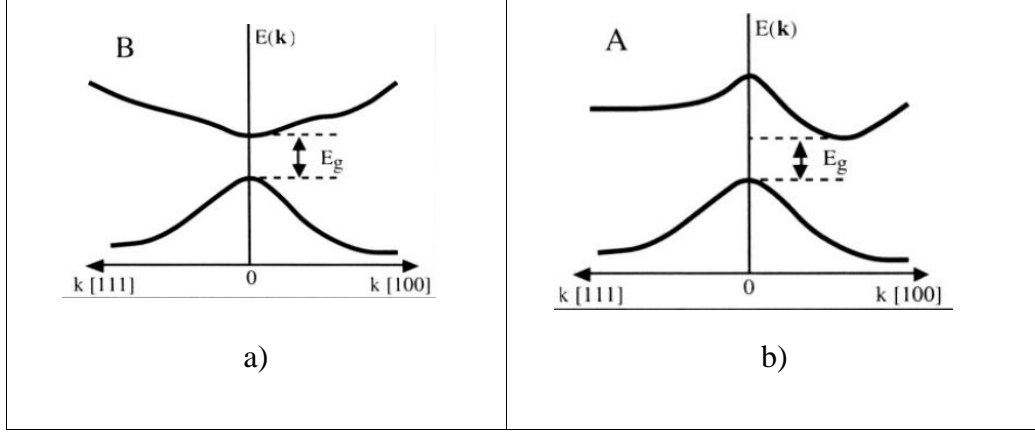
Mutlak sıfırda bütün elektronlar valans bandında( $E_v$ ) bulunur. Sıcaklık artışı ile elektronlar enerji kazanırlar ve yeterli enerjiye sahip elektronlar bant aralığını geçerek iletim bandına çıkarlar. Sıcaklık(~enerji) ne kadar yüksek olursa iletim bandında elektron bulunma olasılığı o kadar yüksek olur. Bir yarıiletkende iletkenliğin sağlanması için iletim bandında elektronlar, valans bandında ise holler bulunmalıdır. Asal(katkılanmamış) yarıiletkende elektron iletim bandına çıkmadan iletkenlik sağlanamaz.

Valans bandının maksimumu  $E_v$  olarak; iletim bandının minimumu ise  $E_c$  olarak kabul edilir. Aradaki bölge ise yasak bölgedir ve enerji bant aralığı olarak ifade edilir ki elektronlar bu aralıkta bulunamazlar.

### **2.1.2. Direk ve Direk Olmayan Bant Yapıları**

Vektör uzayında, bir yarıiletkenin valans bandının maksimumu ile iletim bandının minimumu aynı noktada ise yarıiletken direk bant yapılıdır ve optik aygıtların yapımı

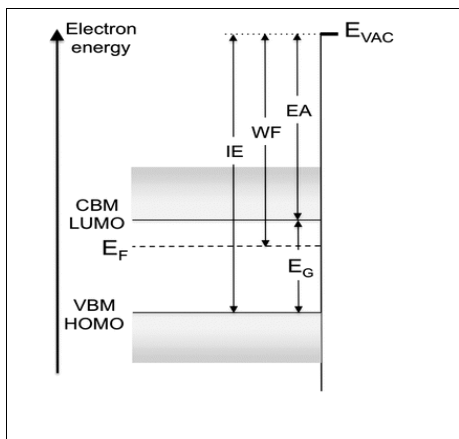
için uygundur. Eğer aynı noktada değilse direk olmayan bant yapılıdır ve optik aygıtlar için uygun değildir. Ayrıca elektron, iletim bandından valans bandına geçerken(rekombinasyon) ışık yerine ısı yayar.



Şekil 2.2. a) Direk ve b) direk olmayan enerji bant yapıları(Colinge, 2011)

Silisyum, Germanyum gibi çok iyi bilinen inorganik yarıiletkenler direk olmayan bant yapılıdır ve diyot, transistör yapımında kullanılır. GaAs, GaN gibi inorganik yarıiletkenler ise direk bant yapılıdır ve optik(led, pv) aygıtlarda kullanılır.

### 2.1.3. İş Fonksiyonu(WF), Elektron Alınanlığı(EA) ve İyonizasyon Enerjisi(IE)



Şekil 2.3. Bir yarıiletkende IE, WF, EA (Anonim21, 2019; Anonim8, 2019)

IE, valans bandından bir elektron koparabilmek için gerekli minimum enerji; WF, Fermi seviyesinden bir elektron koparabilmek için gerekli enerji iken EA iletim bandına bir



elektron ekleyebilmek için gerekli enerjidir. Yani IE ve WF katyon oluşturma ile ilgili, EA ise anyon oluşturma ile ilgilidir. IE, UPS ile EA ise *Electron Attachment Spectroscopy* ya da IPES ile ölçülür. Ayrıca optik bant aralığı da *Absorbtion Spectroscopy* ile ölçülür(Anonim7, 2019; Anonim8, 2019).

#### 2.1.4. Asal Yarıiletkenlerde Fermi Seviyesi ve Asal Taşıyıcı Sayısı

Yarıiletken asal(katkılanmamış) ise toplam elektron sayısı toplam hol sayısına eşittir( $n=p$ ). Fermi seviyesi de enerji bant aralığının tam orta noktasına tekabül eder. Daha doğrusu, çeşitli yaklaşımlarla böyle olduğu kabul edilir.

$$E_f = \frac{E_c + E_v}{2} - \frac{kT \ln\left(\frac{N_c}{N_v}\right)}{2} \quad (1.2)$$

$$E_f = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{3kT \ln\left(\frac{m_h}{m_e}\right)}{4} \quad (1.3)$$

$m_h^* = m_e^*$  kabulü yapılırsa;

$$E_i = \frac{E_c + E_v}{2} = E_v + \frac{(E_c - E_v)}{2} = E_v + \frac{E_g}{2} \quad (1.4)$$

$n$ ,  $p$  ve  $n_i$  sayıları ise fermi-dirac istatistiği ve  $N_v$  ile  $N_c$  sayıları ile bulunabilir.  $N_v$ , valans bandındaki holler için etkin hal yoğunluğu;  $N_c$ , iletim bandındaki elektronlar için etkin hal yoğunluğudur.

$$N_c = \left[ \frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right]^{3/2} \quad (1.5)$$

$$N_v = \left[ \frac{2\pi m_h kT}{h^2} \right]^{3/2} \quad (1.6)$$

Fermi-Dirac istatistiği ve Maxwell-Boltzmann istatistiğine benzetimi;

$$f(e) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_f}{kT}}} = e^{\frac{-(E - E_f)}{kT}} \quad (1.7)$$

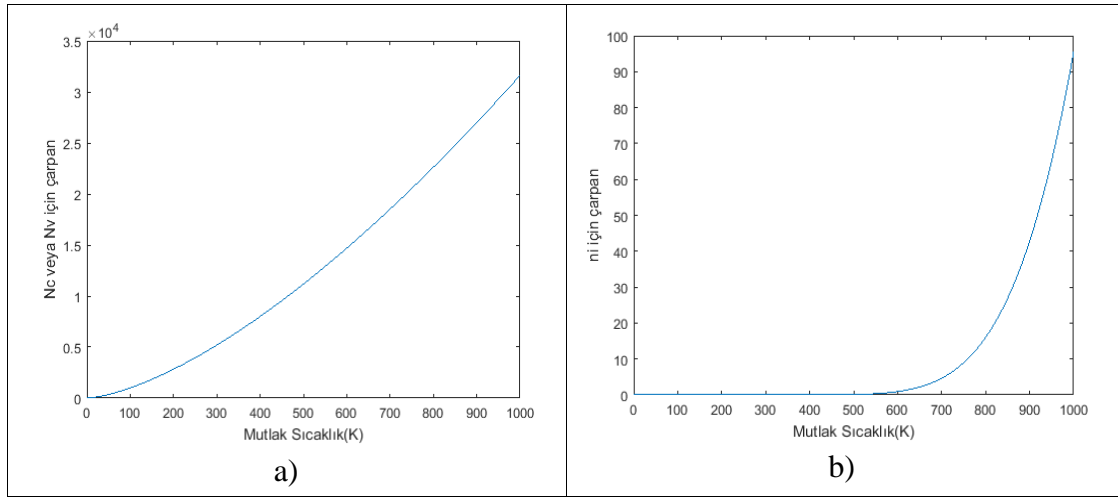
$$f(h) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_f - E}{kT}}} = e^{-\frac{(E_f - E)}{kT}} \quad (1.8)$$

$$n = N_c f(e) \quad (1.9)$$

$$p = N_v f(h) \quad (1.10)$$

$$n_i^2 = np = N_c f(e) N_v f(h) \quad (1.11)$$

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{\left(\frac{-E_g}{2kT}\right)} \quad (1.12)$$



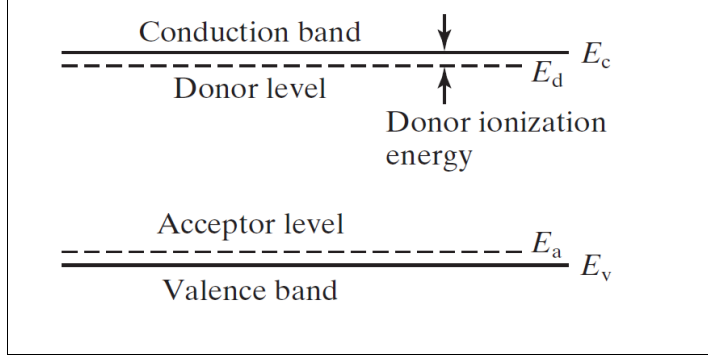
Şekil 2.4. a)  $N_c$ ,  $N_v$  b)  $n_i$  sayılarının sıcaklıkla değişimi

### 2.1.5. Katkılama ile N-Tipi ve P-Tipi Yarıiletken Oluşturma

Asal yarıiletkene, yarıiletken atomlarıyla bağ yaptığında serbest elektron oluşturacak şekilde katkılama yapılırsa n-tipi materyal oluşur. Serbest elektronlar oluştuğu için bu katkılama donör(verici) safsızlıkları ile oluşturulmuş olur. Donör safsızlıklardan gelen elektronlar iletim bandına yakın  $E_d$  adı verilen seviyelere yerleşirler. Çok az bir enerji ile elektronlar  $E_c - E_d$  enerji farkını aşıp iletkenlik bandına çıkarlar. Eğer katkılama yüksek oranlarda yapılırsa  $E_d$  seviyeleri  $E_c$  seviyesinin üstüne çıkar ve yarıiletken dejenere olur. Katkılama miktarı  $N_D$  ile gösterilir(birim  $\text{cm}^3$ 'teki safsızlık atom sayısı).

Eğer yarıiletkene, yarıiletken atomlarıyla bağ yaptığında hol(elektron eksikliği) oluşturacak şekilde katkılama yapılırsa p-tipi materyal oluşur. Holler, elektron eksiklikleri, oluştuğu için bu katkılama akseptör(alıcı) safsızlıkları ile oluşturulmuş olur. Akseptör safsızlıkları  $E_v$  seviyesinin biraz üstünde  $E_a$  adı verilen seviyeler oluşturur.

Valans bandındaki elektronlar çok az bir enerji ile bu enerji seviyelerine çıkarak geride boşluklar(hol) bırakırlar. Oluşan holler elektriksel iletimi sağlar. Katkılama miktarı  $N_A$  ile gösterilir(birim  $\text{cm}^3$ 'teki safsızlık atom sayısı).



Şekil 2.5.  $E_a$  veya  $E_d$  seviyeleri(Hu, 2009)

N-tipi için  $E_d$  seviyesinin, P-tipi için  $E_a$  seviyesinin hesabı hidrojen atomu temel alınarak yapılır. Bu seviyeler farklı element atomları için farklıdır. Boşlukta hidrojen atomundan elektron koparmak için gerekli enerji;

$$E = \frac{m_0 q^4}{8\epsilon^2 h^2} = 13.6 \text{ eV} \quad (1.13)$$

Materyal içinde( $\kappa$  içine katkılama yapılan materyalin bağıl dielektrik sabiti);

$$E = \frac{m_{\text{etkin}} q^4}{8\kappa^2 \epsilon^2 h^2} \quad (1.14)$$

$N_A$  veya  $N_D$  çok yüksek seviyelerde olursa bu materyalin kirlenmesine yol açar. Materyalin birçok parametresini etkiler ve materyal kristalinde düzensizlikler oluşturup elektronun hareketini etkiler.

### 2.1.6. Katkılanmış Yarıiletkenlerde Fermi Seviyesi

N-tipi materyal için fermi seviyesi asal fermi seviyesinin üstündedir. Çünkü yarıiletkene elektron eklenmiş yani toplam elektron sayısı ve elektronların toplam enerjisi artmıştır.

P-tipi materyalde ise asal fermi seviyesinin altındadır. Çünkü yarıiletkenin elektron koparılmış dolaysısı ile toplam elektron sayısı ve elektronların toplam enerjisi azalmıştır.

$$E_f = E_i - q\phi_F \quad (1.15)$$

### 2.1.7. Fermi Potansiyeli

Asal Fermi seviyesi ile fermi seviyesi arasındaki potansiyel farkıdır ( $E_i - E_f$ ). N-tipi materyalde  $E_f > E_i$  olduğu için fermi potansiyeli negatiftir. P-tipi materyalde ise  $E_f < E_i$  olduğu için fermi potansiyeli pozitiftir.  $\phi_F$ , sıcaklığa ve katkılama miktarına bağlıdır.

$$\phi_F = \frac{-kT}{q} \ln \left( \frac{N_D}{n_i} \right) \quad (1.16)$$

$$\phi_F = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_A}{n_i} \right) \quad (1.17)$$

### 2.1.8. Akım Yoğunluğu, İletkenlik ve Mobilite

Bir iletkenin sürüklenme akım yoğunluğu;

$$J = nqv_e + pqv_h = nq\mu_e E + pq\mu_h E = \sigma_e E + \sigma_h E \quad (1.18)$$

İletkenlik;

$$\sigma_e = nq\mu_e \quad (1.19)$$

$$\sigma_h = pq\mu_h \quad (1.20)$$

mobilité;

$$\mu_e = \frac{q\tau}{m_e} \left( \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \right) \quad (1.21)$$

$$\mu_h = \frac{q\tau}{m_h} \left( \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \right) \quad (1.22)$$

Mobilite, taşıyıcıların hareketliliği ile ilgili bir kavram olup yukarıdaki eşitlikler mobilitenin sadece büyüklüğünü verir. Mobilitenin birimi ise  $\mu=v/E$  eşitliğinden gelir. Böylelikle mobilite, birim elektrik alana düşen taşıyıcı hızı olarak nitelendirilebilir.

Bir metalde valans bandı ve iletim bandı çakışık olduğu için elektronların zaten iletim bandında olduğu varsayımı yapılabilir ve metale enerji verildikçe (sıcaklık arttırıldıkça) taşıyıcı sayısı değişmezken elektronların kinetik enerjileri arttığı için hızları da artar. Dolayısı ile çarpışma süreleri azalır bu da mobilitenin azalmasına yani iletkenliğin düşmesine neden olur. Yarıiletkenlerde ise sıcaklık arttıkça daha fazla elektron valans bandından iletim bandına geçer. Taşıyıcı sayısındaki artış mobilite azalmasından kat kat yüksektir ve böylece yarıiletkenlerin iletkenlikleri artmış olur. Sonuç olarak sıcaklık artışıyla metallerin iletkenlikleri düşerken yarıiletkenlerinki artar. Tabi bu durum belli bir sıcaklığa kadar devam eder.

## 2.2. Spektroskopik Yöntemler

### 2.2.1. İletkenlik Ölçümleri

İletkenlik ölçümü en basit şekliyle düzgün geometrili, uzunluğu ve kesit alanı bilinen materyaller için materyalin her iki tarafına kontak yapıp bir elektrik potansiyeli uygulanarak bulunabilir. Kontaklara bir elektrik potansiyeli uygulandığında materyal üzerinde bir gerilim düşümü meydana gelir. Bu gerilim düşümü bir voltmetre ile ve materyal üzerinden geçen akım da bir ampermetre ile ölçüldüğünde Ohm Kanununa( $V=I R$ ) göre materyalin direnci kolaylıkla hesaplanabilir.

$$R = \frac{V}{I} = \frac{\rho L}{A} = \frac{L}{\sigma A} \quad (2.1)$$

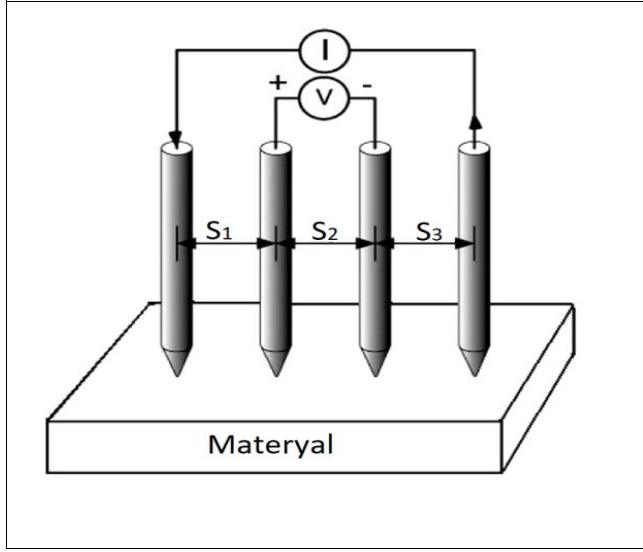
$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (2.2)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.3)$$

eşitlikleri yardımıyla numunenin öz direnci dolayısıyla iletkenliği kolaylıkla hesaplanabilir.

### 2.2.2. 4 Prop Tekniği

Yarıiletkenlerde öz direnç ölçümünde kullanılan yaygın metotlardan biridir. Düzgün geometrili bir materyal üzerine dört prop yerleştirilir. Dıştaki proplar ile materyale bir elektriksel potansiyel uygulanır. Materyal üzerinden geçen akım bir ampermetre ile ölçülür. İçteki proplar ile de materyal üzerindeki gerilim düşümü bir voltmetre ile ölçülür. Ölçümler sonucunda öz direnç;



Şekil 2.6. 4 Prop Tekniği (Anonim9, 2019)

$$\rho = \frac{2\pi V}{I \left[ \frac{1}{s_1 + s_3} - \frac{1}{s_1 + s_2} - \frac{1}{s_2 + s_3} \right]} \quad (2.4)$$

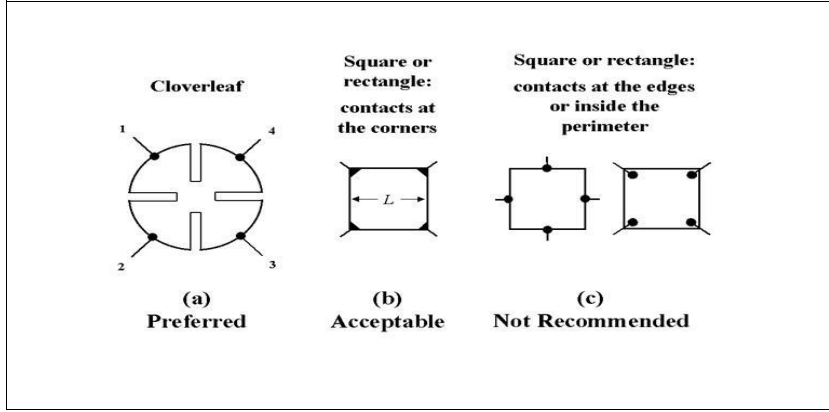
özel olarak  $s_1 = s_2 = s_3 = s$  durumu için;

$$\rho = \frac{2\pi s V}{I} \quad (2.5)$$

eşitliği ile öz direnç dolayısı ile iletkenlik kolaylıkla bulunabilir.

### 2.2.3. Van der Pauw Metodu

Düzgün geometrisi olmayan yarıiletkenlerde özellikle MBE tekniği ile büyütülmüş yapılarda sıklıkla kullanılır (Aydoğan, 2015).



Şekil 2.7. Van der Pauw metodunda kullanılan yapılar(Anonim10, 2019)

En iyi sonuç yonca yaprağı şeklindeki numuneden elde edilir. Ancak pratikte kolaylığından dolayı kare şekli tercih edilir.  $R_S$  karakteristik direnci 2 farklı direnç ölçümü( $R_A$  ve  $R_B$ ) yapılarak bulunur.  $R_A$  direncini bulmak için 1. ve 2. kontak kullanılarak materyal üzerinden bir elektrik akımı geçirilir. 3. ve 4. kontaklar üzerinden ise potansiyel farkı ölçülür.

$$R_A = \frac{V_{43}}{I_{12}} \quad (2.6)$$

eşitlik 2.6 ile direnç hesabı yapılır. Sonra 2. ve 3. kontaklar üzerinden de bir elektrik akımı geçirilerek 1. ve 4. kontaklar üzerinden de bir potansiyel farkı ölçülür.

$$R_B = \frac{V_{14}}{I_{23}} \quad (2.7)$$

eşitlik 2.7 ile direnç hesabı yapılır. Karakteristik direnç  $R_S$  ise;

$$\frac{1}{\ln(\pi R_A + \pi R_B)} \quad (2.8)$$

eşitlik 2.8 ile hesaplanır. Özdirenç ise numune kalınlığı  $d$  ile karakteristik direncin çarpımıyla elde edilir ( $\rho = R_S d$ ).

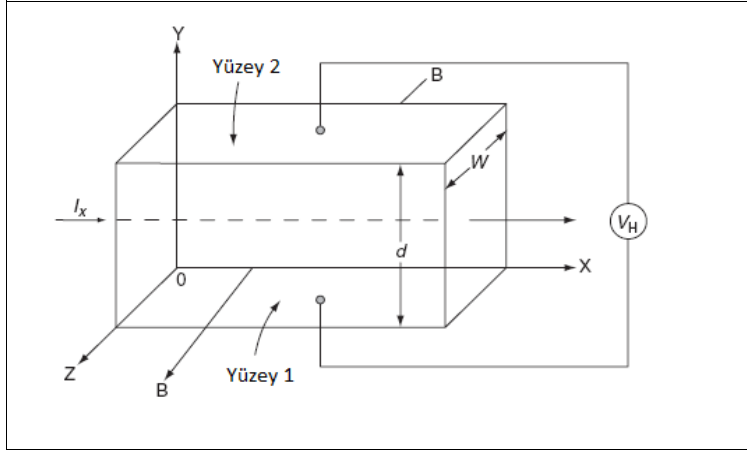


#### **2.2.4. Sıcak Prop Tekniği ile Taşıyıcı Tipi( N – P ) Belirleme**

Materyal üzerine 2 prop yerleştirilir. Bu proplardan biri sıcak diğeri ise soğuktur. Materyal içerisindeki taşıyıcılar sıcak prop tarafından soğuk prop tarafına doğru hareket etmeye başlar. Eğer materyal içerisindeki çoğunluk taşıyıcılar elektronlar ise, sıcak prop tarafındaki elektronlar sıcak proptan uzaklaşarak geride holleri bırakırlar ve soğuk prop tarafında yoğunlaşırlar. Böylelikle sıcak prop tarafı pozitif, soğuk prop tarafı ise negatif yüklenmiş olur. Eğer materyal içerisindeki çoğunluk taşıyıcılar holler ise, sıcak prop tarafındaki holler, soğuk prop tarafındaki elektronlar ile doldurulur. Böylelikle sıcak prop tarafı negatif, soğuk prop tarafı ise pozitif yüklenmiş olur. Proplar üzerindeki elektriksel potansiyel bir voltmetre ile ölçülürse polarite yardımıyla taşıyıcı tipi belirlenmiş olur.

#### **2.2.5. Hall Olayı**

Yarıiletkenlerin mobilitelerini ve taşıyıcı konsantrasyonunu(ayrıca taşıyıcı tipi) ölçmede kullanılan en yaygın yöntemdir. Materyal üzerine kontak yapılarak bir elektriksel potansiyel uygulanır. Bu elektriksel potansiyel altında elektronlar potansiyel kaynağının (-) kutbundan (+) kutbuna doğru hareket etmeye başlarlar. Tam tersi yönde ise elektrik akımı ve elektrik alan oluşur(pozitiften negatife doğru). Oluşan elektrik alana dik olacak şekilde materyale bir de manyetik alan etki ettirilirse; taşıyıcılar Lorentz kuvveti adı verilen ve hem elektrik alana hem de manyetik alana dik olan kuvvete maruz kalır. Böylelikle materyalin bir yüzeyi pozitif diğer yüzeyi negatif yüklenmiş olur(ikinci bir elektrik alan oluşur.). Bu iki yüzey arasındaki gerilim farkı(Hall Voltajı) ölçülerek numunenin mobilitesi ve taşıyıcı konsantrasyonu hesaplanır.



Şekil 2.8. Hall Olayı(Anonim3, 2019)

Elektronların her iki kuvvetin dengesinde olduğu durum için ( $\rho$  yük yoğunluğu olmak üzere);

$$qE=qvB \quad (2.9)$$

$$E= vB \quad (2.10)$$

$$V_H=Ed= vBd \quad (2.11)$$

$$J=nq\mu E=nqv=\rho v=\frac{I}{wd} \quad (2.12)$$

$$v=\frac{J}{\rho}=\frac{\frac{I}{wd}}{\rho}=\frac{I}{wd\rho} \quad (2.13)$$

eşitlik 2.11’de v yerine eşitlik 2.13 yazılırsa;

$$V_H=Ed= vBd=\frac{I}{wd\rho} Bd=\frac{BI}{\rho w} \quad (2.14)$$

eşitliği elde edilir. Hall katsayısı  $R_H=1/\rho$  olmak üzere;

$$V_H=\frac{R_H BI}{w} \quad (2.15)$$

$$R_H=\frac{V_H w}{BI} \quad (2.16)$$

eşitlikleri elde edilir. İletkenliği herhangi bir yöntem ile ölçülmüş bir materyalin mobilitesi bulunmak istenirse;

$$\rho = nq \quad (2.17)$$

$$\sigma = nq\mu_n = \rho\mu_n \quad (2.18)$$

$$\mu_n = \frac{\sigma}{\rho} = \sigma R_H = \frac{\sigma V_H w}{BI} \quad (2.19)$$

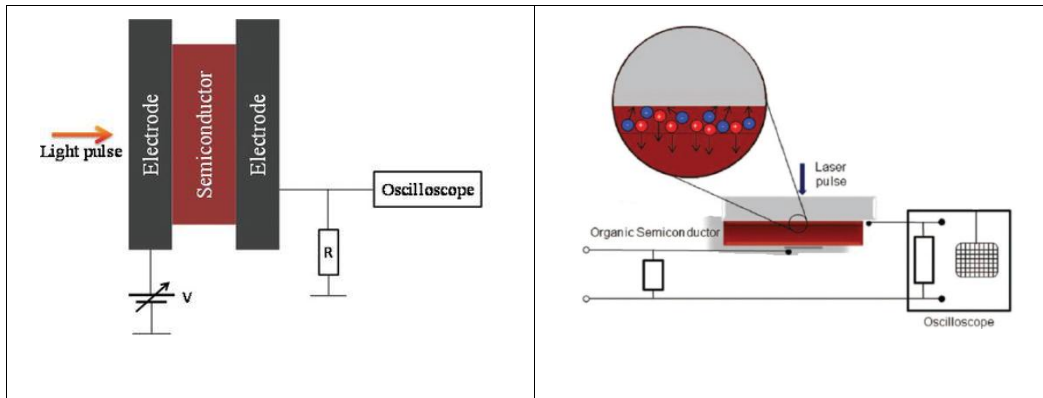
eşitlik 2.19 ile mobiliteler belirlenir. Taşıyıcı konsantrasyonu ise eşitlik 2.20 ile hesaplanır.

$$n = \frac{\sigma}{q\mu} \quad (2.20)$$

### 2.2.6. TOF(Time of Flight)

Organik materyallerin mobilitelerinin ölçülmesinde ilk kullanılan metottür(Anonim2, 2019). Materyal ilk olarak iki elektrot arasında yerleştirilerek bir sandviç yapısı oluşturulur. Elektrodun biri bir doğru akımla beslenir. Tipik olarak uygulanan elektrik alan şiddeti 1-100 V/um civarındadır ve materyal kalınlığı da birkaç mikrometre civarındadır. Elektrotlardan biri bir lazer kaynağıyla(eşit enerjili fotonlarla) karanlık bir ortamda aydınlatılır. Soğurulan ışık enerjisi ile eksitonlar elektron ve hole ayrılır ve oluşan elektronlar ile holler karşıt elektrotlara doğru hareket eder. Oluşan akımın zamana bağlı değişimi incelenerek mobiliteler hesaplanır.

$$\mu = \frac{v}{E} = \frac{d}{Et} = \frac{d^2}{Vt} \quad (2.21)$$



Şekil 2.9. TOF ile mobiliteler ölçümü(Anonim1, 2019; Anonim2, 2019)

### 2.2.7. UPS (Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy)

Materyalin iyonizasyon enerjisini belirleyebilmek için vakum ortamında materyal üzerine 5-100 eV enerji aralığında morötesi fotonlar gönderilir. Materyal üzerine düşen fotonlar valans bandından elektron koparır. ( $N > (N-1)$  elektron) Kopan elektronların enerjisi ölçülerek materyalin valans bandının maksimumu bulunabilir.

### 2.2.8. IPES (Inverse Photoemission Spectroscopy)

Materyalin elektron alınganlığını belirleyebilmek için materyal vakum ortamında elektron bombardımanına tabi tutulur. Elektronlar materyalin iletim bandının minimumundan başlayarak materyale bağlanırlar. Enerjilerinin kalanını ise foton olarak yayınlırlar. Yayınlanan fotonların enerjisi ölçülerek iletim bandının minimumu bulunabilir.

UPS ve IPES kullanılarak materyalin enerji bant aralığı;

$$E_{\text{transport}} = E_{\text{opt}} + E_{\text{binding}} \quad \text{Katı (Kristal)} \quad (2.22)$$

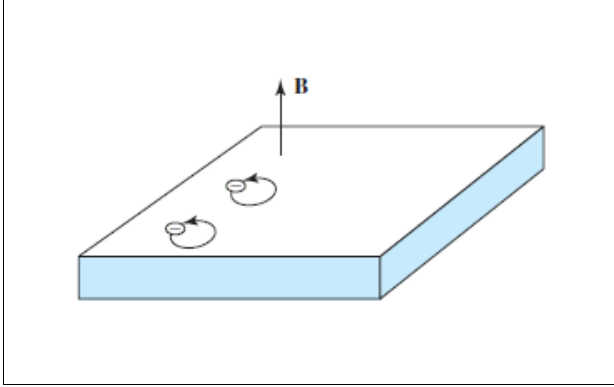
$$E_{\text{fundamental}} = E_{\text{opt}} + E_{\text{binding}} \quad \text{Organik Molekül} \quad (2.23)$$

$$E_{\text{transport}} = IE - EA \quad (2.24)$$

$$E_g = E_{\text{fundamental}} = IE - EA \quad (2.25)$$

### 2.2.9. Siklotron Rezonans (Cyclotron Resonance) ile Etkin Kütle Hesabı

Etkin kütle mobilitiyi ve asal taşıyıcı sayısını ( $n_i$ ) doğrudan etkileyen bir etkendir. Artışı ile mobilite azalmakta iken asal taşıyıcı sayısı artmaktadır. Sıcaklığa bağlı olarak bu azalma ve artma birbirini dengeleyebilir ya da biri diğerine üstün gelebilir.



Şekil 2.10. Siklotron rezonans ile etkin kütle ölçümü(Hu, 2009)

$v$  hızıyla hareket eden bir elektrona bir manyetik alan uygulandığında elektron dairesel hareket etmeye başlar ve bu sadece elektron için değil diğer yüklü parçacıklar için de geçerli bir durumdur. Bu durumda elektrona hem bir merkezci kuvvet( $mv^2/r$ ) hem de manyetik alandan dolayı bir kuvvet( $q v \times B$ ) etki eder. Bu iki kuvvet birbirine eşitlendiğinde;

$$\frac{mv^2}{r} = qvB \quad (2.26)$$

$$v = \frac{qBr}{m} \quad (2.27)$$

$$\omega_{cr} = \frac{v}{r} \quad (2.28)$$

$$f_{cr} = \frac{\omega_{cr}}{2\pi} = \frac{v}{2\pi r} = \frac{qB}{2\pi m} \quad (2.29)$$

Bulunan frekans siklotron frekansıdır ki bu frekans elektronun hızından( $v$ ) ve yarıçapından( $r$ ) bağımsızdır. Materyale  $f_{cr}$  frekansında dairesel polarizeli bir elektrik alan uygulandığında(GHz mertebesinde) elektron bu dalgaları absorbe eder. Absorbe edilen enerji ile elektronun dönme çapı ve hızı artar ve sonra bu elektron bir çarpışma yaparak enerjisinin çoğunu kaybeder ve yine enerji absorblayarak hızını ve dönme çapını artırır. Bu olaylar bu şekilde devam eder; ama elektronun frekansı sabit kalır. Değişen sadece enerjisi olur bu da hızının ve dönme çapının değişmesine neden olur. Eğer farklı bir frekansta elektrik alan uygulanırsa elektron uygulanan enerjinin daha azını absorbe eder(Hu, 2009). İletim bandı için elektronların etkin kütlesi( $m_e^*$ ), valans bandı için ise hollerin etkin kütlesi( $m_h^*$ ) hesaplanır.

## 2.3.Organik Yarıiletkenler

### 2.3.1. Organik Kelimesi ve Organik Bileşikler

Kelimenin kökeni “organizma” kelimesine dayanmaktadır. Organizmaların(canlıların) yapısında temel olarak karbon elementi bulunmakta ve bu nedenden dolayı karbon ihtiva eden bileşikler organik olarak ifade edilmektedir. Bu bileşiklerde karbon atomunun yanı sıra hidrojen, oksijen, azot, fosfor, kükürt, klor, flor gibi elementler de bulunur. Ama bazı bileşikler yapılarında karbon atomu ihtiva etmelerine rağmen organik değildirler. Bileşiğin karbon ihtiva etmesi tek başına yeterli değildir. Bunun yanında karbonun hangi atomlarla bağ yaptığı da önemlidir ve karbonun oksitleri(CO, CO<sub>2</sub>), karbonatları([CO<sub>3</sub>]<sup>+2</sup>), siyanürleri([CN]<sup>-1</sup>), siyanatları([OCN]<sup>-1</sup>) organik değildir. Ayrıca bilindiği kadarıyla karbon atomu başka bir karbon atomuyla ya da hidrojen atomuyla bağ yağmısa bileşik organikdir.

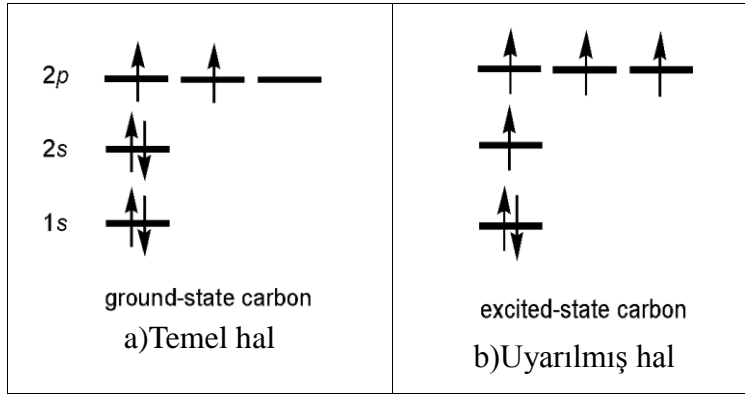
### 2.3.2. Organik Bileşiklerin Genel Özellikleri

- Bütün organik bileşiklerde karbon atomu bulunur.
- Atomlar arasında kovalent bağ, moleküller arasında ise zayıf etkileşimler(Van der Waals Etkileşimleri) bulunur. Bu yüzden erime ve kaynama noktaları düşüktür.
- Genellikle yanıcıdır(halojenli solventler; kloroform:CHCl<sub>3</sub>, perkloretilen vb. yanıcı değildir.).
- Reaksiyon hızları düşüktür. İnorganikler kadar tepkime vermeye yatkın değildirler.
- Suda çözünmezler ya da çok az çözünürler. Çünkü su *polar kovalent bağlı* ve polar bir moleküldür, organikler ise apolar moleküllerdir ve bu yüzden su içinde çözünmezler[polar-polar; apolar-apolar iyi çözünür].
- Kokuları ve renkleri kendilerine hastır yani koku ve renklerine bakılarak tanınabilirler.
- İzomerleşme vardır[cis ve trans izomeri]. Bu izomeri molekülün birçok özelliğinin değişmesine sebebiyet vermektedir.

### 2.3.3. Sigma ve Pi Bağları

Bileşik yapan iki atom arasında ilk oluşan ve kararlılığı yüksek olan bağ sigma bağı, ikinci ve üçüncü sırada oluşan bağlar ise pi bağı olup kararlılıkları daha azdır yani sigma bağına oranla daha az bir enerjiyle kırılabilirler. Sigma bağlarının elektronları lokalize(sabit) iken pi bağlarının elektronları delokalizedir(kolayca hareket edebilirler). İletkenlik de bu delokalize pi bağı elektronları ile sağlanır.

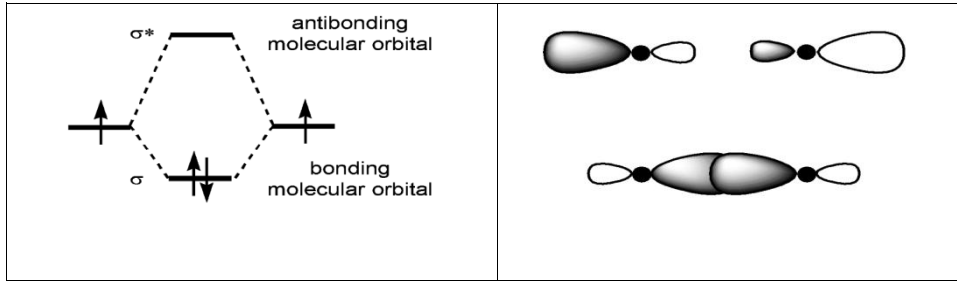
### 2.3.4. Karbon Atomunun Orbital Enerjileri



Şekil 2.11. Karbon atomunun orbital enerjileri(Anonim19, 2019)

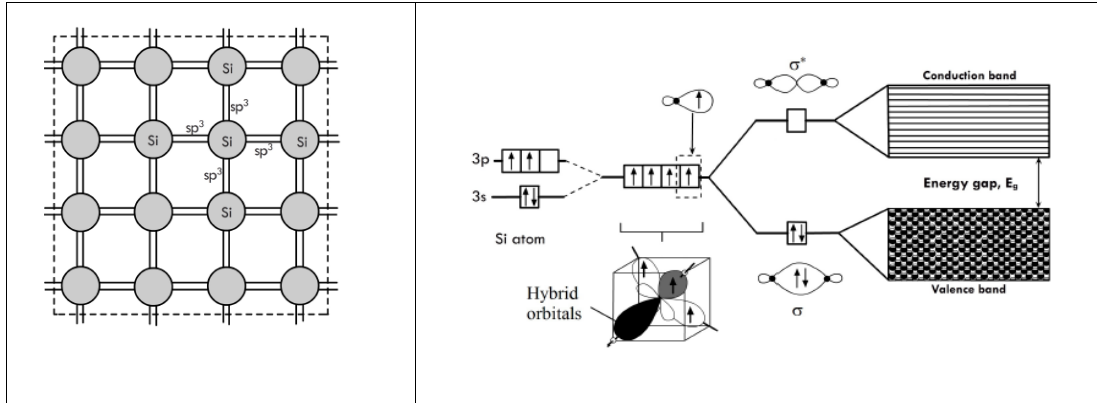
### 2.3.5. Atomik ve Moleküler Orbitaller ve Hibritleşme

İki atom bileşik yaparken valans elektronlarını ortaklaşa kullanırlar(kovalent bağ). Bu ortaklaşma sonucu atomik orbitallerin örtüşmesi ile moleküler orbital olarak adlandırılan yeni orbitaller oluşur. Bu orbitallerden düşük enerjili ve kararlı olan bağ yapıcı orbital; yüksek enerjili ve daha kararsız olan ise antibağ(bağ bozucu) orbital olarak adlandırılır ve ayrıca atomik orbital sayısına eşit sayıda moleküler orbital oluşur. Yani N tane atomik orbital varsa N/2 tane bağ yapıcı, N/2 tane ise bağ bozucu moleküler orbital oluşur(Anonim23, 2019).



Şekil 2.12. Bağ yapıcı ve bağ bozucu moleküler orbitaller(Anonim19, 2019)

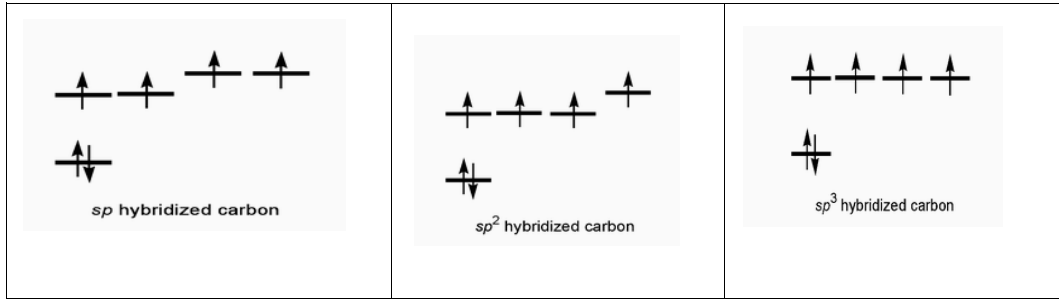
İnorganik yarıiletkenler için de aynı durum geçerlidir. Örnek olarak silisyum atomu  $sp^3$  hibritleşmesi yaparak 4 silisyum atomuyla bağlanır(oktedini tamamlar) ve boşta serbest elektronu kalmaz.



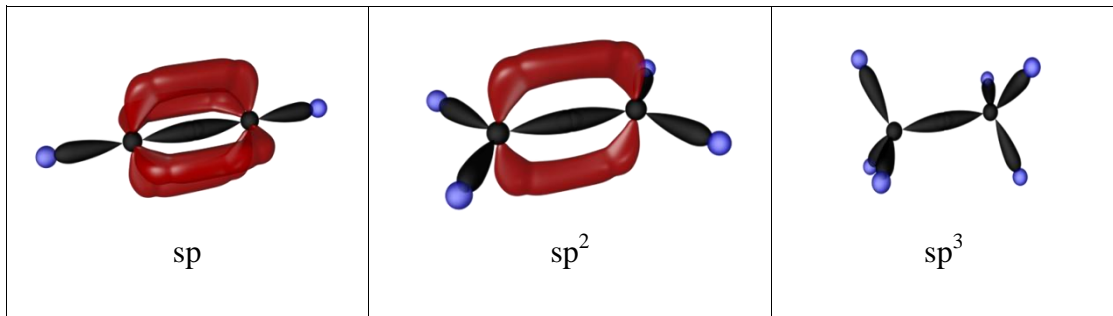
Şekil 2.13. Silisyumda hibritleşme(Anonim4, 2019; Anonim6, 2019)

Karbon atomları  $sp^3$  hibritleşmesi yaparsa molekülde sadece sigma bağları oluşur ve pi bağları oluşmadığı için iletkenlik sağlanamaz. Eğer  $sp$  hibritleşmesi yaparsalar bu kez de uzun bir zincir yapısı oluşmaz. Molekülün bant aralığı çok büyük olur.  $sp^2$  hibritleşmesinde ise hem pi bağları oluşur hem de uzun bir zincir yapısı oluşabilir. Molekülün bant aralığı, moleküldeki atom sayısı ile yakından ilgilidir ki molekülde ne kadar çok atom varsa bant aralığı o denli küçük olur. Tabi bu belli bir mertebeye kadar geçerli bir durumdur.

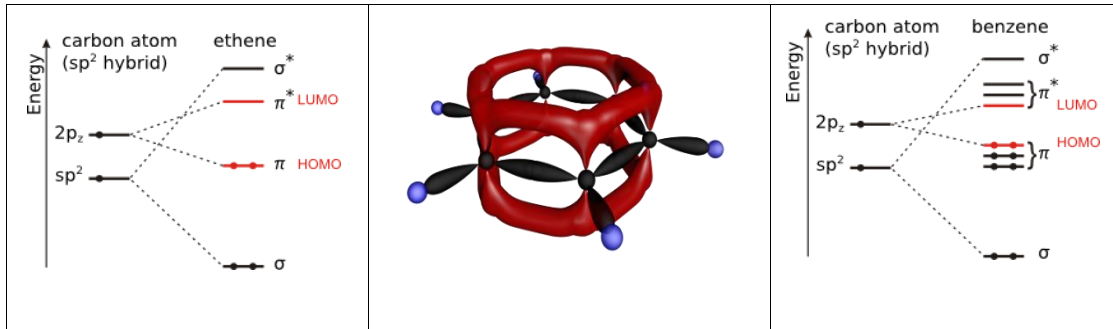




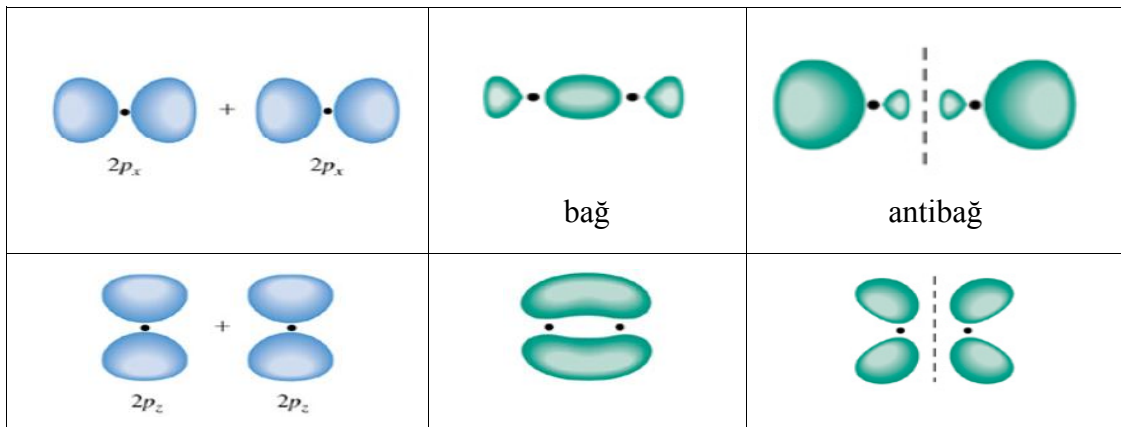
Şekil 2.14. Karbonda hibritleşmeler(Anonim19, 2019)



Şekil 2.15. Sigma ve pi bağlarının gösterimi(Anonim14, 2019)



Şekil 2.16. Eten ve benzende sigma ve pi bağı enerjileri(Anonim14, 2019)



Şekil 2.17. P orbitallerinin bağ ve antibağ yapısı(Anonim15, 2019)

Pz orbitallerindeki elektronlar pi-bağlarını oluştururlar ve bu elektronlar tüm yapıdaki pi bağları tarafından ortaklaşa kullanıldığı için yapı içinde kolaylıkla hareket edebilirler. Elektronların hareketini kısıtlayan en büyük engel bir molekül zincirinden diğer bir molekül zincirine geçmektir. Bir molekülden diğer bir molekül zincirine geçmeleri atlama(hopping) denilen mekanizma ile gerçekleşir ve bu olay mobilite düşümüne yol açmaktadır. Kısaca inorganiklerde elektronlar büyük bir kristal örgüsü içinde hareket ederler ki bu hareketlerini kolaylaştırır ve mobiliteleri yüksek olur, organiklerde ise belli bir kristal yapı olmadığı için elektron hareketi daha zordur. Bu zorluğun üzerinden gelmek için farklı materyaller üzerinde farklı çalışmalar yapılmaktadır.

### **2.3.6. Karbon Atomunun Allotropları-Grafen**

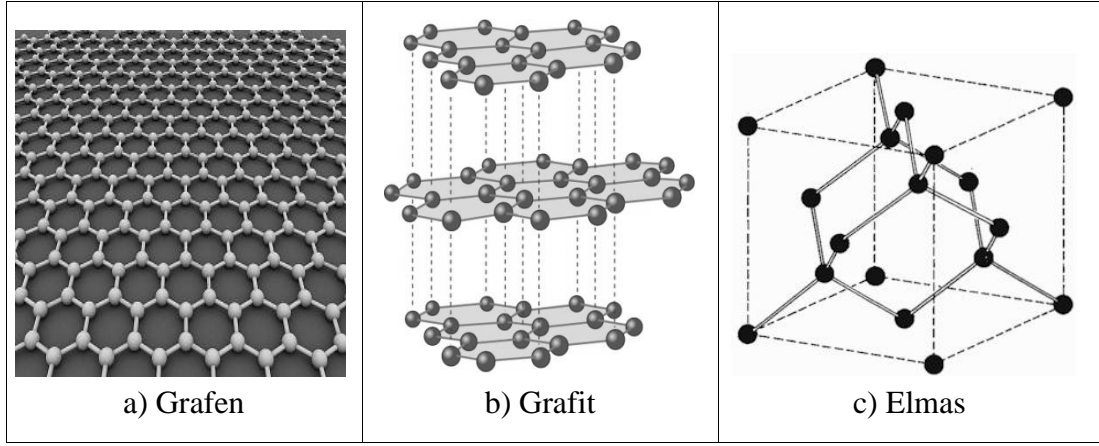
Karbon atomu çok sayıda bağ yapabilmesi nedeniyle birçok farklı molekül oluşturabilir. Bilinen milyonlarca organik molekül vardır. Bunlardan biri de grafendir. Grafende karbon atomları  $sp^2$  hibritleşmesi yaparak tek katmanlı, çok sağlam(çelikten de sağlam) iletken bir katman oluşturur. Bu yapının bant aralığı sonsuz küçük olduğu için sıfır kabul edilebilir. Yapı hegzagonların(bal peteği yapısı) birleşiminden oluşur. Bu yüzden çok sağlamdır. Grafen tabakaları çeşitli şekillerde yuvarlanarak farklı bant aralığına ve iletkenliğe sahip karbon nanotüpler oluşturulabilir.

### **2.3.7. Karbon Atomunun Allotropları-Grafit**

Grafit, grafen tabakalarının üst üste gelmesiyle oluşur. Tabakalar arasında zayıf etkileşimler bulunur(Van der Waals). Yanal olarak iletkenlik çok iyi iken dikey olarak çok kötüdür. Çünkü yanal olarak karbon atomları  $sp^2$  hibritleşmesi yapmışlardır ve burdaki pi bağı elektronları tabakayı iletken yapar; ama dikey yönde sadece zayıf etkileşimler bulunur ve iletkenliğe yardımcı olabilecek bir yapı bulunmaz. Bu nedenle dikey yönde iletkenlik çok kötüdür.

### 2.3.8. Karbon Atomunun Allotropları-Elmas

Elmasta karbon atomlarının  $sp^3$  hibritleşmesi yapmaları nedeni ile elmas iletken değildir. Çünkü iletkenliği sağlayan pi bağı elektronları da hibritleşmeye katılır ve 3 boyutlu tetrahedral bir yapı oluşur. Yani bir karbon atomu 3 boyutlu olarak diğer 4 karbon atomuyla bağlanır ki bu da elması çok sağlam bir yapıya dönüştürür. Elmasın bilinen en sert malzemelerden biri olması da bu nedendir



Şekil 2.18. Karbonun allotropları(Anonim16, 2019; Anonim17, 2019)

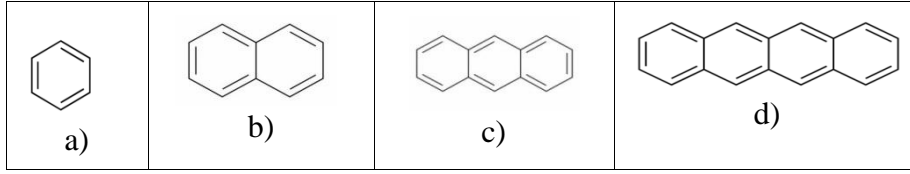
### 2.3.9. Polimerler

Çok sayıda monomerin bir araya gelerek oluşturduğu yapılara polimer denir(poly:çok, mer:birim; polymer: çoklu birimler). Polimerler yapılarında bulunan monomer çeşidine göre ikiye ayrılırlar. Homopolimerlerde tek tip monomer bulunurken kopolimerlerde birden çok tip monomer bulunur. Polimerler genellikle amorf yapıdır bir kısım ise polikristal yapıdır ki bir kristal yapının olmaması ya da çok iyi bir kristal yapının olmaması elektron hareketi açısından çok büyük bir dezavantaj oluşturur.

Polimerlerdeki dizilimler elektronun hareketini etkileyerek mobilite dolayısıyla aygıt karakteristikleri üzerinde önemli değişikliklere sebebiyet vermektedir. Örnek olarak aynı molekül için cis ve trans geometrik izomerlerinde mobilite farklılık göstermektedir.

### 2.3.10. Küçük Moleküller

Küçük moleküller polimerler kadar çok sayıda monomer içermezler. Polimerlerde zincir uzunluğu sabit değildir. Monomer eklendikçe zincir uzunluğu değişir ama polimer aynı polimerdir. Ancak küçük moleküller böyle değildir. Küçük moleküllere yeni bir monomer eklendiğinde başka bir yapı oluşur. Örnek olarak *acene*(benzen) ailesi küçük molekülleri;



Şekil 2.19. Benzen ailesi a) benzen b) naftalin c)anthracene d) tetracene

### 2.3.11. Organik Yarıiletkenler

Bu tür yarıiletkenler karbon tabanlıdır ve canlıların temel yapı elementi karbon olduğu için organik olarak isimlendirilmektedir. Organik yarıiletkenler temel olarak iki kısma ayrılmaktadır. Bunlardan ilki küçük moleküller(pentacene, rubrene gibi), diğeri ise polimerlerdir. Kullanım amacına ve üretim kolaylığına göre kimi üreticiler küçük moleküller üzerine kimi üreticiler ise polimerler üzerine yoğunlaşmışlardır. Organik yarıiletkenlerin ana zinciri üzerinde ardışıl olarak bulunan tekli ve çiftli bağlar bu materyallerde elektrik iletimini sağlamaktadır. Karbon atomlarının  $sp^2$  hibritleşmesi yaptığı bu materyallerde serbest kalan Pz orbitallerindeki elektronlar(pi bağlarını oluşturan elektronlar) elektrik iletimi mekanizmasında görev alırlar.

Organik yarıiletkenler inorganiklerden farklı olarak n tip ve p tip olmak üzere ikiye ayrılır. Bu n ve p tip asal durumdayken geçerlidir. Materyal elektronları kolaylıkla geçirip holleri geçirmiyorsa(elektron ilgisi yüksekse) n tiptir. Tam tersi olarak holleri kolaylıkla geçirip elektronları geçirmiyorsa p tiptir. Ayrıca kontak türüne(kontağın iş fonksiyonuna) bağlı olarak hem n tip hem de p tip olarak davranan materyaller de vardır. Ambipolar olarak adlandırılan bu materyallerin elektron alınganlığı yüksek, iyonizasyon potansiyelleri ise düşüktür(Türkan, 2014). Bunların dışında inorganiklerde yapılan

katkılama işlemleri organiklere de yapılarak n-tipi ve p-tipi materyal oluşturulabilir. Böylelikle iletkenlik yükseltilebilir.

Genel olarak bakıldığında organik yarıiletkenler p tiptir. Yani hol mobiliteleri daha yüksektir. N tipler ise daha azınlıktadır. Çünkü n tip materyallerin elektron ilgileri yüksektir ve hava koşullarından kolaylıkla etkilenebilmektedirler. Bu yüzden çalışmalar genel olarak p tip materyaller kullanılarak yapılmaktadır. Zaten bakıldığında p tip materyaller sayıca n tip materyallerden fazladır ve bilinen en yüksek mobiliteye sahip materyaller yine p tip materyallerdir.

PN diyot, BJT ve CMOS yapılarının organik yarıiletkenlerle gerçekleştirilebilmesi için n tip materyallerin geliştirilmesi üzerine birçok çalışma yapılmaktadır. N tip materyaller suya ve oksijene karşı dayanıklı değildir. Normal ortam koşullarında kararsızdır. Bunun sebebi olarak bu materyallerin LUMO seviyelerinin yüksek olması gösterilmektedir. Kararlı olabilmeleri için LUMO seviye enerjilerinin  $-3.97$  eV'tan küçük olması gerektiği literatürde belirtilmiştir (Anonim2, 2019).

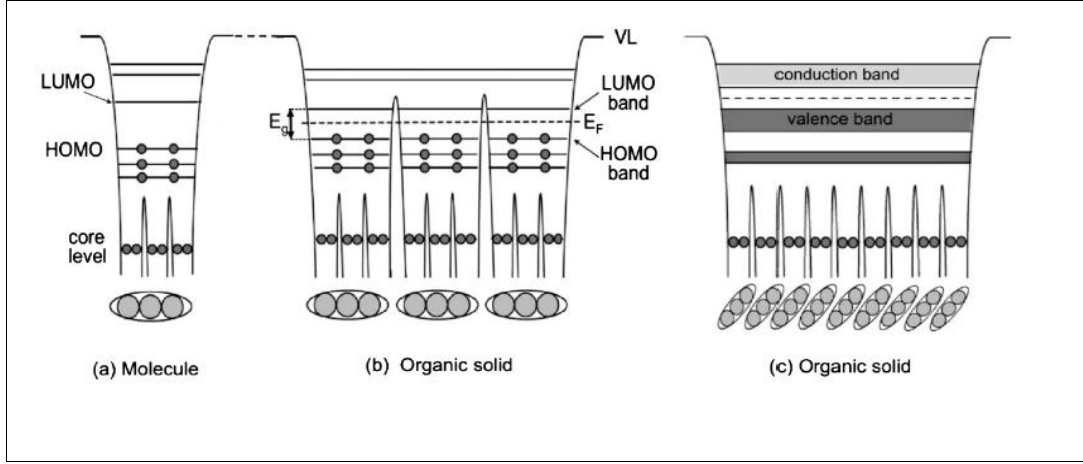
### **2.3.12. Neden Organik Yarıiletkenler**

Silisyum, germanyum gibi materyallerin üretilmesi ve işlenmesi hem pahalıdır hem de zordur. Ayrıca bu materyaller esnek değildir. Organik yarıiletkenler ise esnektir, üretimleri kolaydır, maliyetleri düşüktür ve uygulama alanı olarak çok geniş bir alana sahiptir. Öyle ki OFET, OLED, OPV, sensör, biyosensör, RF etiket. Hatta marketlerdeki gıdalar için tek kullanımlık olarak barkot üretiminde bile kullanılabilirler. 2000'li yılların başında bazı cep telefonlarının ekranlarında kullanılmışken günümüzde esnek yapıya sahip ekranların popüleritesi artmıştır. Özellikle askeri amaçlar için geliştirilmiş, zorlu arazi yapısına uygun esnek ekranlar mevcuttur.

### **2.3.13. Organik Yarıiletkenlerin Enerji Bant Aralığı**

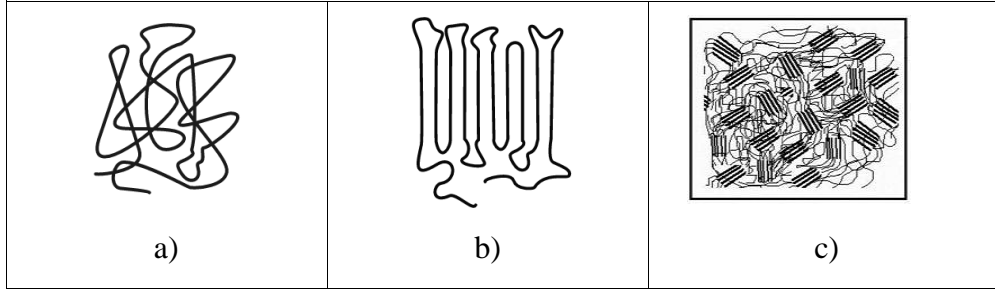
Bir kristal, yapısında yüksek sayıda atom içerir ( $\sim 10^{22}$  atom/cm<sup>3</sup>). Bu kadar yüksek sayıda atomun orbitalleri yan yana geldiğinde bir bant yapısı oluşturur. Bantlar arasında

çok küçük enerji farkları olsa da bantlar sürekli olarak kabul edilir. Organik yarıiletkenler ise inorganik yarıiletkenlere oranla kat kat daha az atom ihtiva ederler(Birçoğu amorf yapılıdır. Yani düzensiz. Bu yüzden birim hacimde daha az atom vardır.). Bant yapısı olarak da inorganiklerden ayrılırlar. Esasen aynı durum bir veya birkaç atomlu inorganik yarıiletkenler için de geçerlidir.



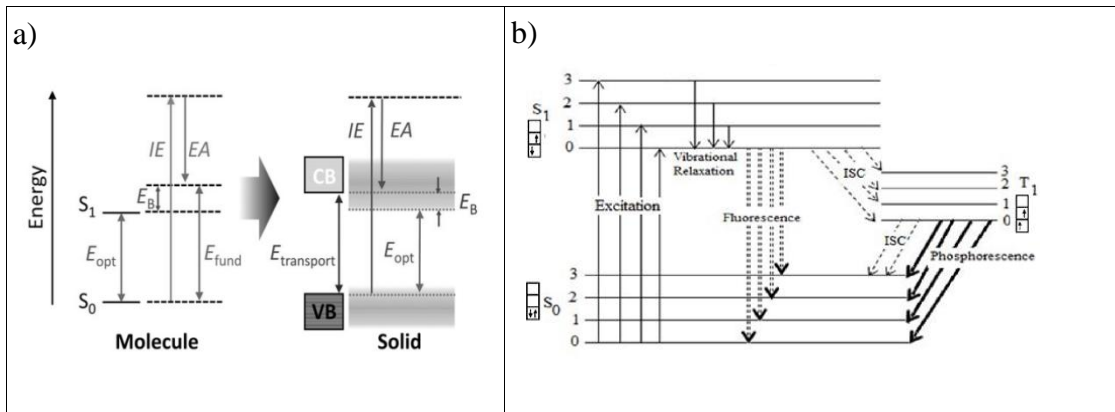
Şekil 2.20. Organik materyallerde enerji bant aralığı (Anonim20, 2019)

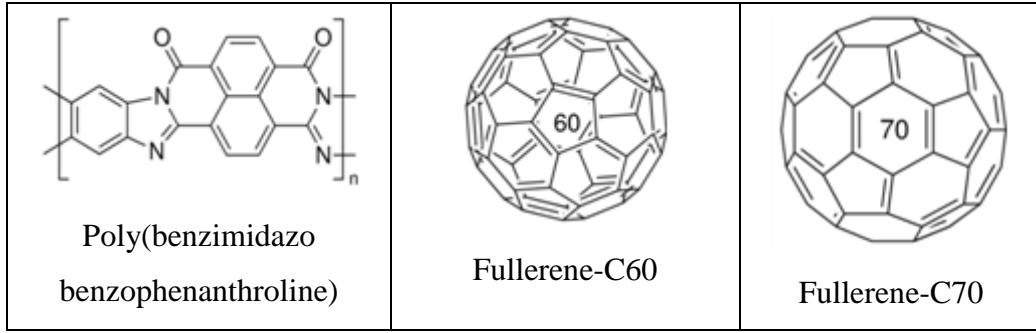
Organik yarıiletkenlerde bantlar, elektronun doldurduğu en yüksek enerjili orbital HOMO(the Highest Occupied Molecular Orbital) ve bir sonraki doldurulmamış orbital LUMO(the Lowest Unoccupied Molecular Orbital) şeklinde adlandırılır. HOMO valans bandı gibi, LUMO ise iletim bandı gibi düşünülebilir. Bu varsayım doğrultusunda aynı bant aralığına sahip organik ve inorganik iki yarıiletken düşünüldüğünde ve bir aygıt üretilmek istendiğinde; aynı çıktıları elde edebilmek için gerekli aygıt boyutu organikler için çok daha büyüktür. Bu durum organik yarıiletkenlerin mobilitelerinin çok çok küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Aradaki oran milyonlar hatta milyarlar mertebesindedir. Bu farkın temel sebebi elektronun hareket mekanizmasıdır. Organiklerde elektron hareketi atlama(hopping) ile açıklanmakta bu atlama olayı mobilitenin düşük olmasına sebebiyet vermektedir.



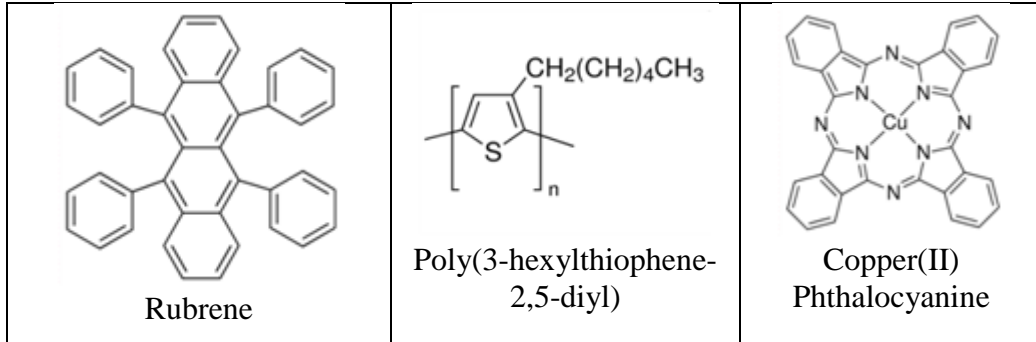
Polimerler genel olarak amorf veya yarı kristal yapılıdır. Çok az polimer ise kristal yapıdadır(%100'e yakın kristalite)(Anonim11, 2019).

Organik-inorganik yarıiletken farklarından bir diğeri de bağlanma enerjisidir(*binding energy*). Bağlanma enerjisi bir eksitonu(elektron-hol çifti; quazi bir parçacıktır) elektrona ve hole ayırabilmek için gerekli enerjidir ve inorganik yarıiletkenlerde bu enerji değeri 20-30 meV mertebelerinde iken organik yarıiletkenlerde 0.1-1.4 eV (Aydoğan, 2015) civarındadır yani ihmal edilemeyecek kadar yüksektir. Bu konu daha çok ledler ve güneş pilleri ile alakalıdır. Ama elektrot potansiyellerinin oluşturduğu elektrik alan elektrona ve holü elektrotlara taşıyacak kadar yeterli değilse elektron ve hol tekrar birleşir. Bu da optik aygıtların verimliliğini düşürür.

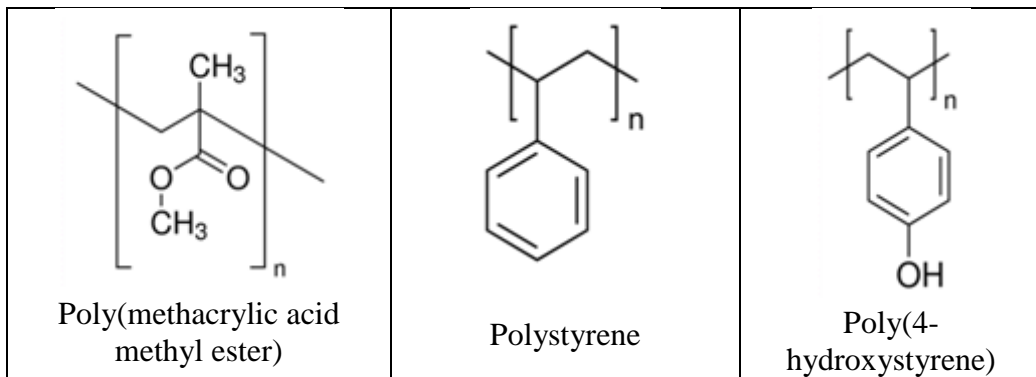




Şekil 2.23. N tip organik yarıiletkenler



Şekil 2.24. P tip organik yarıiletkenler



Şekil 2.25. Organik dielektrik materyaller



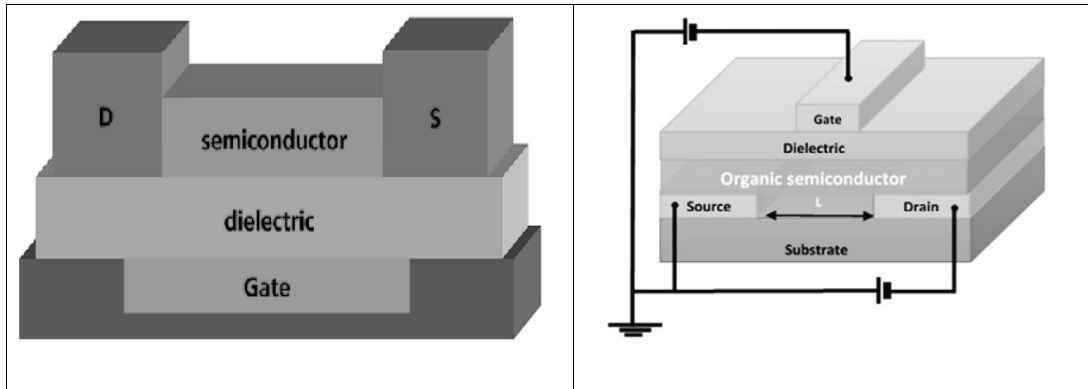
### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. OFET

OFET'ler genel olarak IGFET(Insulated Gate FET) yapısındadırlar ve özel bir IGFET yapısı olan MOSFET'ler ile benzerlik göstermektedirler. Bu yüzden analizleri ve karakteristikleri bir MOSFET'in analizine ve karakteristiklerine benzemektedir.

##### 3.1.1. IGFET, MOSFET-OFET Genel Özellikler

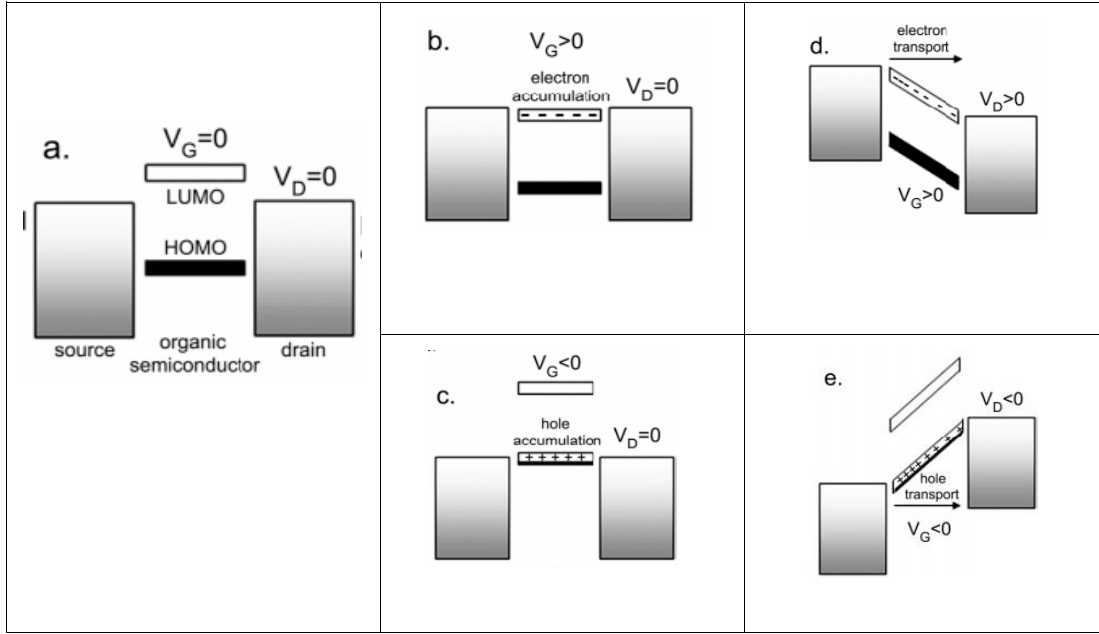
- Gerilim kontrollü elemanlardır. Kapı(Gate) elektroduna uygulanan potansiyelle kanal akımı kontrol edilir.
- Elektriksel iletkenlikte sadece tek tip taşıyıcı rol oynar.
- Giriş empedansları yüksektir. Böylelikle daha az güç harcanarak sürülebilirler.
- Esnek yüzeyler üzerine kaplanabilirler(OFET).
- Bir MOSFET terslenim modunda çalışırken OFET birikim modunda çalışır(Mittal ve Verma, 2016; Meena, 2019; Anonim2, 2019; Anonim27, 2019; Sönmez ve ark., 2017). Birikim modunda yük taşıyıcı tipi, altlığın tipi ile aynıdır. Terslenim modunda ise tersidir. Örnek olarak; MOSFET'te (terslenim modunda) p tip altlık için yük taşıyıcıları elektronlar iken; OFET'te (birikim modunda) yük taşıyıcıları p tip altlık için hollerdir.
- Bir IGFET için önemli parametrelerin başında taşıyıcı mobilitesi, eşik(threshold) voltajı, dielektrik kapasitesi,  $I_{on}/I_{off}$  parametreleri gelir.



Şekil 3.1. OFET Yapısı(Anonim22, 2019; Anonim26, 2019)

### 3.1.2. MIS(Metal Insulator Semiconductor), Kontaklar ve Bant Diyagramları

MIS yapı IGFET(MOSFET/OFET) aygıtlarında kullanılan yapıdır. Kapı kontak, bir dielektrik ile yarıiletkenenden ayrılır ve bir kapasitör yapısı oluşturulur. Kontaklar yarıiletkenin p veya n tip oluşuna göre yarıiletkenin HOMO(valans bandı) ya da LUMO(iletim bandı) enerji seviyesi ile ilişkilendirilir.



Şekil 3.2. Kontak potansiyelleri ve taşıyıcı hareketi(Newman ve ark., 2004)

Kapı elektroduna uygulanan potansiyele göre yarıiletken-dielektrik arayüzüne yakın taşıyıcı birikmesi olur ve akaç ile kaynak elektrotları arasında bir kanal oluşur. Kanalın oluşması tek başına yeterli değildir. Akaç ve kaynak elektrotları arasında da bir potansiyel fark olmalıdır. Bu potansiyel fark ile elektronlar elektrik alanın tersi yönde hareket ederler. Bu bir sıvının akışıyla aynı prensibe sahiptir.

### 3.1.3. OFET Akım-Gerilim Denklemleri

MOSFET'te olduğu gibi OFET'te de 3 çalışma bölgesi vardır. İlki akaç-kaynak arasında herhangi bir akımın akmadığı kesim bölgesi, ikincisi  $I_d$  akımının lineer ya da lineere yakın olduğu omik bölge ki bu bölgeye 3'lü anlamına gelen *triode* bölgesi (kapı, akaç ve kaynak kontaklarının potansiyellerine bağlı olduğu için) de denir. 3. çalışma bölgesi

ise akımın doyuma ulaştığı doyum bölgesidir ve  $V_{ds} \geq V_{gs} - V_{th}$  değerinden itibaren akaç tarafından kanal kısalmaya başlar. Ayrıca bu bölgeye aktif bölge de denir ve FET'ler genelde bu bölgede sürülür. N-kanallı yapı için denklemler;

$V_{gs} < V_{th}$  için  $I_d = 0$ 'dır ve bu bölge kesim bölgesidir.

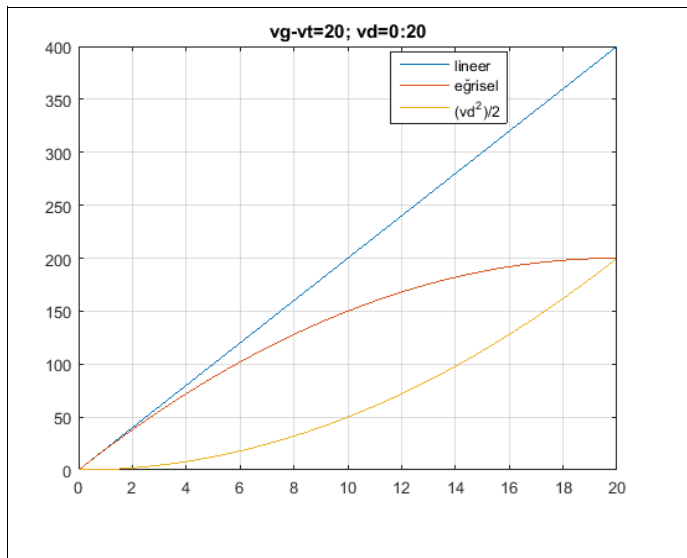
$V_{gs} > V_{th}$  ve  $V_{ds} \ll V_{gs} - V_{th}$  için Omik(lineer) bölge;

$$I_d = \frac{W\mu C_i (V_{gs} - V_{th}) V_{ds}}{L} \quad (4.1)$$

$V_{ds}$  değerinin sıfıra yakın olduğu değerlerde  $I_d$  akımına etkisi çok küçüktür ve lineerliği bozan  $V_{ds} / 2$  ifadesi ihmal edilebilir. Böylelikle  $I_d$  akımı için lineer akım denklemi kullanılabilir. Ama  $V_{ds}$  gerilimi büyüdükçe özellikle değeri 1'den büyük olduğunda ve  $V_{ds} \ll V_{gs} - V_{th}$  şartı da sağlanmıyorsa  $V_{ds} / 2$  değerinin etkisi ihmal edilemez ve  $I_d$  akımı lineer değil eğrisel olur.

$V_{gs} > V_{th}$  ve  $V_{ds} < (V_{gs} - V_{th})$  için Omik (triode) bölge;

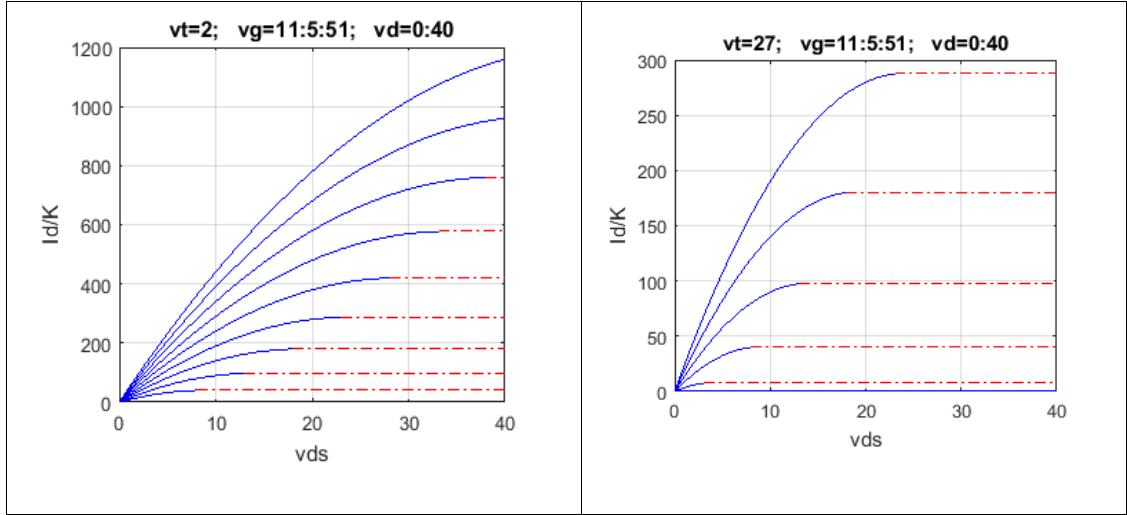
$$I_d = \frac{W\mu C_i \left( V_{gs} - V_{th} - \frac{V_{ds}}{2} \right) V_{ds}}{L} \quad (4.2)$$



Şekil 3.3. Lineer ve Triode  $I_d$  akımı

$V_{gs} > V_{th}$  ve  $V_{ds} > (V_{gs} - V_{th})$  için doyum bölgesidir;

$$I_d = \frac{W\mu C_i (V_{gs} - V_{th})^2}{2L} \quad (4.3)$$

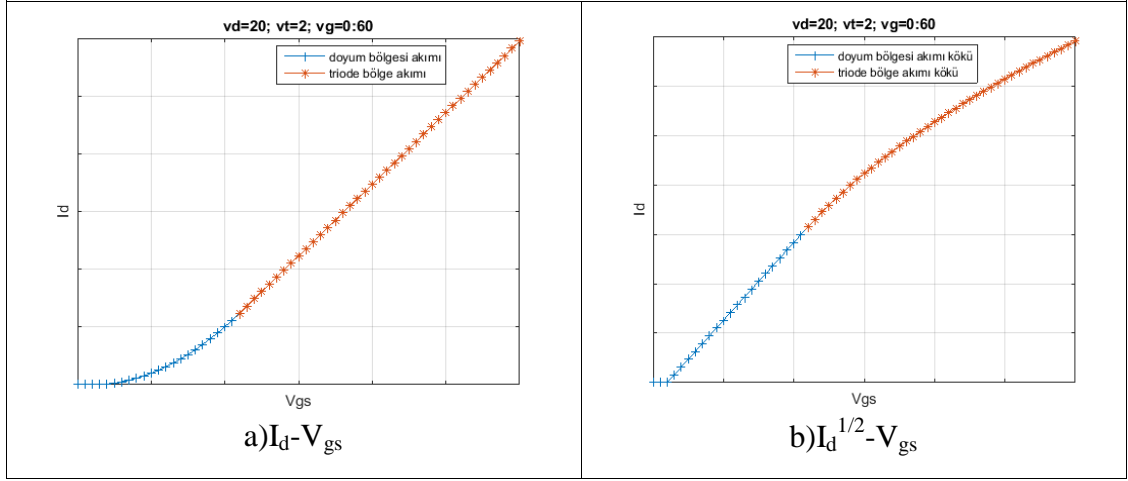


Şekil 3.4. OFET I-V karakteristiği

$V_{gs} = V_{th}$  durumu bilinmeyen kararsız bir durumdur.  $V_{gs} < V_{th}$  durumunda ise  $I_d = 0$  kabul edilmesine rağmen pratikte bir sızıntı akımı mevcuttur ( $I_{off}$ ). Bu akım istenmeyen bir durum olduğu için ne kadar minimize edilirse aygıt o denli verimli olur.

### 3.1.4. Eşik Voltajı

Eşik voltajı metal-yarıiletken bant yapılarını düzleştirmek, dielektrik içindeki tuzak yükleri, dielektrik-yarıiletken yüzeydeki tuzak yüklerin etkilerini ortadan kaldırıp bir kanal oluşturmak için gerekli  $V_{gs}$  gerilimidir. Pratik olarak  $I_d$  akımının köküne karşılık  $V_{gs}$  gerilimi grafiğinde akımın doyumdaki eğiminin  $V_{gs}$  gerilimi eksenini kestiği gerilim değeri olarak kabul edilir.



Şekil 3.5. Eşik gerilimi

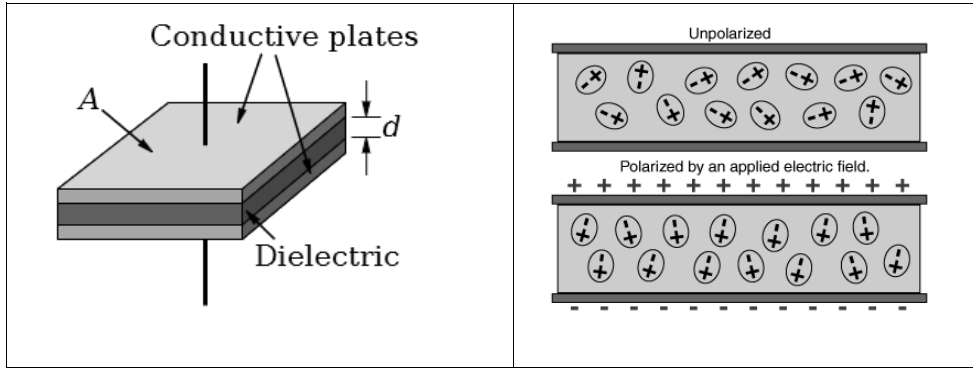
Organik yarıiletkenler için literatürde bahsedilen eşik gerilimi(Horowitz, 1998);

$$V_{th} = \Phi_{ms} \pm \frac{qNd}{C_i} \quad (4.4)$$

olarak tanımlanmıştır. N, taşıyıcı yoğunluğu, d ise yarıiletken materyal kalınlığıdır. Esasen her ne kadar bir eşik gerilimi formülasyonu yapılsa da teori ile uygulama arasında farklılıklar gözlemlenmektedir. Örnek olarak farklı OFET yapılarında eşik gerilimleri de farklı olmaktadır. Özellikle BGBC yapısındaki eşik gerilimi BGTC yapısındaki eşik geriliminden daha yüksek olmaktadır. Bazı OFET'ler ise azaltım tiptir ve bu aygıtlarda kapı potansiyeli 0 bile olsa bir  $I_d$  akımı vardır(*D-MOSFET gibi*).

### 3.1.5. Dielektrik Kapasitesinin Eşik Voltajına ve $I_d$ Akımına Etkisi

Bir IGFET için dielektrik özellikleri son derece önemlidir. Çünkü dielektrik özellikleri dielektrik kapasitesini dolayısıyla eşik voltajını ve  $I_d$  akımını etkiler. Ayrıca dielektrik üzerindeki tuzak yükler de eşik voltajını etkiler. Özellikle organik yarıiletkenlerin mobilitelerinin küçük olması nedeni ile dielektrik kapasitesi olabildiğince yüksek tutulmaya çalışılır. Ayrıca genel olarak bir dielektriğin dielektrik katsayısı ve enerji bant aralığı yüksek olmalıdır. Örnek olarak MOSFET'lerde dielektrik olarak kullanılan  $SiO_2$ 'nin dielektrik katsayısı 3.9, enerji bant aralığı 8.9 eV'tur. Bu dielektrik bazı OFET yapılarında da kullanılmaktadır.



Şekil 3.6. Kapasitör yapısı ve moleküllerin polarize olması

Bir kapasitör yapısının sığası;

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (4.5)$$

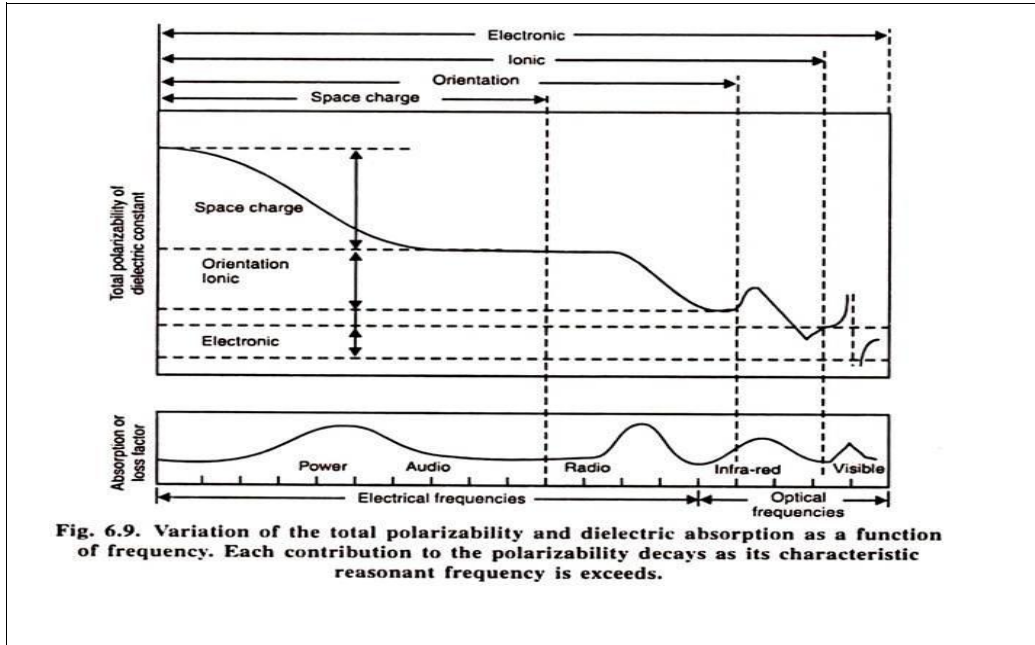
eşitliğiyle verilir.  $\epsilon_r$  değeri(  $\kappa$  olarak da bilinir) belirlenirken aynı kapasitör modeli dielektrik olmadan vakumda test edilir ve kapasitesi ölçülür. Daha sonra kapasitörün içerisine dielektrik yerleştirilerek tekrar kapasitesi ölçülür ve dielektrik bulunan kapasite değerinin dielektrik bulunmayan kapasite değerine oranı  $\epsilon_r$  değerini yani dielektrik sabitini verir.

Sıcaklığa bağlı olarak dielektrik alanı(A) ve d üzerindeki değişmeler ihmal edildiğinde sıcaklık değişimi  $\epsilon_r$  değerini etkiler öyle ki sıcaklık artışıyla  $\epsilon_r$  değeri azalma eğilimindedir. Ayrıca frekans artışıyla da  $\epsilon_r$  değeri azalır ve giderek 1 değerine yaklaşır. Yüksek sıcaklıklarda ve yüksek frekanslarda dielektrik sanki boşlukmuş gibi davranır(dielektrik geçirgenlik boşluğun dielektrik geçirgenliğine eşit olur).

Bir dielektrik malzeme içinde elektronlar serbest halde bulunamaz ve hareket edemez. Sadece elektrik alan ile polarize olabilir. Polarizasyon(kutuplaşma, yönelme) malzemeye bağlı olarak kendiliğinden olabilir ya da elektrik alan etkisiyle oluşturulabilir. Her halükarda bir elektrik alan etkisiyle dielektrik polarize edilir.

Bir dielektrik için 4 farklı etkinin polarizasyona etkisi vardır. Bunlardan ilki elektronik kutuplaşmadır ve yüksek frekanslara kadar etkisini gösterir ancak etkisi çok küçüktür.

Elektrik alan etkisiyle elektronlar elektrik alanın tersi yönde yönelirken çekirdek elektrik alan yönünde yönelir. İkincisi iyonik kutuplaşmadır. Anyonlar(eksi) elektrik alan tersinde yönelirken katyonlar(artı) elektrik alan yönünde yönelir. Üçüncüsü eksi yük merkezleri ile artı yük merkezlerinin çakışmadığı durumlarda kendiliğinden oluşan kalıcı kutuplaşma olan moleküler(yönsel, dipolar, kalıcı) polarizasyondur. Her malzeme için geçerli değildir yani sadece bazı malzemelerde(ferroelektrik) gözlenir. Sonuncusu ise yüzeyler arası(sınır-yük) polarizasyonudur ve elektrik alan ile kutuplara yakın yerlerde yük birikimi olur.



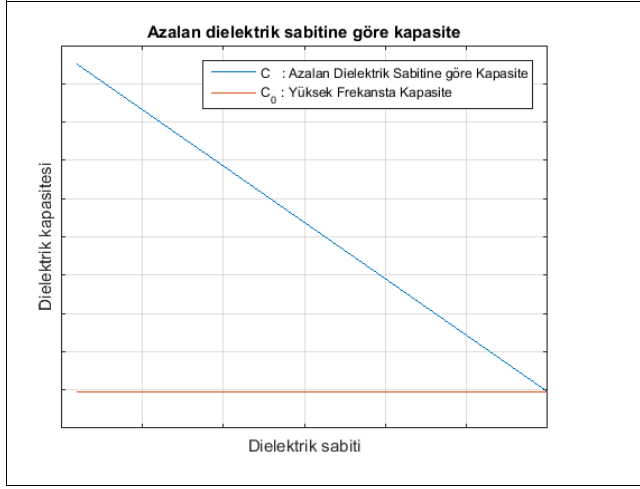
Şekil 3.7. Frekansa bağlı dielektrik sabiti(Anonim12, 2019)

$I_d$  akımını ve eşik geriliminin dielektrik kapasitesi ile değişimi;

$$I_d \propto C_i' \quad (4.6)$$

$$V_{th} \propto \frac{1}{C_i} \quad (4.7)$$

Kapasitenin dielektrik sabitinin azalmasına göre değişimi;

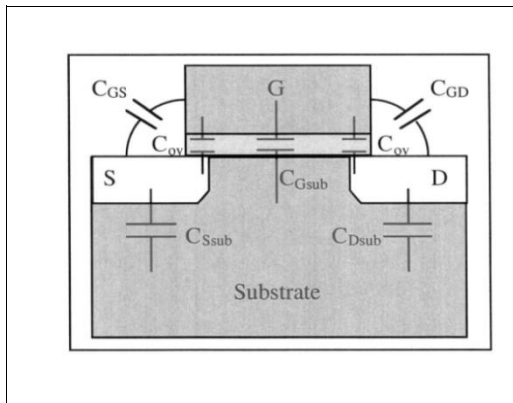


Şekil 3.8. Azalan dielektrik sabitine göre dielektrik kapasitesi

Dielektrik olarak polimerler veya seramikler kullanılabilir. Polimerlerin işlenmesi kolaydır ama; dielektrik sabitleri düşüktür. Seramiklerin ise işlenmesi zorken dielektrik sabitleri yüksektir ( $\sim 10^3$  mertebelerinde). Ayrıca histerezis özelliği yüksek ferroelektrik materyaller ile bellek aygıtları yapılabilir.

### 3.1.6. Kontakların Hizalanması

Bir IGFET, kapasitör yapısında olduğu için yüksek frekanslara çıkıldığında aygıt üzerinde istenmeyen akımlar oluşur ve aygıt verimliliği olumsuz etkilenir, akım veya gerilim kazancı düşer. Bunu engellemek veya minimize etmek için ise kontak hizalamasını düzgün yapmak gereklidir.

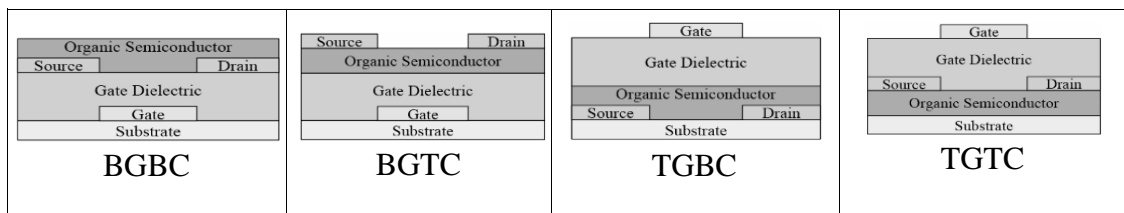


Şekil 3.9. Kontaklar arasındaki kapasiteler (Colinge, 2011)



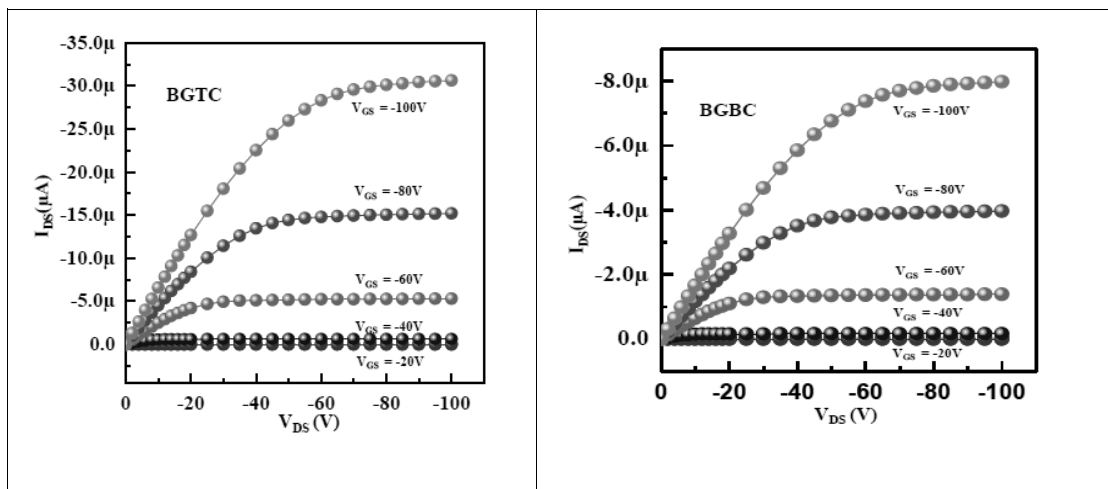
Özellikle kapı elektrodunun hizalaması iyi yapılmalıdır. Elektrodun uzunluğu Akaç-kaynak arası uzaklık(L) kadar olmalıdır. Aksi takdirde kapı elektrodu ile akaç ve kaynak elektrotları arasında ayrı ayrı kapasiteler oluşacak ve yüksek frekanslarda kapasitif empedansın azalmasından dolayı bu elektrotlar arasında istenmeyen akımlar akmaya başlayacak ve aygıt performansı olumsuz etkilenecektir.

### 3.1.7. OFET Yapıları ve İletkenliğe Etkileri



Şekil 3.10. OFET Yapıları

Kullanılacak fabrikasyon tekniğine göre uygun bir OFET yapısı seçilir. Seçilen yapının geometrisi mobilitiyi ve  $I_d$  akımını büyük ölçüde etkiler. Oluşan kanalın yarıiletken/dielektrik arayüzünde olduğu göz önüne alınacak olursa akaç ve kaynak elektrotların kanala yakın olması ve kanal ile maksimum oranda bir alanla etkileşmesi  $I_d$  akımının değerini arttıracaktır. Aksi takdirde yarıiletken direnci ve kontak dirençleri ile  $I_d$  akımı azalacaktır. Bu yüzden BGTC VE TGTC yapıları en çok kullanılan OFET yapılarıdır(Newman ve ark., 2004).



Şekil 3.11. Farklı OFET yapılarında I-V karakteristiği(Mittal ve ark., 2016)

### 3.1.8. Elektrik Alana ve Sıcaklığa Bağlı Mobilite

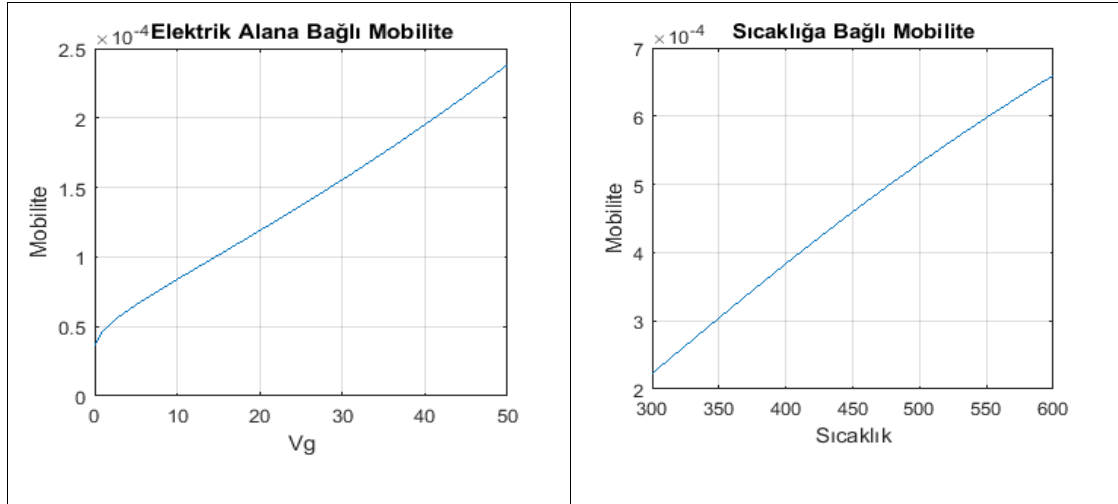
Simülasyon ve ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında bir tutarsızlık gözlemlenmiş, oluşan bu tutarsızlığın mobilitenin elektrik alandan etkilenmesinden dolayı olduğu saptanmış ve elektrik alana bağlı mobilite modeli geliştirilmiştir.

$$\mu_E = \mu_0 \exp\left(\frac{q\beta\sqrt{qE/(4\pi\epsilon)}}{kT}\right) \quad (4.8)$$

$\mu_0$  elektrik alan yokluğundaki mobilite,  $\beta$  ise Poole-Frenkel sabitidir. Elektrik alan şiddeti sıfır olduğunda veya sıcaklık sonsuza gittiğinde  $e^0=1$  ve  $\mu=\mu_0$  olur. Ayrıca sıcaklığa bağlı mobilite modeli;

$$\mu_T = \mu_{T0} \exp\left(\frac{-\Delta E}{kT}\right) \exp\left(\frac{q\beta\sqrt{qE/(4\pi\epsilon)}}{kT}\right) \quad (4.9)$$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_E} + \frac{1}{\mu_T} \quad (4.10)$$



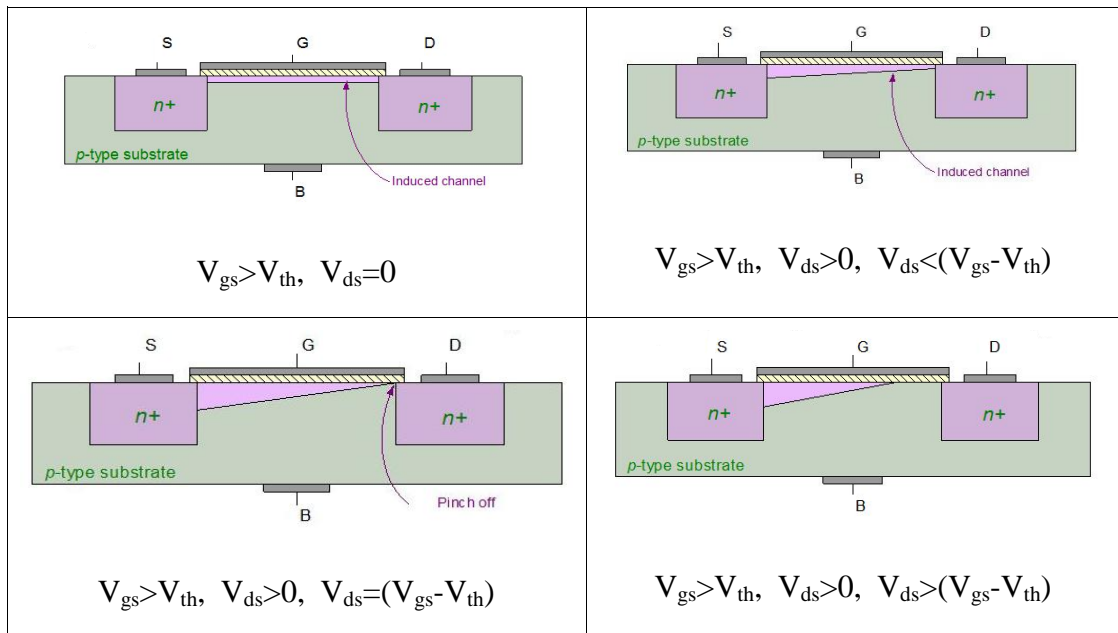
Şekil 3.12. Elektrik alana ve sıcaklığa bağlı mobilite

### 3.1.9. Kanal Uzunluğu Modülasyonu

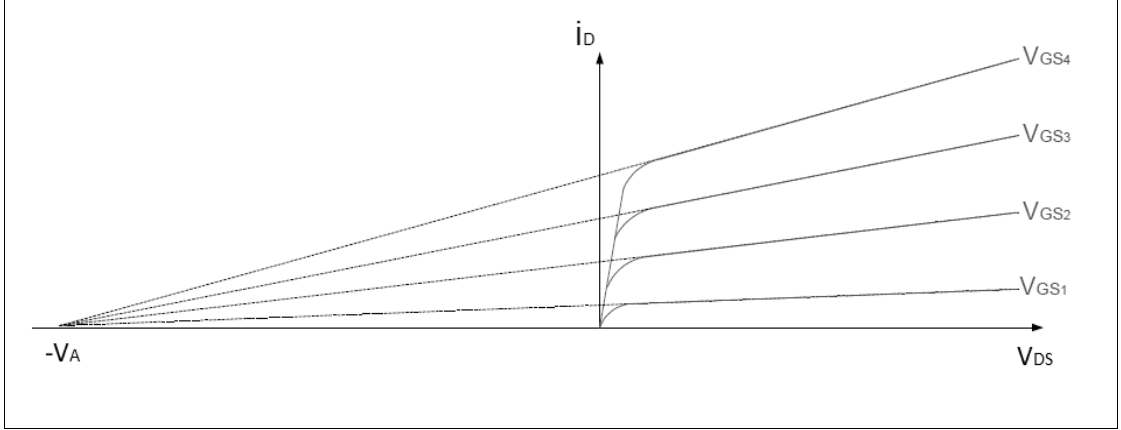
$V_{ds}$  gerilimi  $V_{gs}-V_{th}$  gerilim farkından büyük olduğunda  $I_d$  akımı doyumdadır ve  $V_{ds}$  geriliminden bağımsızdır ama tam anlamıyla bağımsız sayılmaz. Çok az da olsa  $V_{ds}$

gerilimine bağımlılığını korur. Bu kanal uzunluğu modülasyonu olarak adlandırılan bir etkiden dolayı oluşur. Kapı elektroduna uygulanan potansiyel ile akaç-kaynak elektrotları arasında bir kanal oluşturulur. Akaç ve kaynak elektrotlarının potansiyeli sıfır iken kanalın kalınlığı her iki elektrot tarafında da eşittir. Akaç potansiyeli arttırılmaya başlandığında bu kanal akaç tarafında incelmeye başlar.  $V_{ds}$  gerilimi  $V_{gs}-V_{th}$  gerilimine ulaştığında en ince halini alır ve akaç elektrodunun genişliği(W) boyunca akaç elektroduna çizgisel olarak temas eder. Akaç potansiyeli daha da arttırılırsa kanal kısalmaya başlar ve  $\Delta L$  kadar akaç elektrodundan uzaklaşır. Akaç potansiyeli arttırıldıkça  $\Delta L$  miktarı artar ve kanal boyu daha da kısalmaya başlar. Yani kanalın direnci azalır. Aynı potansiyel altında daha büyük bir akım akmaya başlar.

Literatürde  $V_A$ (Early Voltajı) geriliminin MOSFET’lerde 50 volt civarlarında olduğu belirtilmiştir. Bu küçük  $V_{ds}$  gerilimleri için pek fark oluşturmazken büyük  $V_{ds}$  gerilimlerinde fark barizleşir. Öyle ki  $V_{ds}=50$  V iken  $V_{ds}/V_A$  değeri 1 olur ve  $I_d$  akımı ikiye katlanmış( $1 + V_{ds}/V_A$ ) olur(lineerleştirilmiş etki için).  $V_{gs}>V_{th}$ ,  $V_{ds}=0$  şartlarında kanal kalınlığı akaç ve kaynak tarafında aynıdır. Akaç gerilimi arttırıldıkça kanal akaç tarafında incelmeye başlar.  $V_{ds}=(V_{gs}-V_{th})$  olduğunda kanal kalınlığı akaç tarafında sıfır olur ve  $I_d$  akımı doyuma ulaşır. Bu olay  $V_{ds}$  geriliminin kısılma(pinch off) gerilimine eşit olduğu değerde( $V_{gs}-V_{th}$ ) başlar. Bu değerden sonra ise kanal kısalmaya başlar.



Şekil 3.13. Kontak potansiyellerine bağlı kanal uzunluğu(Anonim2, 2019)

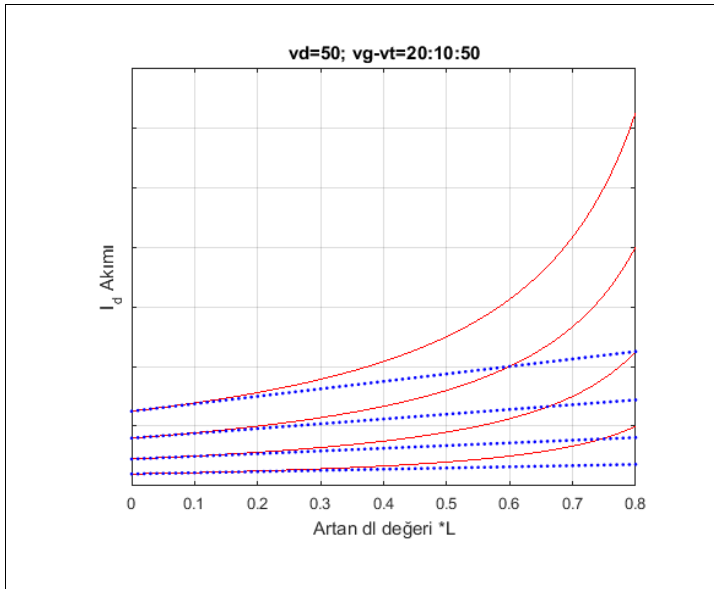


Şekil 3.14. Kanal uzunluğu modülasyonunun  $I_d$  akımına etkisi

Eşitlik 4.3'te verilen doyum akımı; kanal uzunluğu modülasyonuna göre düzenlenirse;

$$I_d = \frac{\mu C_i W (V_{gs} - V_{th})^2}{2(L - \Delta L)} \quad (4.11)$$

olur.  $L - \Delta L$  ifadesi  $L$  parantezine alınırsa doyum akımı  $(1 - \Delta L/L)^{-1}$  ifadesiyle çarpılmış olur. Bu ifade lineerleştirilirse; çarpan,  $(1 + \Delta L/L)$  şeklini alır.  $\Delta L$ ,  $L$ 'ye yaklaşırken  $(1 + \Delta L/L)$  ifadesi 2'ye yaklaşır. Oysaki  $(1 - \Delta L/L)^{-1}$  ifadesi ise sonsuza gider.

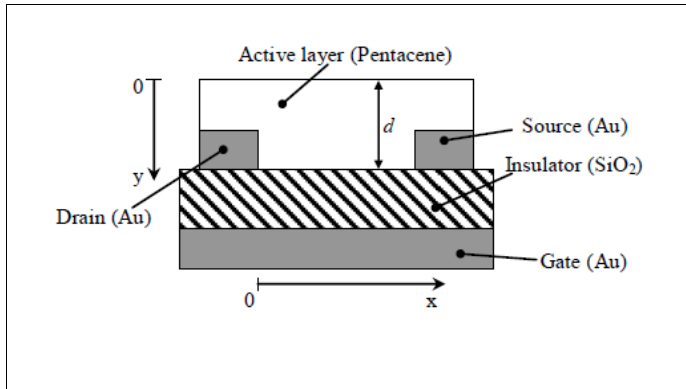


Şekil 3.15. Kanal uzunluğu modülasyonu; normal ve lineer değeri

Lineerleştirme doğru bir yaklaşım değildir.  $\Delta L$  arttıkça asıl değer ile lineerleştirilen değer arasındaki fark büyür. Asıl değer ile  $I_d$  akımı sonsuza giderken lineer değer ile sadece 2'ye yaklaşır.

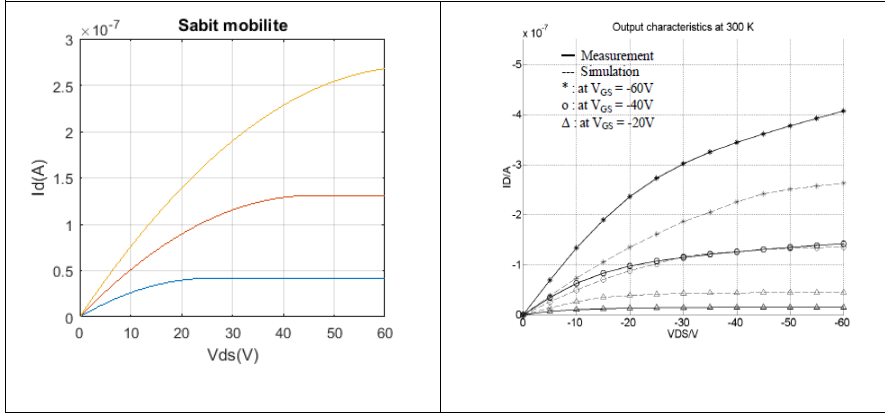
### 3.1.10. Literatür Karşılaştırma

Literatür karşılaştırmasında, yayınlanmış bir makaledeki OFET yapısının parametreleri kullanılarak aygıtta ait akım-gerilim denklemleri çıkarılacaktır. Seçilen makalede, 'Device Simulation of Pentacene Based Organic Field-Effect Transistors'(Qiu,2019), *pentacene* kullanılarak bir OFET(BGBC) yapısı oluşturulmuş ve mobilitenin elektrik alana bağlı olarak akım-gerilim grafikleri çizilmiştir. İlk olarak aygıt yapısını incelemek gerekirse;

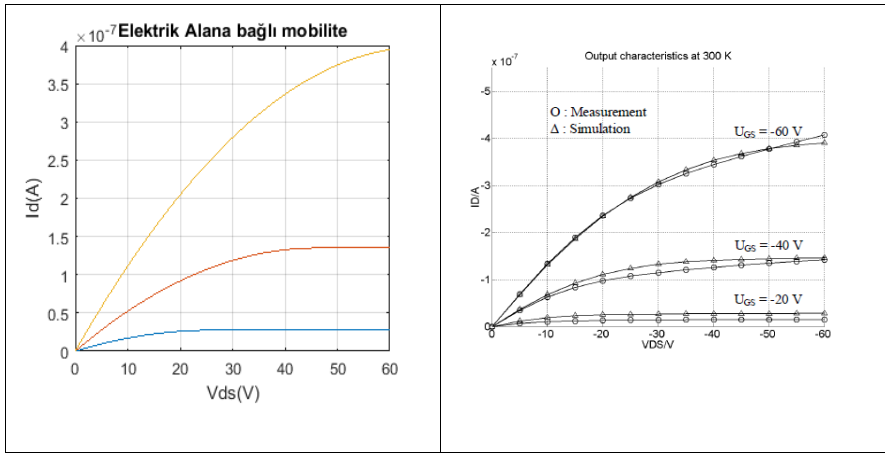


Şekil 3.16. Literatürdeki bir OFET yapısı

Aygıtın kapı, akaç ve kaynak elektrotları altın metalinden yapılmış ve aygıtta yarıiletken materyal olarak *pentacene* kullanılmıştır. Kapı metali ve yarıiletken uyumluluğu açısından bakıldığında altın metalinin iş fonksiyonu 5.4 eV iken yarıiletkeninki 5.2 eV'tur(Horowitz, 2004). Aygıtın diğer parametrelerine bakılacak olunursa; akaç-kaynak arası mesafe(kanal uzunluğu) 26  $\mu\text{m}$ ; kanal genişliği(W) 2mm; yarıiletken kalınlığı 100 nm; dielektrik kalınlığı ise 300 nm'dir.



Şekil 3.17. Sabit mobilite ile OFET I-V karakteristiği



Şekil 3.18. Elektrik Alana bağlı mobilite ile OFET I-V karakteristiği

Bir p-kanal IGFET negatif kapı ve akaç potansiyeli ile sürülür ve I-V grafiği 3. bölgeye düşer. Literatürdeki örneğin grafiklerinin 1. bölgeye taşınmasından dolayı simülasyon sonuçları da 1. bölgede çizilmiştir ve verilen sonuçlar aygıtta ait girdi ve çıktılardan büyüklükleridir. Görüldüğü üzere verilen örnek ile simülasyon sonuçları arasında benzerlik vardır. Küçük farklar ise aygıtta ait diğer parametrelerin etkisinden kaynaklanmaktadır. Burada yapılan sadece I-V karakteristiği değildir. Aynı zamanda mobilite ile ilgili karakteristikler de göz önüne alınmıştır. Literatürdeki çalışmaya ait mobilite grafikleri (sıcaklık ve elektrik alan) Şekil 3.12.'deki gibidir. Yani I-V karakteristiği çıkartılırken aynı zamanda mobilite karakteristiği de çıkartılmış ve çıkartılan karakteristikler literatürle uyduğu için I-V karakteristiği de literatürdeki karakteristiklerle uyumlu sonuçlar vermiştir.

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında organik yarıiletkenler ve fabrikasyonunda organik yarıiletkenlerin kullanıldığı OFET yapısına değinilmiştir. Literatürde en çok geçen OFET yapıları ve bu yapıların I-V karakteristiğini nasıl etkilediği açıklanmış ve yine literatürde yer alan karakteristikler MOSFET karakteristikleri de kullanılarak oluşturulmuş ve MATLAB programıyla simülasyonu yapılarak karakteristiklere ait denklemlerin grafikleri çizilmeye çalışılmıştır. Daha sonra ise bir literatür çalışması ele alınmış ve bu literatür çalışmasındaki aygıt parametreleri kullanılarak aygıtta ait mobilite ve I-V karakteristikleri oluşturulmuş ve oluşturulan karakteristiklere ait sonuçların literatürdeki aygıt çıktılarıyla büyük oranda uyduğu görülmüştür. Aygıt karakteristiklerinde; aygıt yapısının ve aygıtta kullanılan materyalin büyük ölçüde önem taşıdığı görülmüş ve bunlar açıklanmaya çalışılmıştır. Özellikle materyal özelliklerinin aygıtın çalışma karakteristiği üzerinde büyük öneme sahip olduğu ve aygıt karakteristiklerinin iyi olabilmesi için kullanılacak materyallerin hangi özelliklere sahip olması gerektiği açıklanmıştır.

Genel olarak benzer yapılara sahip MOSFET ve OFET için benzerlikler ve farklılıklar üzerinde durulmuş, bu farklılıkların neden olduğu literatürde geçen örnekler de kullanılarak bu aygıtlara ait karakteristikler çıkarılmış ve simülasyonu yapılmıştır.

## 5. SONUÇ

Literatür incelendiğinde, farklı materyaller üzerine birçok çalışma yapıldığı açıkça görülebilmektedir. En çok karmaşaya sebebiyet veren konulardan biri de aynı materyal karakteristiklerinin farklı spektroskopi yöntemlerinde farklı olmasıdır. Bunun nedeninin ise organik yarıiletkenlerin diziliminden kaynaklandığı aşikardır. Aynı durum inorganik yarıiletkenlerde de mevcuttur; ancak çok büyük farklılıklar yoktur. Ama organiklerde çok büyük oranlarda farklılıklar olabilmektedir. Bundandır ki aygıt üretiminde organik yarıiletkenler kullanılırken moleküllerin düzgün dizilebilmesi için farklı yöntemler geliştirilmiştir.

Bir diğer sorun ise aygıt geometrisidir. Örnek olarak bir OFET yapısı göz önüne alınacak olunursa; fabrikasyon tekniğine göre 4 farklı yapı kullanılabilir. Ama her ne kadar boyutlar aynı olsa da aygıtlar aynı karakteristikleri vermezler. Bunda yük taşıyıcılarının enjeksiyonunun ve kontak ile yarıiletkenin gösterdiği direnç etkisi rol oynamaktadır. Örneğin BGTC yapısında geniş kontak alanı nedeni ile taşıyıcılar oluşan kanala kolay enjekte olabilirken, BGBC yapısında daha zor enjekte olurlar. Bu da direk olarak aygıt karakteristiğini etkiler ve aygıtın performansının düşmesine sebebiyet verir. Bu noktadan itibaren önemli olan sadece materyal değildir. Materyalin düzgünce hazırlanması, saflaştırılması, fabrikasyon tekniği ve kullanılacak aygıt yapısı tüm bunlar önemli hale gelmektedir.

Başka bir sorun ise organiklerin teorik olarak tam bir modellerinin olmamasıdır. Bu konu üzerine de birçok çalışma mevcuttur. Birçok bilim insanı özellikle Gilles Horowitz organikler üzerinde birçok çalışma yapmıştır. Gerek Horowitz gerekse diğer bilim adamları inorganiklerde kullanılan modelleri çeşitli yaklaşımlar kullanarak organiklere uygulamaya çalışmaktadır. Bazı modeller olumsuz çıktılar verirken bazı modeller de ölçüm sonuçlarına yakın sonuçlar vermiştir.



## 6. KAYNAKLAR

- Aktuna, M.S., 2016. Yarıiletken Polimerlerden Hazırlanan İnce Filmlerin Elektriksel ve Spektroskopik Özelliklerinin İncelenmesi ve Organik Güneş Hücreleri. (YL Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
- Aydoğan, Ş., 2015. Katıhal Elektronik. Nobel Yayıncılık, 236 s, Ankara.
- Bourguiga, R., Garnier, F., Horowitz, G., Hajlaoui, R., Delannoy, P., Hajlaoui, M., Bouchriha, H., 2000. Simulation of I-V Characteristics of Organic Thin Film Transistors: Application to the Dihexylquaterthiophene. The European Physical Journal Applied Physics, 14, 121-125.
- Bourguiga, R., Mahdouani, M., Mansouri, S., Horowitz, G., 2007. Extracting Parameters from the Current-Voltage Characteristics of Polycrystalline Octithiophene Thin Film Field-Effect Transistors. The European Physical Journal Applied Physics, 39, 7-16.
- Colinge, J.P., Colinge, C., 2011. Yarıiletken Devre Elemanları Fiziği, Editörler: Tüzemen, S., Tekmen, S. Nobel Yayıncılık, 434 s, Ankara.
- Çalışkan, F., 2015. Al/Rubrene/n-GaAs Schottky Diyodların Sıcaklığa Bağlı Elektriksel Karakterizasyonu. (YL Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya
- Değirmenci, T., 2017. Perovskit Tabanlı Esnek Ambipolar İnce Film Transistörler. (YL Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli
- Demir, A., 2018. Channel Length Modulation in a Polystyrene Insulated Organic Field Effect Transistor Using PEDOT:PSS Composite Electrode. Sakarya University Journal of Science, 22 (6), 1493-1499.
- Erkol, A., 2016. Metal-Organik-Yarıiletken Yapıların Arayüzey Özelliklerinin Belirlenmesi. (YL Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
- Ersu, G., 2018. Enhancement of the Electrical Properties of Graphene for Electronic Devices. (YL Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, İzmir
- Gürel Özdemir, H., 2013. Spin Kaplama Yöntemiyle Rubrene İnce Filmlerinin Hazırlanması ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi. (YL Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Giresun Üniversitesi, Giresun
- Horowitz, G., 2004. Organic Thin Film Transistors: From Theory to Real Devices. J.Mater. Res., 19 (7), 1946-1962.
- Horowitz, G., 2015. Validity of the Concept of Band Edge in Organic Semiconductors. Journal of Applied Physics, 118, 115502(1-5).
- Horowitz, G., Hajlaoui, M.E., Hajlaoui, R., 1999. Temperature and Gate Voltage Dependence of Hole Mobility in Polycrystalline Oligothiophene Thin Film Transistors. Journal of Applied Physics, 87 (9), 4456-4463.
- Horowitz, G., Hajlaoui, R., Bouchriha, H., Bourguiga, R., Hajlaoui, M., 1998. The Concept of "Threshold Voltage" in Organic Field-Effect Transistors. Adv. Mater., 10 (12), 923-927.
- Horowitz, G., Hajlaoui, R., Fichou, D., Kassmi, A., 1998. Gate Voltage Dependent Mobility of Oligothiophene Field-effect Transistors. Journal of Applied Physics, 85 (6), 3202-3206.
- Hu, C., 2009. Electrons and Holes in Semiconductors. [https://people.eecs.berkeley.edu/~hu/Chenming-Hu\\_ch1.pdf](https://people.eecs.berkeley.edu/~hu/Chenming-Hu_ch1.pdf)

- Kıran Hergün, M., 2016. Organik Yarı İletkenlerin Katkılanması ve Fotovoltaik Uygulamaları. (YL Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir
- Kwok, H. L., 2003. Carrier Mobility in Organic Semiconductor Thin Films. Adv. Mater., 5, 62-66.
- Malkoç, D., 2012. Tiyofer Bazlı Organik Alan Etkili Transistörlerin Tasarlanması ve Karakterizasyonu. (YL Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Marmara Üniversitesi, İstanbul
- Meena, S.K., 2019. Organic Field Effect Transistors. <https://www.slideshare.net/santoshmeena3/organic-field-effect-transistor>
- Minamiki, T., Tokito, S., Minami, T., 2018. Fabrication of a Flexible Biosensor based on an Organic Field-effect Transistor for Lactate Detection. [https://www.jstage.jst.go.jp/article/analsci/advpub/0/advpub\\_18SDN02/\\_pdf/-char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/analsci/advpub/0/advpub_18SDN02/_pdf/-char/en)
- Mittal, P., Verma, A., 2016. Characterization and Depth Analysis of Organic Thin Film Transistor. Journal of Graphic Era University, 4 (1), 22-31.
- Newman, C.R., Frisbie, C.D., Filho, D.A.S., Bredas, J.L., Ewbank, P.C., Mann, K.R., 2004. Introduction to Organic Thin Film Transistors and Design of n-Channel Organic Semiconductors. [https://d31kydh6n6r5j5.cloudfront.net/uploads/sites/80/2019/06/Introduction\\_to\\_Organic\\_Thin\\_Film\\_Transistors.pdf](https://d31kydh6n6r5j5.cloudfront.net/uploads/sites/80/2019/06/Introduction_to_Organic_Thin_Film_Transistors.pdf)
- Özek, F., 1998. Katıhal Elektronik. Ankara Üniversitesi., F.F. Döner Sermaye Yayınları, No: 52, 85 s, Ankara.
- Öztürk, M., 2011. Grafen Transistörlerin Elektriksel Parametrelerinin Belirlenmesi. (YL Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Bozok Üniversitesi, Yozgat
- Qiu, H., Wilke, B., Göbel, H., 2019. Device Simulation of Pentacene Based Organic Field- Effect Transistors. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4681295/versions>
- Sönmez, B.G., Ertop, O., Mutlu, Ş., 2017. Modelling and Realization of a Water-Gated Field Effect Transistor (WG-FET) Using 16-nm-Thick Mono-Si Film. <https://www.nature.com/articles/s41598-017-12439-8>
- Tozlu, C., 2010. Yeni Perilen ve Naftalen Türevi Organik Yarıiletkenlerin Alan Etkili Transistör Uygulamalarında Karakteristik Özelliklerinin Analizi. (DR Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir
- Türkan, H., 2014. Esnek Alttaban Üzerinde Büyütülen Organik Alan Etkili Transistörler ve Elektriksel Karakterizasyonları. (YL Tezi), Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli
- Yardım, T., 2018. PEDOT:PSS Kapı Elektrodlu Alan-Etkili Transistörlerde Kapı Yalıtkanının Transistör Parametreleri Üzerine Etkileri. (DR Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce
- Yazmacıyan, A., 2013. Yarıiletken Polimerler Kullanılarak Çift Eklemlili Organik Güneş Pillerinin Hazırlanması. (YL Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
- Anonim1, 2019. Space Charge-Limited Current Model for Polymers. <https://www.intechopen.com/books/conducting-polymers/space-charge-limited-current-model-for-polymers>
- Anonim2, 2019. Organic Field-Effect Transistor: Device Physics, Materials, and Process. <https://www.intechopen.com/books/different-types-of-field-effect-transistors-theory-and-applications/organic-field-effect-transistor-device-physics-materials-and-process>

- Anonim3, 2019. Hall effect. <https://sites.google.com/site/puenggphysics/home/unit-5/hall-effect>
- Anonim4, 2019. Semiconductors: Introduction. <https://nptel.ac.in/courses/113106062/Lec2.pdf>
- Anonim5, 2019. Intrinsic semiconductors-conductivity. <https://nptel.ac.in/courses/113106062/Lec5.pdf>
- Anonim6, 2019. Extrinsic semiconductors. <https://nptel.ac.in/courses/113106062/Lec6.pdf>
- Anonim7, 2019. Organic Light Emitting Diode. [http://www.cityu.edu.hk/cosdaf/oled\\_interface.htm](http://www.cityu.edu.hk/cosdaf/oled_interface.htm)
- Anonim8, 2019. Fermi level, work function and vacuum level. <https://pubs.rsc.org/-/content/articlehtml/2016/mh/c5mh00160a?page=search>
- Anonim9, 2019. [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-configuration-of-electrical-conductivity-measurement-using-fourpoint-probe\\_fig3\\_291556707](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-configuration-of-electrical-conductivity-measurement-using-fourpoint-probe_fig3_291556707)
- Anonim10, 2019. Van der Pauw method. <http://www.wikizero.biz/index.php?q=aHR0cHM6Ly9lbi53aWtpcGVkaWEub3JnL3dpa2kvVmFuX2Rlcl9QYXV3X21ldGhvZA>
- Anonim11, 2019. Polimerlerin Yapısı ve Özellikleri. [http://docs.neu.edu.tr/staff/filiz.shanableh/MAK211-ders%20notlar%C4%B1-blm14%20&%20blm15\\_34.pdf](http://docs.neu.edu.tr/staff/filiz.shanableh/MAK211-ders%20notlar%C4%B1-blm14%20&%20blm15_34.pdf)
- Anonim12, 2019. Dielectrics: Classification, Polarization and Loss Electrical Engineering. <http://www.engineeringenotes.com/electrical-engineering/dielectrics/dielectrics-classification-polarization-and-loss-electrical-engineering/33349>
- Anonim13, 2019. Self-Aligned Gate MOSFET. <https://www.ece.ucdavis.edu/~bower/mosfetdetail.htm>
- Anonim14, 2019. What makes the carbon atoms special?. [https://www.iapp.de/organische-elektronik.de/en/?Basics\\_Why\\_Carbon%3F](https://www.iapp.de/organische-elektronik.de/en/?Basics_Why_Carbon%3F)
- Anonim15, 2019. VALENS BAĞI VE MOLEKÜLER ORBITAL TEORİLER. <http://debis.deu.edu.tr/userweb//mehmet.kartal/dosyalar/KOVALENTBAG2.pdf>
- Anonim16, 2019. Electronegativity and polarity Polar and non-polar bonds. [http://www.chemhume.co.uk/ASCHEM/Unit%201/Ch3IMF/chapter\\_3\\_c\\_hemical\\_bonding\\_andc.htm](http://www.chemhume.co.uk/ASCHEM/Unit%201/Ch3IMF/chapter_3_c_hemical_bonding_andc.htm)
- Anonim17, 2019. Diamond. <http://www.chm.bris.ac.uk/motm/diamond/diamonhd.htm>
- Anonim18, 2019. ORGANIC CHEMISTRY. <https://appliedphysicslearningcentre.blogspot.com/2015/02/organic-chemistry.html>
- Anonim19, 2019. Band Structure and the Science of Conduction. <http://www.thephysicsmill.com/2013/02/03/im-with-the-valence-band-band-structure-and-the-science-of-conduction/>
- Anonim20, 2019. Electronic Structure of Molecular Solids: Bridge to the Electrical Conduction. [https://application.wiley-vch.de/books/sample/3527410538\\_c03.pdf](https://application.wiley-vch.de/books/sample/3527410538_c03.pdf)
- Anonim21, 2019. Periodic Trends. <http://www.glimme.net/apchem/ch2-7/AtomsElectronsNomenclature-7-Handout.pdf>
- Anonim22, 2019. Organic Field Effect Transistor (OFET) Materials. <https://www.sigmaldrich.com/materials-science/material-science-products.html?TablePage=19352529>

- Anonim23, 2019. İletken Kompozit Malzemelerin Sentezlenmesi ve Yüksek Enerji Radyasyonla Etkileşiminin İncelenmesi. [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/42/097/42097936.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/42/097/42097936.pdf)
- Anonim24, 2019. Temperature Dependence of Silicon Carrier Effective Masses with Application to Femtosecond Reflectivity Measurements. <https://pdfs.semanticscholar.org/a991/d71996eefc2dcf91f1b64968b7ffdf1b3d8.pdf>
- Anonim25, 2019. [https://www.researchgate.net/figure/Mixed-amorphous-crystalline-macromolecular-polymer-structure-38\\_fig5\\_290429725](https://www.researchgate.net/figure/Mixed-amorphous-crystalline-macromolecular-polymer-structure-38_fig5_290429725)
- Anonim26, 2019. [https://www.researchgate.net/figure/A-typical-OFET-structure-showing-the-location-of-the-source-drain-and-gate-electrodes\\_fig6\\_305677010](https://www.researchgate.net/figure/A-typical-OFET-structure-showing-the-location-of-the-source-drain-and-gate-electrodes_fig6_305677010)
- Anonim27, 2019. Organic Field Effect Transistors(Ofets). <http://sites.unica.it/dealab/organic-field-effect-transistors-ofets/>

## 7. ÖZGEÇMİŞ

Yazar, 1993 Niksar doğumludur.

Derece	Okul-Bölüm	Mezuniyet Yılı
Ortaöğretim	Niksar Prof. Dr. Mustafa Erol Turaçlı Anadolu Öğretmen Lisesi Fen Bilimleri	2012
Lisans	Gaziosmanpaşa Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2017
Yüksek Lisans	Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fizik	2019