

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**N-TİPİ YARI İLETKEN MALZEMELERE DAYALI
ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLERİN
ÜRETİMLERİ, PERFORMANS VE
KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Mustafa Emre AKIN

Güneş Enerjisi Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu: 625.05.04

Sunuş Tarihi: 06.08.2008

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Şule ERTEN ELA

Bornova-İzmir

III

Mustafa Emre AKIN tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak sunulan **“N-tipi yarı iletken malzemelere dayalı organik alan etkili transistörlerin üretimleri, performans ve karakteristiklerinin incelenmesi”** başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 06/08/2008 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı	: Yrd. Doç. Dr. Şule ERTEN ELA	
Raportör Üye	: Prof. Dr. Sıddık İÇLİ	
Üye	: Prof. Dr. Serdar ÖZÇELİK	

ÖZET**N-TİPİ YARI İLETKEN MALZEMELERE DAYALI ORGANİK
ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLERİN ÜRETİMLERİ,
PERFORMANS VE KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ****AKIN, Mustafa Emre****Yüksek Lisans Tezi, Güneş Enerjisi Enstitüsü****Tez Yöneticisi: Yrd. Doç. Dr. Şule ERTEN ELA****Ağustos, 2008, 87 sayfa**

Bu tezde, n-tipi yarı iletken malzemelere dayalı organik alan etkili transistörler çeşitli kaplama yöntemleri (döndürerek kaplama ve termal buharlaştırma) kullanılarak üretilmişlerdir. N tipi organik alan etkili transistörlerin, akım-gerilim parametreleri ölçülmüş ve bu değerler yardımıyla performans karakteristikleri (geçiş iletkenlik değeri, alt eşik değeri eğrisi, mobilite vb..) hesaplanmıştır. Ayrıca, farklı elektrotlar kullanılarak oluşturulan organik transistörlerin kontak direnç etkisi incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, Fulleren (C_{60}) tabanlı transistörde $0.5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ve PCBM tabanlı transistörde $0.10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, naftalen diimid tabanlı transistörde $0.05 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ elektron mobilite değerleri elde edilmiştir. Perilen diimid tabanlı transistörde, 6.10^{-5} elektron ve 7.10^{-5} delik mobilite değerleri hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: N-tipi yarı iletken malzemeler, organik alan etkili transistörler, kontak direnç

ABSTRACT**FABRICATION OF ORGANIC FIELD EFFECT TRANSISTORS
BASED ON N-TYPE SEMICONDUCTOR MATERIALS,
INVESTIGATION OF PERFORMANCE AND
CHARACTERISTICS****AKIN, Mustafa Emre****M.Sc. Thesis, Solar Energy Institute, Ege University****Supervisor: Assist. Prof. Dr. Şule ERTEN ELA****August, 2008, 87 pages**

In this thesis, n-type semiconductor materials based on organic field effect transistors were fabricated by using various methods (spin-coating and thermal evaporation). The current-voltage characteristics of the n-type semiconductor materials based on organic field effect transistors are measured and the performance characteristics (transconductance, subthreshold slope, mobility) are calculated by using this parameters. Additionally, the contact resistance effect of organic transistors which are formed by using different electrodes are investigated. As a result of the experiments, the electron mobility values were obtained $0.5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ for fullerene (C_{60}) based transistor, $0.10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ for PCBM based transistor, $0.05 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ for naphthalene diimide based transistor. The electron and hole mobilities for perylene diimide based transistor is also calculated as $6.10^{-5} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ and $7.10^{-5} \text{ cm}^2/\text{Vs}$, respectively

Key Words: N type semiconductor, organic field effect transistors, contact resistance

IX

TEŞEKKÜR

Tüm yaşamım boyunca her türlü maddi ve manevi desteğini bir an olsun eksik etmeyen biricik anne ve babama teşekkürlerimi sonsuz minnetimle beraber saygılarımı sunarım.

Çalışmalarım sırasında kıymetli görüşlerinden yararlandığım ve yakın ilgilerini her zaman hissettiğim tez danışmanım sayın Yrd.Doç.Dr. Şule ERTEN ELA'ya, bütün çalışmalarında değerli bilgilerini benden esirgemeyen ve ihtiyacım olan her türlü olanağı sağlayan saygıdeğer hocam sayın Prof.Dr. Sıddık İÇLİ'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Araştırmalarımındaki güncel gelişmeleri ve teknolojik imkanları bana sunan ve çalışmalarımda bana ışık tutan Prof.Dr. N.Serdar SARIÇİFÇİ ve yardımlarından dolayı Arş.Gör. Philipp STADLER'e teşekkür ederim.

Son olarak, tüm çalışmalarım boyunca desteklerini her an hissettiğim Fotokimya grubu üyelerine ve Güneş Enerjisi Enstitüsü çalışanlarına, yardımları ile çalışmalarına katkıda bulunan sayın Arş. Gör. Cem TOZLU'ya, tüm kalbimle teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET.....	V
ABSTRACT	VII
TEŞEKKÜR.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	XV
ÇİZELGELER DİZİNİ	XIX
BİRİM, SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XXI
1. GİRİŞ.....	1
2. ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLER.....	4
2.1. Organik Alan Etkili Transistörlerin Çeşitleri	6
2.2. Alan Etkili Transistörlerin Temel Çalışma Prensipleri	9
2.2.1. Doğrusal (Lineer) Rejim Bölgesi.....	11
2.2.2. Kısıtlanma (Pinch Off) Noktasındaki Doyum (Saturation) Rejimin Başlaması	11
2.2.3. Doyum (Saturation) Bölgesi	12
2.3. Alan Etkili Transistörün Performans Karakteristikleri	13
2.3.1. Mobilite Değerinin Hesaplanması	14
2.3.2. Alt Eşik Değer (Subthreshold) Eğrisi Hesaplanması:.....	15
2.3.3. Açma/Kapama (On/Off) Oranı	17

XII

2.3.4. Geçiş İletkenlik (Transconductance) Değeri	17
2.4. OFET’lerde Kullanılan Yalıtkan Malzeme.....	18
2.5. OFET’lerde Kullanılan Organik Yarı İletken Malzeme:	21
2.5.1. Politiyofenler	24
2.5.2. Poliflorenler	25
2.5.3. Çeşitli Konjuge Yapıdaki Moleküller.....	26
2.5.4. Fullerenler Ve Çözülebilir Türevleri	28
2.6. Organik Alan Etkili Transistörlerde Kullanılan Üretim Teknikleri	31
2.6.1. Vakum Buharlaştırma Tekniği	32
2.6.2. Langmuir-Blodgett Tekniği	33
2.6.3. Çözelti Prosesli Döndürerek Kaplama Yöntemi Tekniği ...	33
3. DENEYSEL KISIM.....	35
3.1. Termal Vakum Buharlaştırma Yöntemi İle Oluşturulan N Tipi Organik Alan Etkili Transistörler	35
3.1.1. Organik Alan Etkili Transistörlerde Gate Elektrotunun Oluşturulması.....	37
3.1.2. Organik Materyal Tabanlı Yalıtkan Tabaka Oluşturulması	38
3.1.3. Organik Yarı İletken Tabakanın Oluşturulması	39
3.1.4. Metal Buharlaştırma İşlemi (LiF/Al).....	41

XIII

3.1.5.Fulleren (C ₆₀) Tabanlı OFET'in Akım-Gerilim Karakteristiklerinin İncelenmesi	42
3.2. Döndürerek Kaplama Yöntemi İle Oluşturulan N Tipi Organik Alan Etkili Transistör Denemeleri	50
3.2.1.PCBM tabanlı OFET'in Gate Elektrotunun Hazırlanması	51
3.2.2.PCBM Tabanlı OFET'in Yalıtkan Tabakasının Hazırlanması	52
3.2.3.PCBM Tabanlı OFET'in Yarı İletken Tabakasının Hazırlanması	53
3.2.4.PCBM tabanlı OFET'in Metal Buharlaştırma İşlemi	54
3.2.5.PCBM Tabanlı OFET'in Akım-Gerilim Karakteristiklerinin İncelenmesi	55
3.2.6.PCBM Tabanlı OFET'in Kontak Direnç Etkisi.....	59
3.3. Naftalen Diimid Ve Perilen Diimid Moleküler Yapıları İle Oluşturulan OFET'ler	62
3.3.1.NDI ve PDI Tabanlı OFET'lerin Gate Elektrotunun Hazırlanması	64
3.3.2.NDI ve PDI Tabanlı OFET'lerin Yalıtkan Tabakalarının Hazırlanması	64
3.3.3.NDI ve PDI Tabanlı OFET'lerin Yarı İletken Tabakalarının Hazırlanması	64

XIV

3.3.4.NDI ve PDI Tabanlı OFET’lerin Metal Buharlaştırma İşlemi	66
3.3.5.NDI ve PDI Tabanlı OFET’lerin Akım-Gerilim Karakteristiklerinin İncelenmesi.....	67
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	72
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ	85

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Organik ve polimer yapıları alan etkili transistörler üzerine yayınlanan makale sayısı (Institute for scientific information web of science).....	3
Şekil 2.1. Organik alan etkili transistörün yapısı.....	4
Şekil 2.2. Organik alan etkili transistörler için farklı yapı tasarımları (Singh, 2007).....	7
Şekil 2.3. OFET 'in çalışma prensibini anlatan enerji düzeyi diagramı (Singh and Saricicfi, 2006)	10
Şekil 2.4. Ids akımının doğrusal (linear) bölge rejimi	11
Şekil 2.5. Kısıtılma (pinch off) noktasındaki doyum (saturation) rejimi başlangıcı.....	12
Şekil 2.6. Transistörün doyum (saturation) bölgesi	13
Şekil 2.7. N kanal organik alan etkili transistörün akım gerilim eğrileri (Singh, 2007).....	14
Şekil 2.8. Organik transistörlerde yalıtkan malzeme olarak kullanılan bazı polimerlerin kimyasal yapıları.....	20
Şekil 2.9. OFET'lerde kullanılan başlıca p tipi organik yarı iletken materyallerin kimyasal yapıları (Singh, 2007a)	23
Şekil 2.10. OFET'lerde kullanılan başlıca n tipi organik yarı iletken materyallerin kimyasal yapıları (Singh, 2007a)	24

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devamı)

Şekil 2.11. Avusturyanın Johannes Kepler üniversitesinde kullanılan vakum buharlaştırma cihazı	32
Şekil 2.12. Döndürme kaplama yöntemi ile oluşturulan ince film tabaka	34
Şekil 3.1. Fulleren (C_{60}) tabanlı alan etkili transistörün devre mimarisi	35
Şekil 3.2. BCB organik yalıtkan materyalin kimyasal yapısı	36
Şekil 3.3. Fulleren (C_{60}) materyalinin kimyasal yapısı	37
Şekil 3.4. Kapı (gate) elektrotunun oluşum işlemi	37
Şekil 3.5. Fulleren (C_{60}) organik materyalinin AFM resmi	40
Şekil 3.6. Oluşturulan metal elektrotların AFM resmi (LiF/Al)	42
Şekil 3.7. Fulleren (C_{60}) kullanılarak oluşturulan OFET'in elektriksel ölçüm alınırken çekilmiş fotoğraf (Linz/Johannes Kepler üniversitesi)	43
Şekil 3.8. Fulleren (C_{60}) OFET'in pozitif çıkış karakteristiği	44
Şekil 3.9. Fulleren (C_{60}) OFET'in negatif çıkış karakteristiği	44
Şekil 3.10. Fulleren (C_{60}) OFET'in logaritmik transfer karakteristiği	45
Şekil 3.11. Fulleren (C_{60}) OFET'in transfer karakteristiği	46
Şekil 3.12. Fulleren (C_{60}) OFET'in mobilite değeri eğrisi	47
Şekil 3.13. Fulleren (C_{60}) OFET'in mathematica 5.2 programı ile hesaplanan eşik değeri (threshold) eğrisi	48

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devamı)

Şekil 3.14. Fulleren (C_{60}) OFET'in mathematica 5.2 programı ile hesaplanan geçiş iletkenlik eğrisi.....	49
Şekil 3.15. PCBM tabanlı OFET'in devre mimarisi.....	50
Şekil 3.16. PVA organik yalıtkan maddesinin kimyasal yapısı.....	50
Şekil 3.17. PCBM organik materyalin kimyasal yapısı.....	51
Şekil 3.18. PVA organik yalıtkan tabakasının AFM resmi	53
Şekil 3.19. PVA üzerine kaplanan PCBM tabakasının AFM resmi	54
Şekil 3.20. PCBM tabanlı OFET'in çıkış karakteristiği	55
Şekil 3.21. PCBM tabanlı OFET'in transfer karakteristiği.....	56
Şekil 3.22. PCBM tabanlı OFET'in mathematica 5.2 programı kullanılarak elde edilen mobilite eğrisi.....	57
Şekil 3.23. PCBM tabanlı OFET'in mathematica 5.2 programı ile hesaplanan alt eşik değeri eğrisi.....	58
Şekil 3.24. PCBM tabanlı OFET'in mathematica 5.2 programı kullanılarak elde edilen geçiş iletkenlik eğrisi	59
Şekil 3.25. PCBM tabanlı OFET'in farklı elektrot kullanılarak, mathematica 5.2 programı ile hesaplanan mobilite eğrisi.....	60
Şekil 3.26. PCBM tabanlı OFET'in farklı elektrot kullanılarak, mathematica 5.2 programı ile hesaplanan alt eşik değeri (subthreshold) eğrisi.....	61

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devamı)

Şekil 3.27. PCBM tabanlı OFET'in farklı elektrot kullanılarak, mathematica 5.2 programı ile hesaplanan geçiş iletkenlik (transconductance) eğrisi	62
Şekil 3.28. N,N'-bis-butyl-1,4,5,8-naftalen diimid-NDI	63
Şekil 3.29. N,N'-bis-(dehidroabiyetil)-3,4,9,10-perilen diimid-PDI	63
Şekil 3.30. NDI veya PDI tabanlı OFET'in devre mimarisi	63
Şekil 3.31. PVA kaplı filmde N,N'-bis-(butyl)-1,4,5,8-naftalen diimid molekülü için AFM resmi.....	65
Şekil 3.32. PVA kaplı filmde N,N'-bis-(dehidroabiyetil)-3,4,9,10-perilen diimid molekülü için AFM resmi	66
Şekil 3.33. Naftalen diimide tabanlı OFET'in çıkış karakteristiği	67
Şekil 3.34. Naftalen diimid tabanlı OFET'in transfer karakteristiği	68
Şekil 3.35. Ambipolar N,N'-bis (dehidroabiyetil)-3,4,9,10-perilen diimid yarı iletken material tabanlı OFET'in çıkış karakteristiği	69
Şekil 3.36. Ambipolar N,N'-bis (dehidroabiyetil)-3,4,9,10-perilen diimid yarı iletken materyal tabanlı OFET'in transfer karakteristiği.....	70

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 2.1. Literatürde 1983’den 1996’ya kadar olan OFET’lerde ölçülen mobilite değerleri (Singh and Sariciftci, 2006)	29
Çizelge 2.2. Literatürde 1997’den 2005’e kadar olan OFET’lerde ölçülen mobilite değerleri (Singh and Sariciftci, 2006)	30
Çizelge 3.1. Döndürme kaplama yöntemi parametreleri	39
Çizelge 3.2. C ₆₀ Organik materyalinin termal buharlaştırma basamakları	40
Çizelge 3.3. Kaynak (source)-savak (drain) elektrotlarının metal buharlaştırma parametreleri	41
Çizelge 3.4. PVA yalıtkan tabakanın döndürerek kaplama yöntemi ile oluşturulması	52
Çizelge 3.5. PCBM yarı iletken tabakanın döndürerek kaplama yöntemi ile oluşturulması	53
Çizelge 3.6. Krom metalinin buharlaştırma değerleri	54
Çizelge 3.7. LiF/Al metallerinin buharlaştırma değerleri (PCBM)	60
Çizelge 3.8. LiF/Al metalinin buharlaştırma değerleri	67
Çizelge 4.1. Fulleren (C ₆₀) tabanlı OFET’in performans parametreleri	73
Çizelge 4.2. PCBM tabanlı farklı elektrotlara sahip OFET’lerin performans parametreleri	75

BİRİM, SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
W	Alan etkili transistörün kanal genişliği
L	Alan etkili transistörün kanal boyu
R _s	Transistör kanal direnci
S _n	Alt eşik değer eğrisi
ϵ	Dielektrik katsayısı
d	Yalıtkan materyalin kalınlığı
C°	Selsius derece
A°	0.1 nanometre

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
MOSFET	Metal oksit yarı iletken alan etkili transistör
OFET	Organik alan etkili transistör
PVA	Polivinil Alkol
LiF/Al	Lityum florür / Alüminyum
Cr	Krom
V _d , V _g	Savak (drain), kapı (gate) voltajı

SİMGELER VE KISALTMALAR (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
ITO	İndiyum kalay oksit (Indium Tin Oxide)
SiO ₂	Silisyum dioksit
PEDOT	Poli (3.4- etilendioksitiyofen)
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
HOMO	En yüksek enerjili dolu orbital
LUMO	En düşük enerjili boş orbital
V _{TH}	Eşik değeri voltajı
nm, µm	Nanometre, mikrometre
V _{ds}	Savak (drain) – kaynak (source) voltajı
V _{on}	Transistörün ilettime geçiş voltajı
I _{ds}	Savak (drain) – kaynak (source) akımı
µ	Mobilite değeri
C	Kapasitans değeri
V _{gs}	Gate – Source Voltajı
I _{on} /I _{off}	Akımın iletimde ve kesimde olduğu oran
g	Geçiş iletkenlik değeri

SİMGELER VE KISALTMALAR (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
PCBM	Fenil C ₆₁ bütirik asit metil ester
C ₆₀	Fulleren
Zn, HCl	Çinko, hidroklorik asit
rpm	dakikadaki devir miktar
eV	elektronvolt
BCB	Benzosiklobuten
Sn	saniye
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
mm	minimetre
μA	mikro amper
μS	mikro Siemens
NDI	Naftalen diimid
PDI	Perilen diimid
μ _e , μ _h	Elektron ve boşluk mobilitesi

1. GİRİŞ

Günümüzde nanoteknoloji, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde teknolojik bir yarışa dönüşmüştür. Hızla gelişen teknoloji ile birlikte elektronikte kullanılan malzemeler hızla küçülmüş ve küçülmektedir. Hızla gelişmekte olan teknolojiye, inorganik malzemelerin yerini üretim proseslerindeki kolaylıktan ve oldukça düşük maliyetlerden dolayı organik malzemeler almıştır.

1930 yılında alan etkili transistör ilk defa Lilienfeld tarafından bulunmuştur (Lilienfeld, 1930). Genel olarak alan etkili transistör, kaynak (source) ve savak (drain) adı verilen iki omik kontak arasında oluşturulan iletken kanallı bir levha olarak tanımlanan bir kapasitördür. Kanal içindeki yük taşıyıcılarının yoğunluğu, kapı (gate) elektrotu denilen ikinci bir kapasitör levhaya voltaj uygulanması ile ayarlanır. Kahng ve Atala tarafından 1960 yılında ilk defa silikon tabanlı metal oksit yarı iletken alan etkili transistör (MOSFET) üretilmiştir (Kahng and Atalla, 1960). Günümüzde MOSFET teknolojisi, modern mikroelektronik teknolojisinin bütünleşik devre teknolojisi alanında en önemli bileşenlerinden birini oluşturmaktadır.

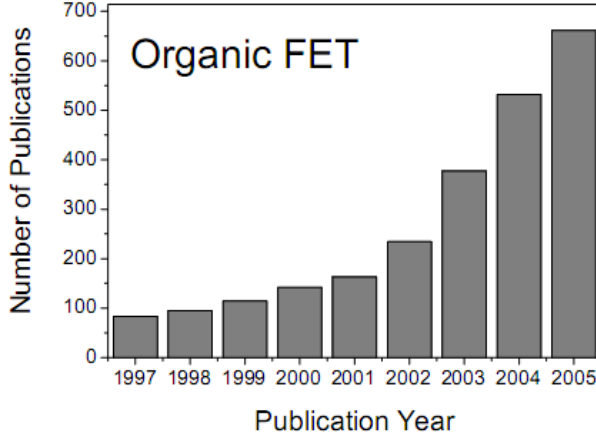
1970’li yıllara kadar kabul edilen görüş, organik materyallerin elektriksel özelliğe sahip olmadıkları, yalnızca yalıtkan materyal olarak geniş kullanım alanlarına sahip oldukları yönündeydi. İlk olarak A. J. Heeger polietilen moleküllerinin doping işlemi yardımıyla iyi bir iletkene dönüştürülmesini başarmıştır (Heeger et al., 1988). Bu önemli olaydan itibaren, iletken polimer teknolojisi araştırma alanlarında ve çeşitli endüstrilerde gelişmektedir. Konjuge polimerler, oligomerler ve diğer

molekülleri içeren organik yarı iletken çalışmaları, organik alan etkili transistör teknolojisinin gelişimine büyük katkı sağlamıştır.

1987 yılında tanımlanan organik alan etkili transistörler (OFET), modern mikro elektronik sektörünün en önemli bölümlerinden biri olmuştur (Koezuka et al., 1987). Organik Alan Etkili Transistörlerin bilinen silikon tabanlı transistörlere nazaran bir çok avantajları vardır. Bu avantajların başlıcaları; düşük maliyetli üretimleri, üretim çeşitliliğine sahip olmaları ve esnek yüzeylerde kullanılabilmesidir (Dimitrakopoulos and Malenfant, 2002). Organik ince-film elektroniği teknolojisi, son on yıl içerisinde organik ince film transistörlerinin ilk örnekleri olarak, radyo frekans tanımlayıcısı ve organik bütünleşmiş devreleri uygulama alanlarında gelişmekte olan (ve hatta matris göstergelerde) bir teknolojidir (Horowitz, 2004). Organik ince film transistörler, organik entegre devre tasarımlarında ve polimer devre tasarımlarında ticari olarak uygulama alanına sahiptirler (Crone et al, 2000).

Organik alan etkili transistörler, silisyum ve germanyum gibi tek kristal inorganik yarı iletken tabanlı alan etkili transistörlerle karşılaştırıldığında, elde edilen yük taşıyıcı mobilite değeri çok düşüktür. Buna karşın son yıllarda yapılan çalışmalar sonucu rubrene tek kristal tabanlı organik alan etkili transistörlerde $15.4 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ mobilite değeri elde edilmiş olup, bu mobilite değeri ile amorf silikon tabanlı transistörlerin mobilite değerlerine ulaşılmıştır (Singh and Saricifici, 2006). Ayrıca, inorganik transistörlerdeki gelişim hızla limit değerlere doğru gitmekte, ileri teknolojik uygulamalar açısından organik alan etkili transistörler gelişmekte olan mükemmel bir potansiyel oluşturmaktadır (Sun et al., 2004). Günümüzde organik transistörler amorf silikon tabanlı

alan etkili transistörlerle yarışabilmektedir. Son yıllarda organik ve polimer transistörler üzerine yayınlanan makale ve araştırma sayısında büyük bir artış görülmüştür (Şekil 1.1.).



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

Bu tez çalışmasında, farklı yarı iletken malzemeler ve farklı kaynak-savak elektrotları kullanılarak üretilen n tipi organik alan etkili transistörlerin performans ve karakteristikleri yer almaktadır. Ayrıca farklı n tipi organik yarı iletken malzemelerin (C_{60} , PCBM, NDI, PDI) transistör performansını nasıl etkilediği de araştırılmıştır.

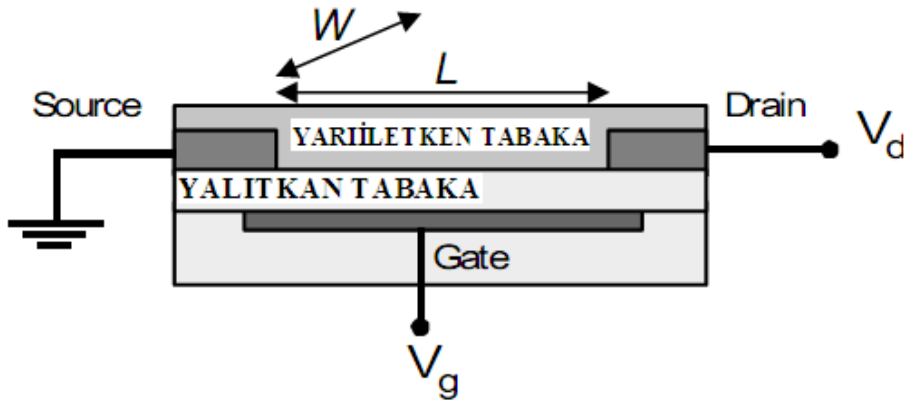
N tipi organik yarı iletken maddelerine dayalı organik alan etkili transistörler tek kristalli inorganik alan etkili transistörlere nazaran birçok avantaja sahiptir. İlk olarak, kapı (gate) yalıtkan malzemesinin gerekli kimyasal çözgüde kolayca çözünebilmesi (örneğin; PVA (Polivinil alkol) suda çok iyi çözünebilmektedir) ve yüzeye kolay kaplanabilir

olmasıdır. Bir diğer avantajı ise aktif materyal olarak kullanılan organik materyal, mekanik olarak dayanıklı ve ince film oluşumuna uygundur.

Yukarıda belirtilen başlıca avantajlarından dolayı organik alan etkili transistörler son yıllarda nano teknolojik uygulamalarda önemli bir yere sahiptir.

2. ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLER

Alan etkili transistör, şekil.2.1’de gösterilen organik polimer yalıtkan tabaka, organik yarı iletken materyal tabaka ve kaynak (source), savak (drain) ve kapı (gate) olmak üzere 3 elektrottan meydana gelmiştir. Aşağıdaki şekilde görülen diğer parametreler; kanal boyu = L (kaynak ve savak kontakları (genellikle LiF/Al veya Altın arasında kalan mesafe), kanal genişliği= W , ile belirtilmiştir (Şekil 2.1.).



Şekil 2.1. Organik alan etkili transistörün yapısı

Alan etkili transistörlerde kullanılan ince yarı iletken tabaka, kapı (gate) elektrotu üzerindeki yalıtkan tabaka ile kontak durumundaki

kaynak (source) ve savak (drain) elektrotları arasındaki bölümde bulunmaktadır. Bilinen ilk organik alan etkili transistör, 1986 yılında politiyofen (polythiophenes) kullanılarak yapılmıştır (Tsumura et al., 1986). Organik alan etkili transistörlerde kullanılan yarı iletken ince film tabaka oluşumu, kullanılan malzemenin fiziksel özelliğine bağlı olarak vakum süblimleştirme (vacuum sublimated), döndürerek kaplama (spin-coated), damlatarak kaplama (drop-casting) yöntemleri kullanılarak oluşturulur. Gate elektrotu, yalıtkan tabakanın alt kısmında bulunan indiyum kalay oksit (ITO) denilen ince bir iletken tabakadan meydana gelmiştir.

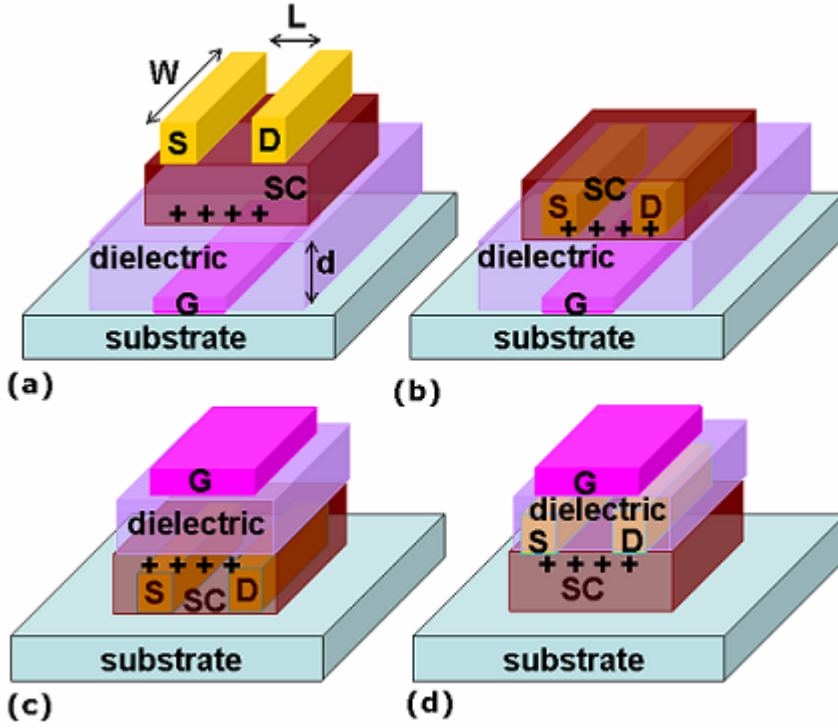
Organik alan etkili transistörlerde, yüksek dielektrik katsayısına sahip inorganik yalıtkan tabaka (SiO_2 , Al_2O_3 , SiN_x , vb...) ve polimer yapılı yalıtkan tabaka (PMMA (poli metilmetakrilat), PVP (polivinil fenol), PVA (Polivinil alkol) vb..) olarak başlıca 2 çeşit yalıtkan tabakadan meydana getirilen transistör, yapısına ve tasarımda istenilen özelliklere bağlı olarak tasarlanmaktadır (Facchetti and Yoon, 2005). Yarı iletken tabakaya yük enjeksiyonunu sağlayan, kaynak (source) ve savak (drain) elektrotları genellikle altın gibi kaliteli metaller ile iletken polimerler tarafından oluşturulur (Kawase et al., 2003).

Alan etkili transistör yapısında voltaj, kapı (gate) elektrotuna (V_g) ve savak (drain) elektrotuna (V_d) uygulanır. Kaynak (source) elektrotu, genellikle toprak olarak belirlenir ($V_g=0$). Kaynak ile savak arasındaki potansiyel fark kaynak (source)-savak (drain) voltajı olarak tespit edilir (V_{ds}) (Singh, 2007a).

Alan etkili transistör yapısına pozitif kapı (gate) voltajı uygulandığında, kaynak (source) elektrotundan enjekte edilen yükler kapı (gate) elektrotundan daha negatif bir değerde olduğu zaman elektron enjeksiyonu meydana gelmektedir. Benzer bir durum, negatif kapı voltajı uygulandığında kaynak elektrotuna enjekte edilen yükler kapı elektrotundan daha pozitif bir değerde olursa delik (hole) enjeksiyonu oluşmaktadır (Sze, 2001).

2.1.Organik Alan Etkili Transistörlerin Çeşitleri

Organik alan etkili transistörlerde kullanılan yarı iletken materyalin özellikleri ve yapıda kullanılan gate yalıtkan tabaka tarafından sağlanan çeşitli transistör yapıları, çok farklı transistör karakteristikleri gösterebilmektedir. Bu çeşit transistörlerde kullanılan değişik tasarım yapıları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Organik alan etkili transistörler için farklı yapı tasarımları (Singh, 2007)

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

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

d) Üst yüzey kontak / üst yüzey gate (top contact / top gate)
(TC/TG)

Bu entegre tasarımlarında en çok tercih edilen yapı, şekil 2.2.'de gösterilen alt tabanı kapı (gate) elektrotu üst kısmı kaynak-savak elektrotları olarak tasarlanan yapıdır. Bu yapının yaygın olarak kullanılmasının nedeni: ince film transistörlerden örnek alınarak yüksek kalitede bir yalıtkan tabaka oluşturulması ve alt kısımda bulunan kapı (gate) yalıtkan maddesi sayesinde oluşturulan elektrik alanıyla kontrol edilmesidir (Singh and Saricifci, 2006).

Diğer bir tasarım olan, üst kısım kapı (gate) elektrot alt kısım savak ve kaynak elektrotuna sahip OFET yapılarının en önemli avantajı, organik yarı iletken maddenin esnek substrat (substrate) yüzeyinde oluşturulması ve bu sayede uygun kullanım alanına rahatça entegre edilmesidir (Singh, 2007a).

Organik alan etkili transistörlerde kullanılan elektrotlar, fotolitografi (photolithography), özel gölgelendirmeli maskeleme yöntemi (shadowmask evaporation), çeşitli formlardaki baskılama (printing) yöntemleri kullanılarak oluşturulur. Transistörlerde kanal boyu (L), top kontak (üst yüzey kontak) yapılarında özel gölgelendirmeli maskeleme (shadow mask evaporation) yöntemi kullanılarak onlu mikrometre (μm) katlarında yapılar tasarlanabilir. Alt katman kontak (bottom contact) yapılarında ise kanal boyu daha küçük bir değer olarak fotolitografi veya baskılama yöntemi ile elde edilir.

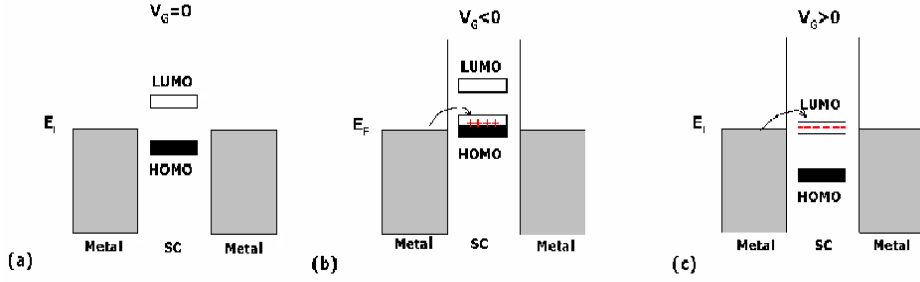
Kullanılan farklı transistör yapıları, enjekte edilen elektrotların pozisyonu ile bu elektrotlarla ilişkili olan kapı (gate) elektrotunun

konumundan dolayı oluşmaktadır. Alt katman kontak / alt katman gate yapısında yükler, yarı iletken/yalıtkan ara yüzeyinde direk olarak birikerek kanal oluşumu sağlanır. Fakat, diğer geometri yapılarında ((TC/BG) ve (BC/TG)) ise iletken kanal yarı iletken tabaka tarafından ayrılır. Böylece yükler ilk olarak iletken kanala erişmeden önce birkaç nanometrelik yarı iletken kalınlığını geçmek zorundadır. Transistör yapıları arasındaki diğer bir farklılık ise, farklı morfolojilere sahip yüzeylerdeki yalıtkan/yarı iletken ve elektrot/yarı iletken ara yüzeylerinden meydana gelen tuzak düzeylerinin miktarlarıdır (Singh, 2007a).

2.2.Alan Etkili Transistörlerin Temel Çalışma Prensibi

Genel olarak organik alan etkili transistörlerin karakterizasyon işlemlerinde, kaynak (source) elektrotu topraklanarak kapı (gate) ve savak (drain) elektrotlarına voltaj uygulanır. Kapı elektrotuna uygulanan voltaj ile kaynaktan savaka doğru akan akım kontrol edilir. Kapı elektrotuna hiçbir voltaj uygulanmadığı zaman, kaynaktan savak elektrotuna çok az bir akım akmaktadır. Bu akıma sızıntı akımı (leakage current) denir. Bu akımın değeri savak voltajının (V_d) kanal direncine (R_s) oranı olarak tespit edilir (Singh, 2007).

Eğer, kapı (gate) elektrotuna hiçbir voltaj değeri uygulanmadığı zaman ($V_g=0$), yapı içerisindeki organik yarı iletken katmanında hiçbir katkılandırma olayı görünmeyecek yani yapıda hiçbir yük taşıyıcısı oluşamayacaktır (Şekil 2.3.a).



Şekil 2.3. OFET 'in çalışma prensibini anlatan enerji düzeyi diagramı (Singh and Saricicfi, 2006)

Kapı (gate) elektrotuna negatif voltaj değeri uygulandığı zaman ($V_g < 0$), organik yarı iletken/yalıtkan yüzeyinde pozitif yükler indüklenmektedir (p-tipi iletken kanal oluşumu) (Şekil.2.3.b). Eğer, kaynak-savak elektrotlarının fermi seviyesi organik yarı iletken materyalinin HOMO seviyesi ile uyumlu ise, kaynak ve savak arasında, uygulanan voltaj sayesinde pozitif yüklerden bir iletken kanal oluşumu sağlanır.

Kapı (gate) elektrotuna pozitif voltaj değeri uygulandığı zaman ($V_g > 0$), organik yarı iletken/yalıtkan yüzeyinde negatif yükler indüklenmektedir (n-tipi iletken kanal oluşumu) (Şekil.2.3.c). Eğer kaynak-savak elektrotlarının fermi seviyesi organik yarı iletken materyalinin LUMO seviyesi ile uyumlu ise, kaynak ve savak arasında, uygulanan voltaj sayesinde negatif yüklerden bir iletken kanal oluşumu sağlanır.

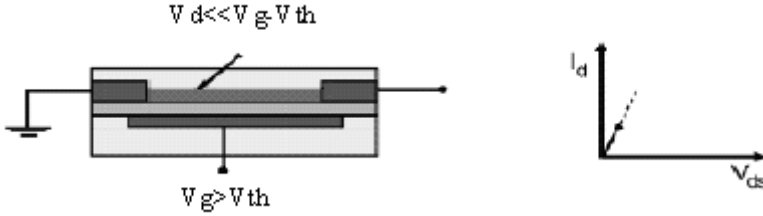
Organik yarı iletken materyaller bu davranış özelliklerinden dolayı pozitif yada negatif yük taşıyıcıları p-tipi yada n-tipi yarı iletken olarak adlandırılırlar. Bazı organik yarı iletken materyaller hem elektron hem de boşluk taşıma özelliğine sahip olabilirler. Bu tip materyallerden

oluşturulan transistörler ambipolar transistör olarak adlandırılır (Singh and Saricifci, 2006).

Alan etkili transistörlerin başlıca 3 çalışma durumu mevcuttur:

2.2.1. Doğrusal (Lineer) Rejim Bölgesi

Savak voltaj değerinin (V_d), kapı (gate) voltajı ile eşik değer (threshold) voltajı arasındaki potansiyel farktan ($V_g - V_{th}$) küçük olduğu durumda meydana gelir. Kanal yoğunluğu (channel density) düzenli (uniform) şekildedir. Oluşturulan iletken kanal direnç özelliği gösterir. Bu durumda iletken kanala doğru akan akım savak voltajının değeri ileri doğru orantılı olarak değişim gösterir. Şekil 2.4.'de alan etkili transistörün doğrusal (lineer) rejim bölgesi gösterilmiştir (Stadler, 2006).

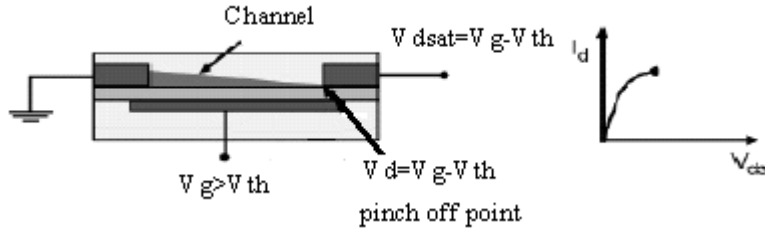


Şekil 2.4. I_{ds} akımının doğrusal (lineer) bölge rejimi

2.2.2. Kısırılma (Pinch Off) Noktasındaki Doyum (Saturation) Rejimin Başlaması

Savak voltaj değeri $V_g - V_{th}$ voltaj değerine eşit olduğu durumda, oluşturulan iletken kanal yoğunluğu (conductive channel density) düzenli

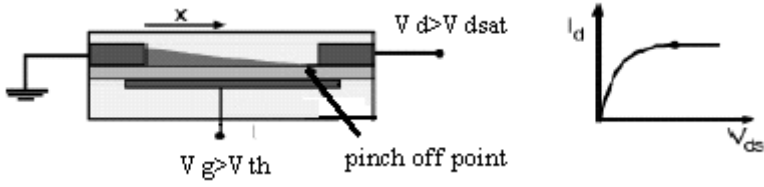
olmayan (non-uniform) bir yapıya dönüşür. Oluşturulan kanal kısıtılır (pinched) (gate ile drain elektrot arasında hiçbir potansiyel fark bulunmamaktadır). Bu bölgede artan kaynak-savak voltajına rağmen akım artmamaktadır, fakat tükenme (depletion) bölgesinin genişlemesi ve akımın sınırlandırılması sağlanmaktadır. Bu durum şekil 2.5.'te gösterilmiştir (Stadler, 2006).



Şekil 2.5. Kısıtılma (pinch off) noktasındaki doyum (saturation) rejimi başlangıcı

2.2.3. Doyum (Saturation) Bölgesi

Savak voltaj değeri $V_g - V_{th}$ voltaj değerinden büyük olduğu durumda transistör doyum (saturation) bölgesinde çalışmaktadır. Oluşturulan iletken kanal yoğunluğu düzenli olmayan yapıya dönüşür. Çıkış akımı, sabit bir değer alır ve savak voltaj değerinden bağımsızdır. Doyum (saturation) rejiminde kanala doğru sabit bir akım gözlenir. Kısıtılma (pinch off) noktası source elektrotuna doğru kayar. Bu sayede tükenme (depletion) bölgesinde genişleme meydana gelmektedir. Şekil 2.6'da transistörün doyum (saturation) bölgesindeki karakteristiği gösterilmiştir (Stadler, 2006).



Şekil 2.6. Transistörün doyum (saturation) bölgesi

2.3. Alan Etkili Transistörün Performans Karakteristikleri

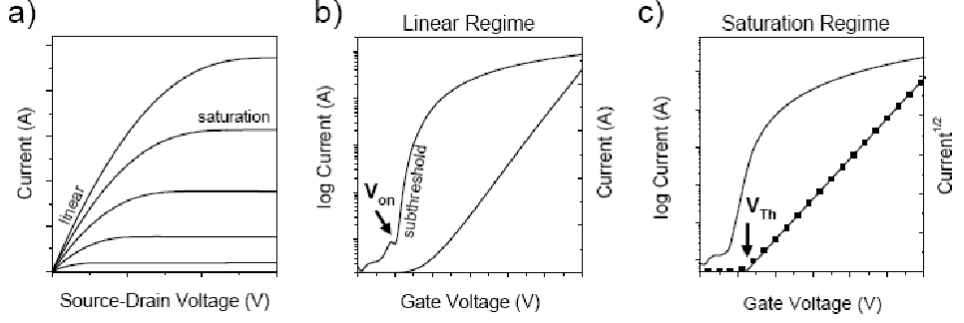
Organik alan etkili transistör performans karakteristikleri, birçok parametre yardımı ile tanımlanır. Bu parametreler:

1. Alan etkili mobilite değeri
2. Alt eşik değer eğrisi (subthreshold slope)
3. Açma/kapama (on/off) oranı
4. Geçiş iletkenlik (transconductance) değeri

Transistörden elde edilen bu parametreler yardımıyla, tasarlanan transistörün performans ve karakteristikleri belirlenerek elde edilen transistör hakkında fikir sahibi olunmaktadır (Singh, 2007a).

Aşağıdaki şekilde n kanallı organik alan etkili transistörün akım-voltaj karakteristikleri gösterilmektedir (Şekil 2.7.). Doğrusal (lineer) ve doyum (saturation) bölgesindeki transistör çıkış karakteristiği şekil 2.7.a'da, savak akımının ansızın yükseldiği andaki başlangıç voltajının (V_{on}) gösterildiği doğrusal (lineer) rejimdeki transfer karakteristik eğrisi şekil 2.7.b'de ve eşik değeri (threshold) voltajının gösterildiği doyum

(saturation) bölgesindeki transfer karakterisitk eğrisi şekil 2.7.c’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. N kanal organik alan etkili transistörün akım gerilim eğrileri
(Singh, 2007)

2.3.1. Mobilite Değerinin Hesaplanması

Alan etkili mobilite değeri, uygulanan elektrik alan başına ortama yük taşıyıcı hızı olarak tarif edilmektedir. Düşük savak (drain) voltajının, savak (drain) akımına doğrusal (lineer) olarak değiştiği doğrusal rejim bölgesinde aşağıdaki denklem yardımı mobilite değeri tespit edilir.

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

W...kanal genişliği

C_i =kapasitans

V_g = gate voltajı

L...kanal uzunluğu

I_d =drain akım

V_{th} =threshold voltajı

Eğer savak (drain) voltajı (V_d) kapı (gate) voltajından (V_g) daha negatif bir değerde olursa, biriktirme (accumulation) tabakasındaki kısırılma (pinch off) olayından dolayı transistör doyum rejimine

girmektedir. Transistörün doyum rejiminde iken aşağıdaki akım-gerilim denklemi elde edilir.

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

Transistör doyum (saturation) bölgesinde çalışırken, mobilite değeri $\sqrt{I_{ds}}$ değerine karşı V_g değerinin eğiminden hesaplanılır.

$$\mu = \frac{d\sqrt{I_d}}{dV_g} \frac{2L}{WC_i} \quad \text{mobilite değerinin hesaplanması}$$

Doğrusal (linear) ve doyum (saturation) bölgelerindeki mobilite değerlerinden, yüksek yük taşıyıcı yoğunluğuna sahip doyum rejimindeki mobilite değeri, hesaplanan mobilite değeri olarak seçilmektedir (Singh and Sariciftci, 2006).

2.3.2. Alt Eşik Değer (Subthreshold) Eğrisi Hesaplanması:

Alan etkili transistörlerde alt eşik değeri (subthreshold) eğrisi, transistöre uygulanan V_{gate} voltajının, I_d çıkış akımının logaritmik değişimine bağlı olarak aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır.

$$S = \left(\frac{\Delta \log(I_{ds})}{\Delta V_{gs}} \right)^{-1} \quad \text{alt eşik değer eğrisi denklemi}$$

Yukarıdaki denklem yardımıyla alt eşik değer eğrisi (subthreshold slope), tasarlanmış olan transistörün anahtarlama oranı (on-off ratio) logaritmik olarak artan çıkış akımının on durumundan off durumuna bağlı olarak (V/decade) tespit edilir. Hesaplanan bu değer sayesinde,

farklı yalıtkanlar üzerine kaplanan organik yarı iletken maddenin transistör karakteristiği üzerine etkisi incelenir. Bu denklem aracılığıyla transistörün nasıl bir transistör olduğu (kaliteli veya kalitesiz) anlaşılır (Singh, 2007).

Ayrıca oluşturulan transistörlerin, normalize alt eşik değer eğrisi (normalize subthreshold slope) denklemi yardımıyla kapı (gate) voltajı ile indüklenene yük taşıyıcı etkisinin, farklı yalıtkanlardaki organik yarı iletken ile yalıtkan madde ve yarı iletken ara yüzeyinin çıkış akımına etkisi incelenebilir. Aşağıda alan etkili transistörlerin normalize alt eşik değer eğrisi (normalized subthreshold slope) denklemi verilmektedir (Singh, 2007a).

$$S_n = C_x \left(\frac{\Delta \log(I_{ds})}{\Delta V_{gs}} \right)^{-1} V_n F_c m^2 \quad \text{normalize alt eşik değer eğrisi}$$

Alt eşik değer eğrisi (subthreshold slope) değeri, genel olarak yarı iletken ile yalıtkan arasındaki ara yüzey tuzaklarına, transistörü oluşturan maddeler içerisindeki tuzaklara (yalıtkan-yarı iletken vb.), yarı iletken ve yalıtkanın yüzey morfolojisine, oluşturulan transistörün yapısal özelliklerine, üretim koşullarına, ölçüm koşullarına bağlıdır. Bu değerlerin incelenmesi sayesinde, aynı koşullarda üretilen transistörlerin performans özellikleri karşılaştırılabilir. Kaliteli bir transistör üretimi için alt eşik değerinin olabildiğince düşük olması istenir. Organik yarı iletken/yalıtkan yüzeyden kaynaklanan yüksek alt eşik değeri (subthreshold), akım-gerilim karakteristiklerinin ölçümü esnasında ileri ve geri ölçüm değerlerinin taranması sırasında istenmeyen eğri kaymaları yani histerisis eğrileri şeklinde bozulmalara sebep olabilir (Stadler, 2006).

2.3.3. Açma/Kapama (On/Off) Oranı

Alan etkili transistörlerdeki diğer önemli bir parametrede transistörün transfer karakteristiğinden elde edilen açma/ kapama (on/off) değeridir. Alan etkili transistörün açık durumdaki (on state) savak (drain) akımının kapalı durumdaki (off state) savak (drain) akımına oranına olarak tespit edilir (I_{on}/I_{off}). Bu değer transistörün iyi bir anahtarlama karakteristiği sahip olması gerektiğinden dolayı yüksek bir değerde olması istenmektedir. Kaynak (source)-savak (drain) elektrotlarındaki kontak direnci etkisi ihmal edilirse bu değer genel olarak, transistörün mobilite değerine, gate yalıtkanın kapasitansına ve organik yarı iletken malzemenin iletkenliğine bağlı olarak değişmektedir (Singh, 2007a).

2.3.4. Geçiş İletkenlik (Transconductance) Değeri

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

$$g = \frac{\Delta I_{ds}}{\Delta V_{gs}} \quad \text{geçiş iletkenlik değeri}$$

Bu parametre alan etkili transistörün kazanç katsayısı olarak tanımlanır. Organik alan etkili transistörlerde kullanılan yüksek mobilite değerine sahip organik yarı iletkenlerde bu değer artmaktadır. Kaliteli bir

alan etkili transistörde bu değerin yüksek olması istenir (Singh et al., 2005a).

2.4. OFET’lerde Kullanılan Yalıtkan Malzeme

Organik alan etkili transistör tasarımları sırasında yalnızca organik yarı iletken malzeme seçimi etkili olmayıp, uygun kapı (gate) yalıtkan malzeme seçimi de transistörün performansını etkileyen önemli parametrelerden biri olmaktadır.

Mobilite, eşik değeri (threshold) voltaj değeri vb.. transistör parametreleri, transistörde kullanılan yalıtkan maddenin kimyasal yapısına ve dielektrik özelliklerine bağlıdır (Frank, 2007).

Alan etkili transistörlerdeki yalıtkan materyalindeki istenen özellikler:

1. Yüksek dielektrik katsayısına sahip olmalı
2. İstenmeyen tuzak etkisinden dolayı minimum safsızlık içermeli
3. Yüksek sıcaklıklarda termal kararlılık sağlamalı
4. Cam ve plastik yüzeylerde düzgün bir film yapısı oluşturmalı
5. Organik yalıtkan özelliği gösteriyor ise uygun kimyasal çözücülerde iyi çözülebilmeli

Belirlenen alanda elde edilen kapasitans değeri aşağıdaki denklem yardımı ile bulunur.

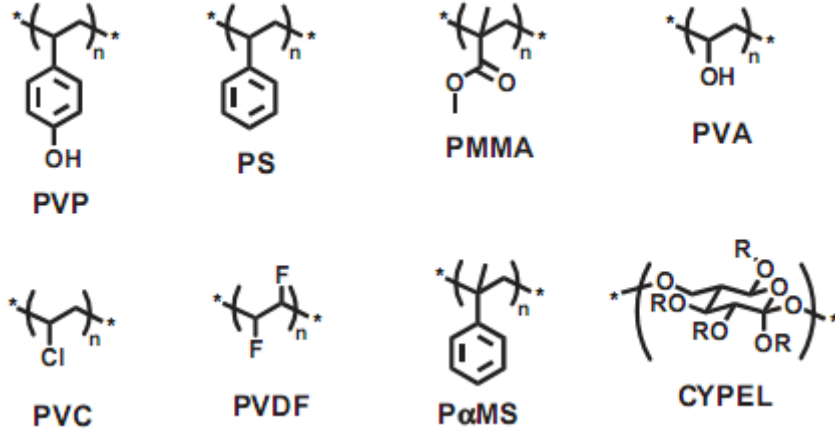
$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_i \cdot A/d \quad F \quad \text{kapasitans değeri}$$

$$A = W \cdot L \text{ (aktif alan)} \quad \epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$L = \text{kanal uzunluğu (m)} \quad W = \text{kanal genişliği (m)}$$

$$\epsilon_i = \text{yalıtkan malzemenin dielektrik katsayısı} \quad d = \text{yalıtkan kalınlığı (m)}$$

Organik elektronik teknolojilerin uygulamalarında, çözelti yöntemi uygulanarak elde edilen gate 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 (ϵ değeri) dolayı istenilen yalıtkan materyal olmaktadır (Facchetti et al., 2007). Aşağıdaki şekil 2.8’de organik alan etkili transistörlerde yalıtkan olarak kullanılan bazı polimerlerin kimyasal yapıları gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Organik transistörlerde yalıtkan malzeme olarak kullanılan bazı polimerlerin kimyasal yapıları

Alan etkili mobilite değerlerinin organik yarı iletken yapılarındaki farklı polimerik yalıtkan etkisi üzerindeki ilk detaylı çalışma Peng ve arkadaşları tarafından bildirilmiştir (Peng et al., 1990). Peng tarafından yapılan çeşitli yalıtkanlar; CYEPL (siyanaetilpulluan), PVA (polivinilalkol), PVC (polivinilklorür), PMMA (polimetilmetakrilat) kullanılarak tasarlanan transistör çalışmalarında yalıtkanın ϵ değeri ile alan etkili mobilite değeri arasında kuvvetli bir ilişki olduğu tespit edilmiştir (Peng et al., 1990). 2002 yılında PVP tabanlı yalıtkanın detaylı olarak incelediği Klauk ve arkadaşları, çapraz bağ (cross-linked) işleminin PVP polimer maddesi üzerindeki etkisini araştırmıştır ve çapraz bağ (cross-linked) yapılan PVP yalıtkan yüzeyinin daha kaliteli bir film oluşturduğu ve çok daha iyi bir yalıtkan özelliği gösterdiğini tespit etmiştir (Klauk et al., 2002). Son zamanlarda yapılan çalışmalarda, Veres ve arkadaşları yapı içerisinde taşıyıcı yüklerin oluşumunda sadece kaplanan organik yarı iletken materyalinin morfolojisinin etkili

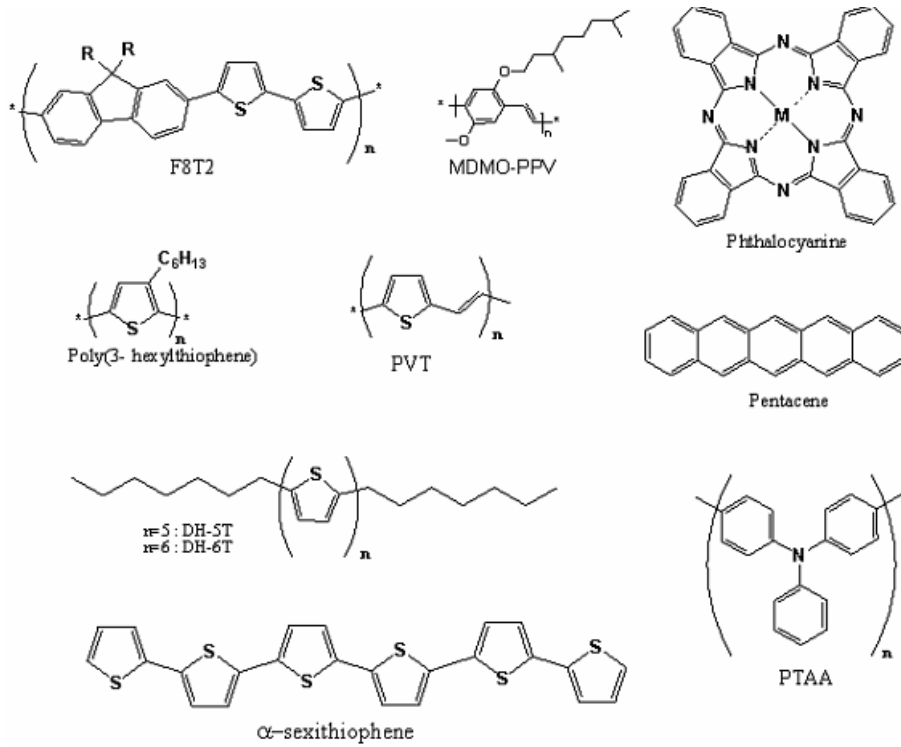
olmadığı, yalıtkan ve yarı iletken materyaller arasındaki uyumun önemli bir rol oynadığını tespit etmiştir (Veres et al., 2003).

Chua ve arkadaşları BCB gibi hidroksil grubu içermeyen yalıtkan malzemeleri n-kanallı konjuge polimer yapılı alan etkili transistör yapılarında kullanmışlardır (Chua et al., 2005). Birçok polimerik yarı iletken malzemenin karakteristik özelliği, delik tuzaklama özelliğinin aksine güçlü elektron tuzaklama (p tipi özellik göstermesi) yeteneğine sahip olmasıdır (uygun düşük iş fonksiyonlu elektrotlarla). Yapılan çalışmalarda n-tipi organik materyallerde kullanılan hidroksil fonksiyon gruplarından dolayı yarı iletken/yalıtkan ara yüzeyinde elektron tuzakları bulunması nedeniyle bu tip yapılarda silanol grup yapısındaki SiO_2 yalıtkan film yapı formları kullanılmaktadır (Klauk et al., 2002). Elde edilen bu teori tam olarak doğru değildir, çünkü PVA gibi hidroksil fonksiyonel grubu içeren yalıtkan materyallerde elektron transportuna imkan tanımaktadır (Stadler, 2006). Bulunan bu sonuç vasıtasıyla, organik yalıtkan ve organik yarı iletken ara yüzeyler arasındaki çalışmalarla ambipolar teriminin gelişmesine büyük ölçüde katkı sağlamıştır.

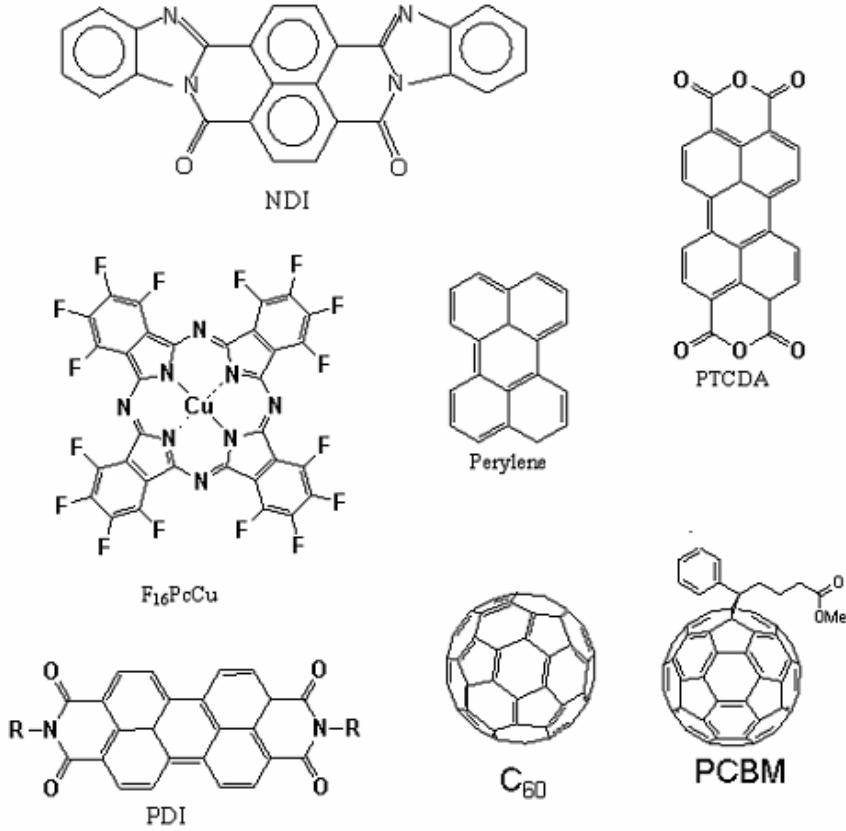
2.5. OFET’lerde Kullanılan Organik Yarı İletken Malzeme:

Günümüzde, π –konjuge organik oligomerler ve polimerler organik yarı iletken malzemeler içerisinde önemli bir araştırma konusu oluştururlar. Farklı yük taşıyıcı özelliği olarak, organik yarı iletken materyaller ya p-tip ya da n-tipi taşıyıcı özelliğine sahiptir. P tipi yarı iletken yapılarında çoğunluk taşıyıcıları boşluklar, n tipi yarı iletken yapılarında çoğunluk taşıyıcıları elektronlar olarak tanımlanır. Bundan

dolayı transistörler p tipi veya n tipi olarak adlandırılır. N tipi ve p tipi materyaller sırasıyla yüksek elektron ilgileri ve düşük iyonlaşma potansiyel değerleri olarak tanımlanır. Buna karşın, organik yarı iletken materyaller içerisinde şimdiye kadar daha çok p tipi olanların üzerine araştırmalar yapılmıştır. Bunun nedeni, organik alan etkili transistörlerde kullanılan p tipi organik yarı iletken malzemelerin havaya karşı daha kararlı ve n-tipi organik yarı iletkenlere nazaran daha yüksek bir mobilite değerlerine sahip olmalarıdır. P tipi organik yarı iletkenlerin tersine, birçok n tipi organik yarı iletken materyaller, yapılarında bulunan oksijen ve su ile reaksiyona giren organik anyonlar ve birtakım karbanyonlar nedeniyle havaya hassastırlar (Leeuw et al., 1997). Ayrıca n tipi organik yarı iletken materyaller düşük alan etkili mobilite değerine sahiptir. Fakat, n tipi organik yarı iletkenler organik elektronikte ihtiyaç duyulan bir alana sahiptir. Organik elektronik içerisindeki bütünleyici devrelerde ve birçok elektronik devre uygulamalarında ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 2.9. ve Şekil 2.10.'da sırasıyla organik alan etkili transistörlerde kullanılan p tipi ve n tipi organik yarı iletken materyallerin kimyasal yapıları gösterilmektedir.



Şekil 2.9. OFET’lerde kullanılan başlıca p tipi organik yarı iletken materyallerin kimyasal yapıları (Singh, 2007a)



Şekil 2.10. OFET’lerde kullanılan başlıca n tipi organik yarı iletken materyallerin kimyasal yapıları (Singh, 2007a)

Organik alan etkili transistörlerde kullanılan başlıca organik yarı iletkenler aşağıda belirtilmiştir.

2.5.1. Politiyofenler

Politiyofen yapılarına eklenen alkil zincirler çözünürlüğü arttırmasına rağmen, alkil eklenen taraf yalıtkan özellik gösterir. Eklenen zincir boyunun artmasıyla birlikte poli(3-butiltiyofen) ve poli(3-desiltiyofen) alan etkili transistör yapılarının mobilite değerlerinde büyük ölçüde düşüşler meydana gelmiştir (Paloheimo et al., 1991). Poli(3-

hekziltiyofen) [P3HT] ince filminden elde edilen mikro kristal yapı ile yüksek yük taşıyıcı mobiliteye ulaşılmıştır. Bu yapının iyonlaşma potansiyeli (yaklaşık 4.9-5.0 eV) altın gibi havada karalı birçok omik kontak için uygun değerler ihtiva eder. P3HT alan etkili transistör yapıları, yüksek değerli mobilitate değeri ve açma/ kapama (on/off) oranına sahip olmasından dolayı, polimer opto elektronik uygulama devrelerinde kullanım alanına sahiptir (Sirringhaus et al., 1998). Poli (2-hidroksietil metakrilat) yalıtkanı gibi küçük yüzey pürüzlülüğüne sahip uygun yalıtkan tabaka ile kullanılan P3HT OFET'lerin mobilitate değerinde artma gözlenmiştir (Park et al., 2004). Bu tip yapılarda pürüzlülük, seçilen çözücü materyal ile ilgilidir. Politiyofen tabanlı transistörlerde en yüksek mobilitate değeri kloroform çözücüsü kullanılarak elde edilmiştir (Dimitrakopoulos and Malenfant, 2002).

P3HT konjuge polimer kullanılarak elde edilen en yüksek boşluk mobilitate değeri $0.1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ civarlarındadır (Heeney et al., 2005).

2.5.2. Poliflorenler

Poliflorenler (örnek F8T2), birçok organik çözücüde tamamen çözünebilmektedirler. Moleküllerin bozulma sıcaklığı 400 derecenin üzerindedir. Bu nedenlerden dolayı basit üretim teknikleri ile (spin coating vb..) düzgün bir film oluşturulabilirler. Florenlerin, elektron mobilitate değerleri yüksektir. Poli(9,9-dioktilfloren) için 10^{-3} ile $10^{-2} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ve F8T2 için $6.10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ mobilitate değerleri elde edilmiştir (Street and Salleo, 2002). Salleo ve arkadaşları bu tip materyallerin yalıtkan yüzey üzerindeki kimyasal değişim etkileri üzerinde çalışmalar yapmışlardır (Salleo et al., 2002).

2.5.3. Çeşitli Konjuge Yapıdaki Moleküller

Belirli bir çözücü içerisinde çözülebilen polimer materyallere alternatif olarak kullanılan küçük molekülü organik yarı iletken materyaller, ya bir çözücüde çözülerek yada belli bir sıcaklık altında buharlaştırma (süblimleşme) yöntemi kullanılarak istenilen şekilde bir ince film tabaka oluşturulabilirler. Bu çeşit buharlaştırma yöntemi kullanarak üretilen materyallere en iyi örnek beş benzen zincirine sahip aromatik bir birleşik olan pentasen materyalidir.

Pentasen, organik alan etkili transistörlerde p tipi organik yarı iletken olarak en yaygın kullanım alanına sahip bir materyaldir. Polimerik yalıtkan kullanılarak elde edilen pentasen organik transistörlerdeki en yüksek mobilite değeri $3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ (Kelley et al., 2003) ve kimyasal olarak değiştirilen SiO_2/Si tabaka üzerine oluşturulan pentasen organik transistörden elde edilen en yüksek mobilite değeri $6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ olarak tespit edilmiştir (Eder et al., 2004). N tipi organik materyaller içerisinde fulleren ve türevleri, transistör uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır. Polimerik yalıtkan kullanılarak tasarlanan ve hot wall epitaxy yöntemi kullanılan alan etkili transistörlerde $6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ mobilite değerlerine ulaşılmıştır (Huitema et al., 2005). Küçük molekülü organik yarı iletken materyallerden fulleren türevi PCBM (Fenil C61 butirik asit metil ester) yapısındaki yan zincir bağı nedeniyle bir çözücüde çözülebilir bir davranış gösterir. Bu da bu kimyasal maddenin belli bir çözücüde çözülerek düzgün bir ince film oluşturulmasını sağlar. Polimerik yalıtkan kullanılarak yapılan PCBM tabanlı OFET’lerde mobilite değeri $0.2 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ değerlerinde elde edilmiştir (Singh et al, 2005a). Değişik sıcaklıklarda sıvı kristal fazı oluşturan organik

materyallere bağılı küçük molekülü yan zincir bağıları, çözelti bazında yüksek kristal yapılı ince film oluşumunu sağlamaktadır. Hekzabenzokoroneler gibi diskotik sıvı kristal moleküller diskotik dizileri boyunca mobilite değeri $0.01 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ civarında elde edilmektedir (Van de Craats et al., 2003).

Konjuge oligotiyofenlerin yük taşıyıcı mobilite değeri, oligotiyofen halkasının sonuna eklenen alkil zinciri sayesinde artabilmektedir (Hotta et al., 1991). Bütün tiyofen oligomerler arasında α -seksitiyofen (α -6T) ve türevleri aktif organik materyal olarak geniş bir kullanım alanına sahiptir. α -6T OFET'lerin taşıyıcı mobilite değeri, $10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ile $0.01 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ arasında elde edilmiştir (Horowitz and Hajlaoui, 2000). Son zamanlarda Halik ve arkadaşları tarafından alkil grubu içeren oligotiyofenler için mobilite değeri $1.1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ olarak tespit edilmiştir (Halik et al., 2003). Halik ve arkadaşları bu çalışmada alkil grubu içeren oligotiyofenleri, alkil yan zincir bağılarını farklı uzunlukta geliştirip sentezlemişler ve organik alan etkili transistörün performansının, eklenen yan zincir bağılarının uzunluklarına bağılı olarak değiştiğini tespit etmişlerdir.

Ftalosiyanimler, kusursuz opto elektronik ve kuvvetli optik absorplama özelliklerinden dolayı organik yarı iletken olarak yaygın kullanım alanına sahip bir materyaldir. Ftalosiyanimler, güneş pilleri ve foto iletkenlerde geniş uygulama alanlarına sahiplerdir (Bao et al., 1996). Metalofthalosiyanimin tabanlı OFET'lerde mobilite değeri yaklaşık $0.11 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ olarak rapor edilmiştir (Zang et al., 2004).

Pentasen organik yarı iletkeni ile birlikte SiO₂ ve Al₂O₃ gibi inorganik yalıtkan kullanılarak oluşturulan organik transistörler, yaygın olarak kullanılmaktadır (Lin et al., 1997). Al₂O₃ yalıtkanı üzerinde oluşturulan pentasen film tabanlı organik alan etkili transistörlerde mobilite değeri, 3.4 cm²/Vs kadar gelişme göstermiştir (Kelly et al., 2003). Benzer diğer çalışmalarda, pentasen materyali kullanılarak en yüksek mobilite değeri 6 cm²/Vs elde edilmiştir (Eder et al., 2004).

2.5.4. Fullerenler Ve Çözülebilir Türevleri

C₆₀ tabanlı organik alan etkili transistör çalışmalarının ilki 1993 yılında yapılmış ve 10⁻³cm²/Vs elektron mobilite değeri elde edilmiştir (Kastner et. al., 1992). Bu çalışmaları takiben, 1995 yılında Bell laboratuvarlarında 0.3 cm²/Vs mobilite değeri elde edilmiştir (Haddon et al., 1995). Ayrıca, 2003 yılında yapılan çalışmalarla mobilite değeri 0.5 cm²/Vs ulaşılmıştır (Kobayashi et al., 2003). Organik yalıtkan üzerine hot wall epitaxy yöntemi ile oluşturulan C₆₀ transistörden 0.63 cm²/Vs mobilite değerine ulaşılmıştır (Singh et al., 2005b). Son zamanlarda fullerene C₆₀ kullanılarak oluşturulan ince film çalışmalarında, C₆₀ organik yarı iletken materyali kaplanmadan önce organik yalıtkanın belirli sıcaklıklarda ısıtma işlemine tabi tutulup performans parametreleri incelenmiş ve bu çalışmalar ışığında mobilite değerine 6 cm²/Vs ulaşılmıştır (Singh et al., 2007c).

Metanofulleren gibi belirli bir çözücüde çözülebilen fullerenden olan PCBM (Fenil C61 butirik asit metil ester) genel olarak n tipi yarı iletken özelliği göstermekte ve mobilite değeri 10⁻³ ile 0.2 cm²/Vs arasında bulunmaktadır (Singh et al., 2005a).

Aşağıdaki Çizelge 2.1’de 1983 yılından 2005 yılına kadar organik alan etkili transistörlerde kullanılan organik yarı iletkenlerin mobilité gelişimleri gösterilmektedir.

Çizelge 2.1. Literatürde 1983’den 1996’ya kadar olan OFET’lerde ölçülen mobilité değerleri (Singh and Sariciftci, 2006)

<i>Year</i>	<i>Mobility (cm²/Vs)</i>	<i>Material (deposition method)*</i>	<i>I_{on}/I_{off}**</i>	<i>W/L</i>
1983	Minimal, not reported (NR)	Polyacetylene (s) (demonstration of field effect in an OTFT)	NR	200
1986	10 ⁻⁵	Polythiophene (s)	10 ³	NR
1988	10 ⁻⁴ 10 ⁻³ 10 ⁻⁴	Polyacetylene (s) Phthalocyanine (v) Poly(3-hexylthiophene) (s)	10 ⁵ NR NR	750 3 NR
1989	10 ⁻³ 10 ⁻³	Poly(3-alkylthiophene) (s) α - ω -hexathiophene (v)	NR NR	NR NR
1992	0.027 2 x 10 ⁻³	α - ω -hexathiophene (v) Pentacene (v)	NR NR	100 NR
1993	0.05	α - ω -di-hexyl-hexathiophene (v)	NR	100–200
1994	0.06	α - ω -dihexyl-hexathiophene (v)	NR	50
1995	0.03 0.038 0.3	α - ω -hexathiophene (v) . Pentacene (v) C ₆₀ (v)	>10 ⁶ 140 NR	21 1000 25
1996	0.02 0.045 0.13 0.62	Phthalocyanine (v) Poly(3-hexylthiophene) (s) α - ω -dihexyl-hexathiophene (v) . Pentacene (v)	2x 10 ⁵ 340 >10 ⁴ 10 ³	NR 20.8 7.3 11

Çizelge 2.2. Literatürde 1997'den 2005'e kadar olan OFET'lerde ölçülen mobilité değerleri (Singh and Sariciftci, 2006)

<i>Year</i>	<i>Mobility (cm²/Vs)</i>	<i>Material (deposition method)*</i>	<i>I_{on}/I_{off}**</i>	<i>W/L</i>
1997	1.5	Pentacene (v)	10 ⁸	2.5
	0.05	Bis(dithienothiophene) (v)	10 ⁸	500
1998	0.1	Poly(3-hexylthiophene) (s)	>10 ⁶	20
	0.23	α - ω -dihexyl-quaterthiophene (v)	NR	1.5
	0.15	Dihexyl-anthradithiophene	NR	1.5
2000	0.1	n-decapentafluoroheptyl-methylnaphthalene-1,4,5,8-tetracarboxylic diimide (v)	10 ⁵	1.5
	0.1	α - ω -dihexyl-quinquethiophene (s)	NR	NR
	0.1	Pentacene (v)	10 ⁵	1.3
2002	3	N, N'-dioctyl-3,4,9,10-perylene tetracarboxylic diimide (v)	10 ⁵	10
	0.6			
2003	0.001	CuPc (v)	2.3 x 10 ⁴	165
	0.002	Methanofullerene [6,6]-phenyl-C ₆₁ -butyric acid methyl ester (s)	NR	140
	0.53	C ₆₀ (v)	10 ⁸	40
	3.3	Pentacene(v)	1.6x10 ⁶	10
	6	Pentacene(v)		
	0.18	3', 4'-dibutyl-5-5-bis(dicyanomethylene)-5,5'-dihydro-2,2':5',2''-terthiophene (DCMT)	10 ⁶	10
2004	0.73	Poly(3-hexylthiophene) (s)	NR	12
	0.1	PTCDI-C ₅ (v)	10 ⁵	10
	0.004	C ₆₀ (v)	10 ⁵	250
	0.2	Methanofullerene [6,6]-phenyl-C ₆₁ -butyric acid methyl ester (s)	10 ³	23
	0.1	P3HT (s)	10 ⁵	200
	0.01	Methanofullerene [6,6]-phenyl-C ₆₁ -butyric acid methyl ester (s)	10 ⁶	25
2005	0.63	C ₆₀ (v)	10 ⁴	40
	0.015	Poly(3,3''-dialkyl-terthiophene)	10 ⁵	50
	6	C ₆₀ (v)	10 ⁴	40
	0.51	Pentacene (v)	10 ⁵	40
	0.06	C ₆₀ -fused N-methylpyrrolidine-meta-C ₁₂ phenyl (C60MC12) (s)	1.6x 10 ⁵	250
	0.02	Methanofullerene [6,6]-phenyl-C ₆₁ -butyric acid methyl ester (s)	7x 10 ⁴	250
	0.15	Thieno[2,3-b]thiophene	10 ⁵	NR

2.6. Organik Alan Etkili Transistörlerde Kullanılan Üretim Teknikleri

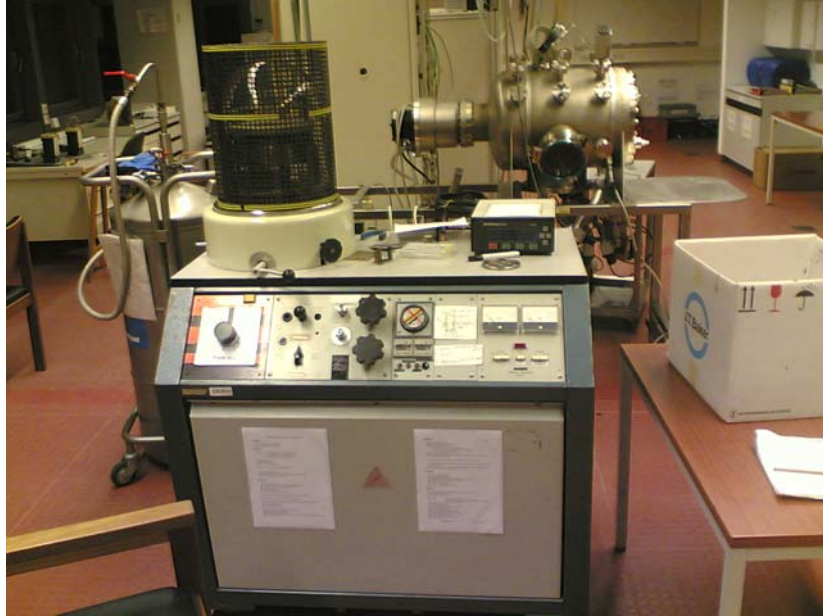
Son zamanlarda, organik alan etkili transistörlerde kullanılan materyallerde ve üretim teknikleri teknolojilerinde büyük ilerleme kaydedilmiştir. Rubren tek kristal yapısı ve pentasen çok kristal yapılı ince film için yüksek mobiliteler değeri bildirilmiştir. Kullanılan organik yarı iletkenlerin performansları üretim tekniklerindeki gelişim sayesinde büyük ölçüde artmaktadır. Genel olarak kullanılan teknikler (fotolitografi, buharlaştırma), maliyetlerinin çokluğu ve cihaz kullanımlarının zorluklarından dolayı halen geliştirilmektedir. Bu tekniklere alternatif üretim teknikleri olarak, düşük maliyete sahip döndürme kaplama (spin coating) ve baskılama (printing) tekniği ortaya çıkmıştır. Kullanılan bu teknikler, organik alan etkili transistör teknolojisinin gelişimini ilerletmiş ve organik optik teknolojisinde ve elektronik devre mimarisinde umut verici gelişmeler doğurmuştur (Sun et al., 2005).

Farklı ince film tabakalarından meydana gelen organik transistörlerdeki tabakalar arasındaki ara yüzeyler, transistör parametrelerini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Oluşturulan katmanlar arasındaki uyum, sadece moleküllerin düzenini arttırarak yüzey hatalarını azaltmaz ayrıca yüklerin enjeksiyonunu ve iletken kanaldaki yük transferini kolaylaştırır (Sun et al., 2005).

Organik transistörlerde kullanılan başlıca üretim teknikleri; Vakum buharlaştırma tekniği, Langmuir-Blodgett tekniği ve çözelti prosesli döndürerek kaplama yöntemi (solution process deposition) olarak bilinir.

2.6.1. Vakum Buharlaştırma Tekniği

Vakum buharlaştırma tekniği, günümüzde en çok kullanılan tekniklerden biridir. Organik yarı iletken ince filmler, yüksek vakum altında özel kapalı bir bölme içerisinde kaplanacak materyal süblimleştirilerek oluşturulur. Yüzey sıcaklığının ve buharlaştırma oranının kontrolü ile farklı kalınlıklarda istenilen yapıda ince film yüzeyler elde edilebilmektedir. Yapı içerisinde kullanılan organik materyalin safsızlık düzeyi önemli bir parametredir. Vakum buharlaştırma tekniği kullanılarak meydana getirilen organik transistörlerin mobilite değeri, çözelti biriktirme yöntemi kullanılarak oluşturulan organik transistörlerinkinden yaklaşık 10 kat daha büyük değerlerdedir. Aşağıdaki şekil 2.11.'de tipik bir vakum buharlaştırma sistemi görülmektedir.



Şekil 2.11. Avusturyanın Johannes Kepler üniversitesinde kullanılan vakum buharlaştırma cihazı

Pentasen, ftalosiyenin (phthalocyanine), oligotiyofen, gibi organik küçük moleküllerle oluşturulan ince film yüzeyler bu teknik kullanılarak meydana getirilir. Bununla birlikte, vakum buharlaştırma tekniğinin başlıca dezavantajları, karmaşık cihazlardan meydana gelmesi ve polimer yapılı materyallere uygun olmamasıdır (Sun et al., 2005).

2.6.2. Langmuir-Blodgett Tekniği

Langmuir-Blodgett (LB) ince film, bir tür çok ince kalınlıklı ve düzenli yapılı ince film olarak bilinir. Langmuir-Blodgett tekniği ise moleküler düzeyde oluşturulan filmin yapısını ve kalınlığını iyi bir şekilde kontrol edebilen bir tekniktir (Roberts, 1990). Langmuir-Blodgett tekniği, bilinen dikey daldırma tekniklerinden biridir. Bu teknik kullanılarak, neredeyse hiç hatasız tek moleküler tabaka (monolayer) elde edilebilir. Fakat bu teknik, hidrofobik zincir ve hidrofobik baş grup içeren sınırlı sayıda moleküller de organik alan etkili transistör materyali olarak kullanılabilir (Sun et al., 2005).

2.6.3. Çözelti Prosesli Döndürerek Kaplama Yöntemi Tekniği

Döndürme kaplama yöntemi (spin coating) kullanılarak kaplanan polimer özellikli materyalleri için kullanılan en yaygın yöntemdir. Seçilen çözelti damlatılarak veya numunenin bir kısmına dökülerek, kullanılan çözücünün kontrollü olarak buharlaşması sağlanır. İşlem sonunda, ince film tabaka elde edilir. Bu teknikte kullanılan organik maddenin, iyi çözünebilme özelliğine sahip olması gerekir. Elde edilen ince film tabakanın kalınlığı, kullanılan çözeltinin konsantrasyon ve döndürme kaplama cihazının (spin coating) döndürme hızının oranına

bağlıdır (Sun et al., 2005). Şekil 2.12.'de döndürme kaplama cihazı ile hazırlanan bir numune gösterilmektedir.



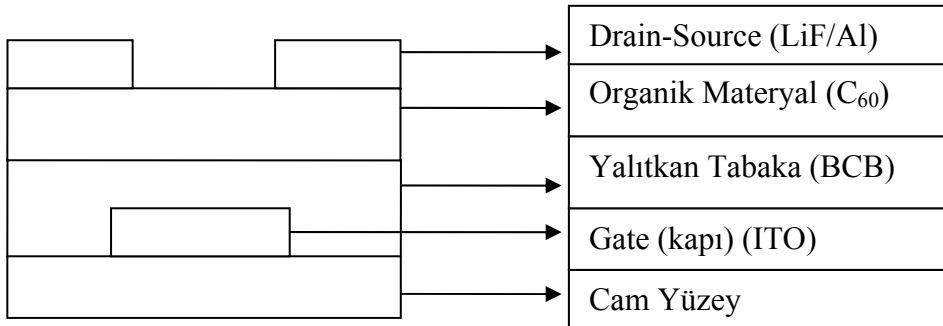
Şekil 2.12. Döndürme kaplama yöntemi ile oluşturulan ince film tabaka

3. DENEYSEL KISIM

3.1. Termal Vakum Buharlaştırma Yöntemi İle Oluşturulan N Tipi Organik Alan Etkili Transistörler

Gerçekleştiren bu çalışma, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü ve Avusturya Johannes Kepler Üniversitesi (Linz Institute For Organic Solar Cells Institute of Physical Chemistry) işbirliği Sokrates erasmus programı çerçevesinde 24.09.7-24.12.07 tarihleri arasında katıldığım program dahilindeki Araştırma Görevlisi Phillipp STADLER ile birlikte yapılan faaliyetleri kapsamaktadır.

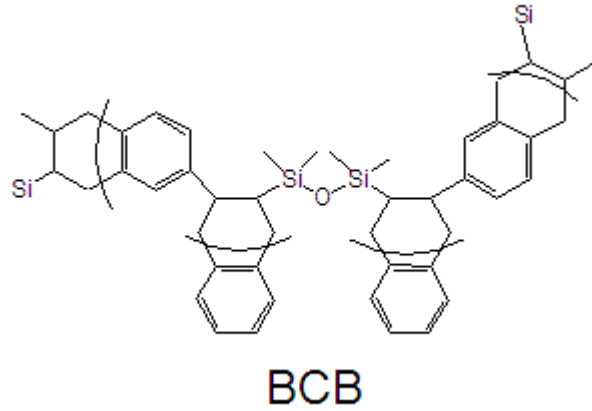
Yapılan ilk çalışmada, termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak organik yarı iletken tabaka oluşturulmuş ve oluşturulan organik transistörün performans ve karakteristikleri incelenmiştir. Şekil 3.1.'de üretilen alan etkili organik transistörün devre mimarisi gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Fulleren (C₆₀) tabanlı alan etkili transistörün devre mimarisi

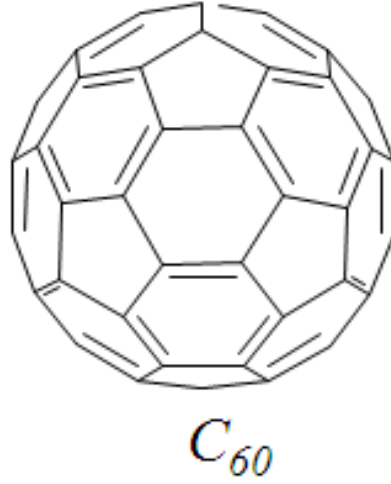
BCB (diviniltetrametildisiloksan bis(benzosiklobuten) yalıtkan maddesi, düşük dielektrik katsayısına sahip ($\epsilon_{BCB}=2.6$) ve sıcaklık termal genleşirme katsayısına bağlı termal kararlılığa sahip mükemmel bir

yalıtkan materyal özelliği göstermektedir (Singh et al., 2004). Şekil.3.2’de yalıtkan organik madde olarak kullanılan BCB materyalinin kimyasal yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3.2. BCB organik yalıtkan materyalin kimyasal yapısı.

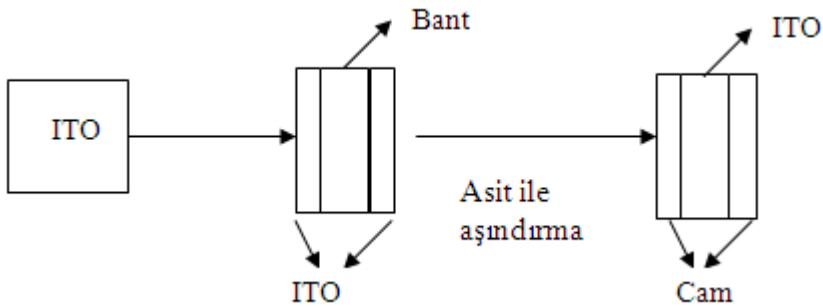
Organik yarı iletken materyal olarak elektron ilgisi yüksek ve yüzeyde iyi bir film oluşturma özelliğine sahip olan Fulleren (C_{60}) organik materyali kullanılmıştır (Matt et al., 2006). Şekil 3.3.’de organik yarı iletken materyal olan fulleren türevi C_{60} materyalinin kimyasal yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Fulleren (C_{60}) materyalinin kimyasal yapısı

3.1.1. Organik Alan Etkili Transistörlerde Gate Elektrotunun Oluşturulması

İstenilen kapı (gate) elektrotu oluşum şekli, aşağıda gösterilmektedir (Şekil 3.4). Gate (kapı) elektrotu olarak ITO (indiyum kalay oksit) iletken tabakası kullanılmıştır.



Şekil 3.4. Kapı (gate) elektrotunun oluşum işlemi

Kapı elektrotunun oluşum aşamaları:

1) Cam kesme işlemi;

ITO kaplı camlar 1.5x1.5 cm boyutunda kesilir.

2) Etching (asit ile aşındırma) işlemi;

Hangi bölgeye etching (asit ile aşındırma) yapılacaksa o bölge bantlanır. Behere, $Zn+HCl$ asit çözeltisi konulur ve bantladığımız camlar da asit çözeltisine konularak 5-10 dakika asit banyosunda bekletilir.

3) Temizleme işlemi;

Bantlar çıkartılarak içerisinde Helmanex çözeltisi (camları temizlemek için hazırlanmış özel sıvı) bulunan özel temizleme banyosunda iki saat bekletilir. Daha sonra İzopropanol, saf su, çözümleri ile numuneler temizlenir.

3.1.2. Organik Materyal Tabanlı Yalıtkan Tabaka Oluşturulması

Yalıtkan materyal olarak BCB (Benzo Siklo Buten) maddesi Dow Chemical firmasından satın alınmış ve döndürme kaplama (spin coating) tekniği kullanılarak kaplanmıştır. Aşağıdaki Çizelge 3.1.'de döndürme kaplama yöntemi kullanılarak elde edilen yalıtkan filmin, kalınlığını etkileyen döndürme hızı ve süresi verilmektedir.

Çizelge 3.1. Döndürme kaplama yöntemi parametreleri

Örnekler	Program	Zaman	Material	Rpm (hız)
PO15, PO33	01	60 sn.	BCB	1500

Döndürme kaplama işleminden sonra, yalıtkanın yüzeye daha iyi yapışması ve daha verimli olabilmesi için çapraz bağlama (cross-linking) işlemine geçildi. İlk önce kullanılan özel fırın, N₂ gazı verilerek steril (temiz) hale getirildi. Daha sonra, 2 saat boyunca 140°C sıcaklıkta BCB 'li numuneler fırının içinde çapraz bağlama (cross-linking) işlemine tabi tutuldu.

Sonuç olarak, döndürme kaplama yöntemi kullanılarak 1500 rpm'de Yaklaşık 2 µm kalınlığında homojen bir yalıtkan yüzey elde edildi.

3.1.3. Organik Yarı İletken Tabakanın Oluşturulması

Bu çalışmada, organik yarı iletken materyal olarak C₆₀ (fulleren) olarak bilinen elektron ilgisi yüksek n-tipi organik yarı iletken madde kullanılmıştır. Fullerenler küçük molekül özelliğine sahip olmasından dolayı termal vakum buharlaştırma sistemine uygundur (Kobayashi et al., 2003). Aşağıda Çizelge 3.2. de C₆₀ organik yarı iletken materyalin, termal buharlaştırma basamakları gösterilmektedir.

Kullanılan materyal=C₆₀

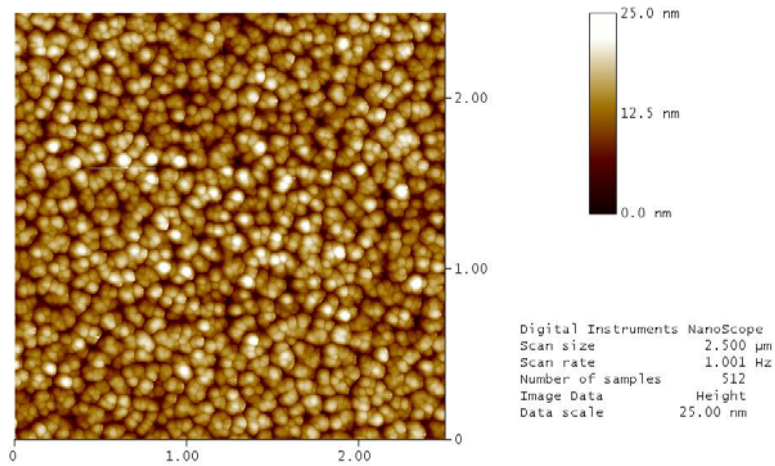
Uygulanan basınç: 5x10⁻⁷ bar

İşlem sıcaklığı= oda sıcaklığı

Çizelge 3.2. C₆₀ Organik materyalinin termal buharlaştırma basamakları

Zaman (dak.)	Oran (A°/saniye)	Kalınlık (nm)	Performans (%)	Sıcaklık (C°)	Vakum (10 ⁻⁶ bar)
0	0.8	1.4	4.8	19.8	0.5
2	0.9	12.2	4.7	19.8	0.89
4	0.9	22.4	4.7	19.7	0.8
6	0.9	34.2	4.6	20.1	0.74
8	0.8	44.5	4.6	20.1	0.7
10	0.7	53.6	4.7	20.1	0.67
12	1.0	62.7	4.7	20.3	0.67
14	1.0	75.1	4.6	20.4	0.66
16	1.0	86.4	4.6	20.4	0.65
18	1.0	98.5	4.6	20.5	0.64

Organik maddenin buharlaştırılması sonucu yaklaşık 100 nm kalınlığında ince film katmanı elde edildi. Elde edilen n tipi organik materyalin yüzey analiz şekili AFM (Atomik kuvvet mikroskobu) aracılığı ile incelenmiş ve şekil 3.5. elde edilmiştir.

**Şekil 3.5.** Fulleren (C₆₀) organik materyalinin AFM resmi

AFM resimleri incelendiğinde, C₆₀ organik materyalinin yüzeyde iyi bir ince film oluşturduğu gözlemlenmiş ve transistör yapımına uygun olduğu tespit edilmiştir.

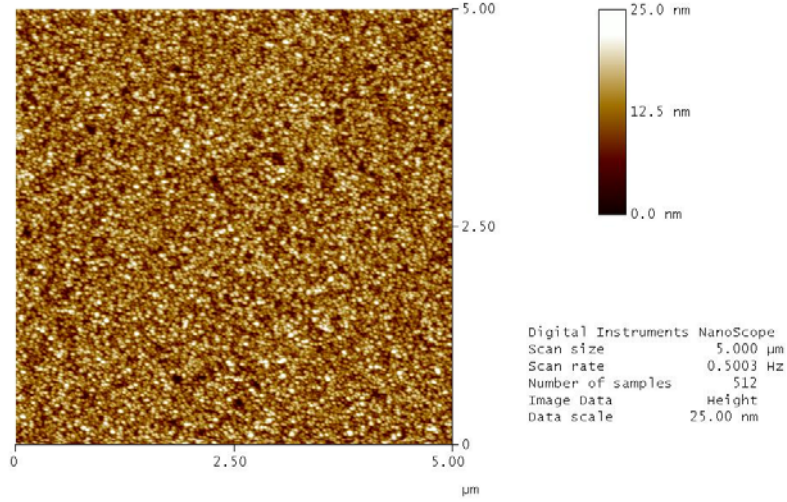
3.1.4. Metal Buharlaştırma İşlemi (LiF/Al)

Organik alan etkili transistör yapısında savak (drain)-kaynak (source) elektrotları olarak Lityum Florür ve Alüminyum metalleri kullanılmıştır. İstenilen özellikte elektrotlar elde etmek için, shadow mask denilen özel üretimli maske tasarımı yapılmıştır. Bu maske yardımıyla; Kanal boyu (L): 30 µm ve kanal genişliği (W)= 1.45 mm olarak elde edilmiştir. Elde edilen elektrotların, buharlaşma basamakları aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir (Çizelge 3.3.).

Çizelge 3.3. Kaynak (source)-savak (drain) elektrotlarının metal buharlaştırma parametreleri

Materyal	Uygulanan akım	Kalınlık	Buharlaştırma oranı (Å°/sani.)	Basınç (bar)
LiF	105A	0.6 nm	0.012	6x10 ⁻⁶
Al	97A	80 nm	0.05	7x10 ⁻⁶

Transistörün üst kısmını oluşturan source ve drain elektrotları (LiF/Al 0.6/80 nm) özel maske yardımıyla buharlaştırıldı. Elde edilen metal elektrotların yüzey analiz şekilleri AFM cihazı yardımıyla incelenmiştir (Şekil 3.6.).



Şekil 3.6. Oluşturulan metal elektrotların AFM resmi (LiF/Al)

3.1.5. Fulleren (C_{60}) Tabanlı OFET'in Akım-Gerilim Karakteristiklerinin İncelenmesi

Bu çalışmada, transistör yapısı: cam-ITO-BCB- C_{60} -LiF/Al olan organik alan etkili transistörün çıkış (output) karakteristiği ve transfer karakteristiği incelenerek, elde edilen transistörün parametreleri Agilent E5273A ölçüm cihazı kullanılarak irdelenmiştir. Fulleren türevlerinin havaya hassas bir yapıya sahip olmasından dolayı bütün karakterizasyon işlemleri, glowbox denilen özel oksijensiz ortamda (argon atmosferi altında) gerçekleşmiştir.

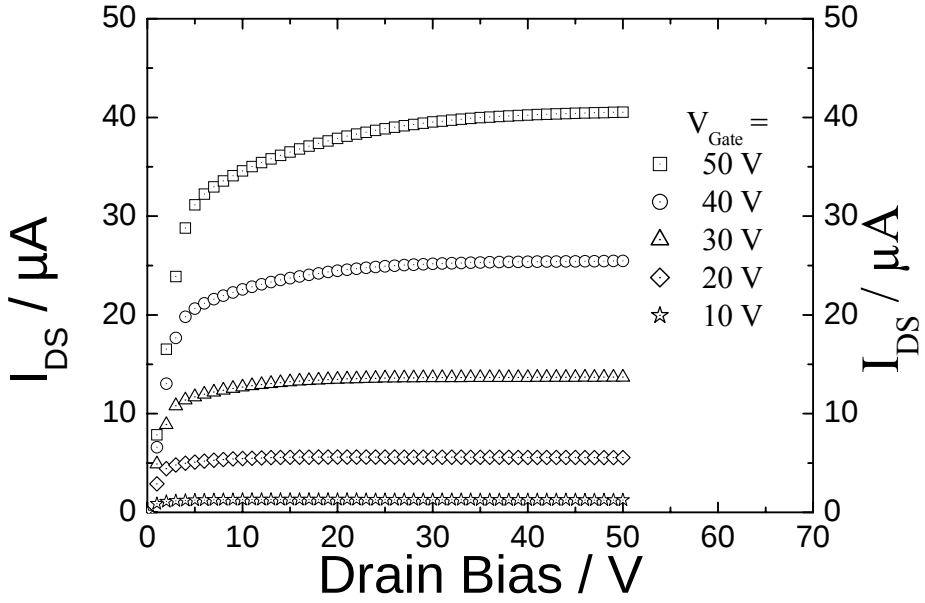
Aşağıdaki resim, Ege Üniversitesi erasmus örgenci değişim programı çerçevesinde gittiğim Linz / Johannes Kepler Üniversitesi, LIOS laboratuvarlarında elde edilen organik alan etkili transistörün elektriksel bağlantısını göstermektedir (Şekil 3.7.).



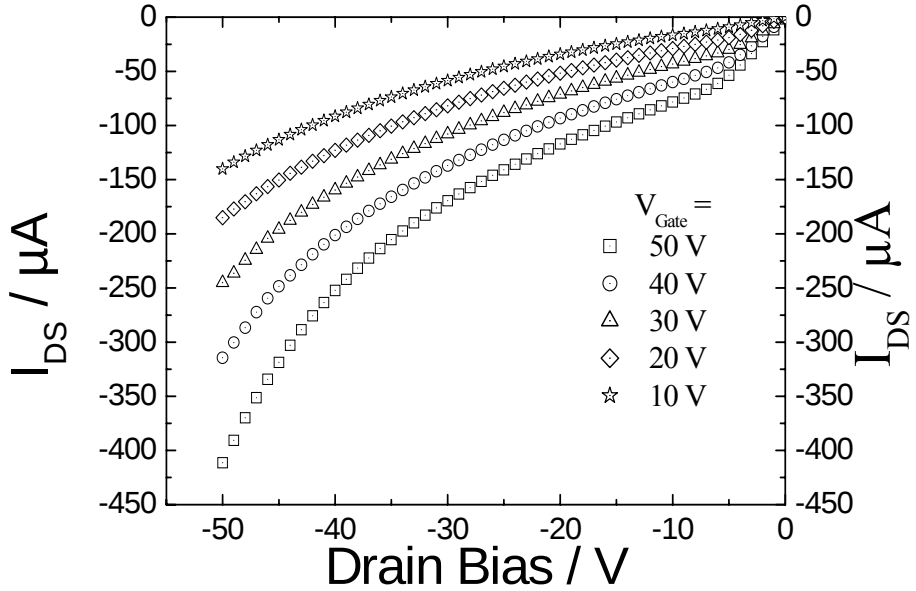
Şekil 3.7. Fulleren (C_{60}) kullanılarak oluşturulan OFET'in elektriksel ölçüm alınırken çekilmiş fotoğraf (Linz/Johannes Kepler üniversitesi)

C_{60} organik materyal tabanlı organik alan etkili transistörün (oda sıcaklığında); çıkış karakteristiği (V_d - I_d grafiği) ve transfer karakteristiği (V_g - $I_d^{1/2}$) incelenerek, organik transistörün kapasitans değeri ve mobilitesi hesaplanmıştır.

Aşağıda şekil 3.8. ve şekil 3.9.'larda gösterilen grafiklerde, farklı gate voltajları uygulandığında çıkış akım ve gerilim değerlerindeki değişim irdelenmiş ve literatüre uygun transistör karakteristiği elde edilmiştir (pozitif ve negatif bölgede).

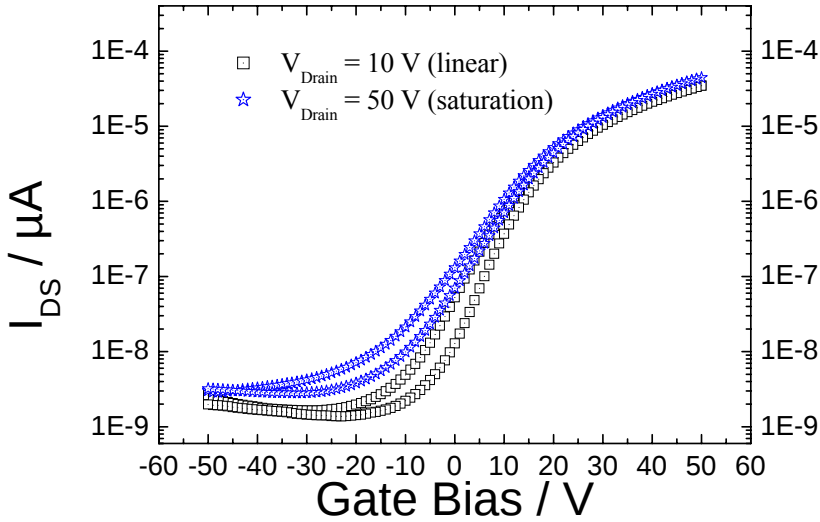


Şekil 3.8. Fulleren (C_{60}) OFET'in pozitif çıkış karakteristiği



Şekil 3.9. Fulleren (C_{60}) OFET'in negatif çıkış karakteristiği

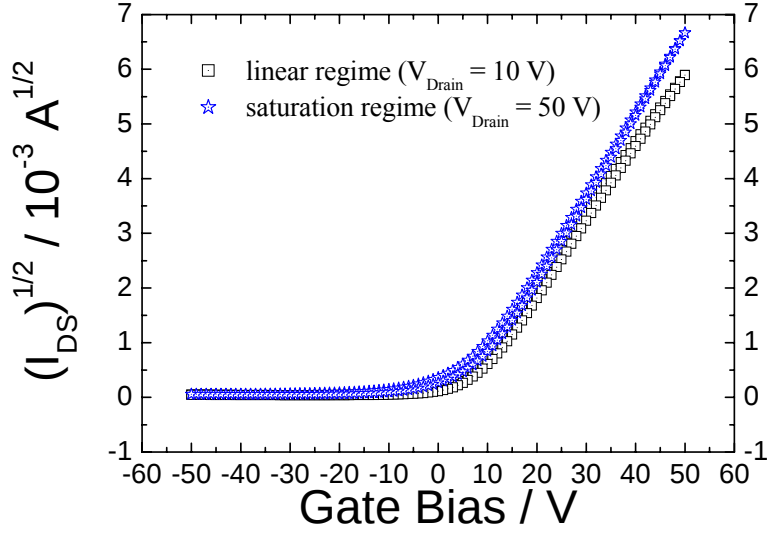
Aşağıdaki grafikte organik transistörün transfer karakteristiği incelenmiştir (Şekil 3.10.). Bu grafik kapı (gate) voltajının, drain-source akımına göre logaritmik değişimini göstermektedir. Burada, $V_d=10V$ sabit değerindeki (lineer bölgede) ve $V_d=50 V$ değerindeki (doyum bölgesindeki) transfer karakteristik değişim eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen bu şekilden, açma/kapama (on/off) oranının $V_d=50 V$ değerinde 10^4 den büyük olduğu görülmektedir. Elde edilen bu eğri transistörümüzün çalıştığını göstermektedir.



Şekil 3.10. Fullerene (C_{60}) OFET'in logaritmik transfer karakteristiği

Aşağıdaki şekil.3.11'de C_{60} tabanlı organik transistörün transfer karakteristiği gösterilmektedir. Bu grafik, kapı (gate) voltajının drain-source akımına göre değişiminin göstermektedir. Burada $V_d=10V$ sabit değeri (doğrusal bölge) ve $V_d=50 V$ (doyum bölgesi) değerindeki

değişimi elde edilmiştir. Bu eğri yardımı ile transistörün mobilite değeri ve eşik değeri (threshold) voltaj değeri hesaplanmaktadır.



Şekil 3.11. Fulleren (C_{60}) OFET'in transfer karakteristiği

Döndürme kaplama (spin coating) tekniği kullanılarak, elde edilen BCB (diviniltetrametildisiloksan-bis(benzosiklobuten)) ince film yüzeyinin kapasitans değeri aşağıdaki formül yardımıyla elde edilmektedir.

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_i \cdot A/d \quad A = W \cdot L$$

$C(F/cm^2) = C / \text{Aktif Alan} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_i / d$ birim alanda kapasitans değeri elde edilir.

$$\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ F/m} \quad \epsilon_i = 2.6(\text{BCB})$$

$$L = 25 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$W = 1.45 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$d = 2 \times 10^{-6} \text{ m}$$

gerekli hesaplamalar yapıldığında:

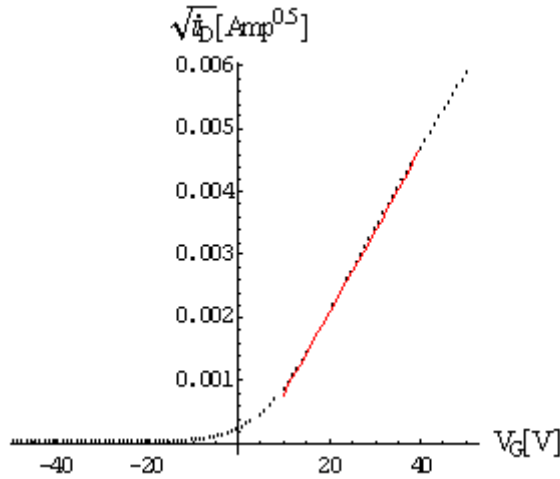
$$C(\text{F}/\text{cm}^2) = 1.115 \times 10^{-9} \text{ F}/\text{cm}^2 \text{ (SI) elde edilir.}$$

Organik alan etkili transistörün doyum (saturation) bölgesi durumundaki mobilite değeri, aşağıdaki formül düzenlenerek hesaplanır.

$$I_d = W/2L \cdot \mu_{\text{SAT}} \cdot C_i (V_g - V_t)^2$$

$$I_d^{1/2} = (W/2L \cdot \mu_{\text{SAT}} \cdot C_i)^{1/2} \cdot (V_g - V_t)$$

$$I_d^{1/2} = (W/2L \cdot \mu_{\text{SAT}} \cdot C_i)^{1/2} (V_g) - (W/2L \cdot \mu_{\text{SAT}} \cdot C_i)^{1/2} V_t$$



Şekil 3.12. Fulleren (C₆₀) OFET'in mobilite değeri eğrisi

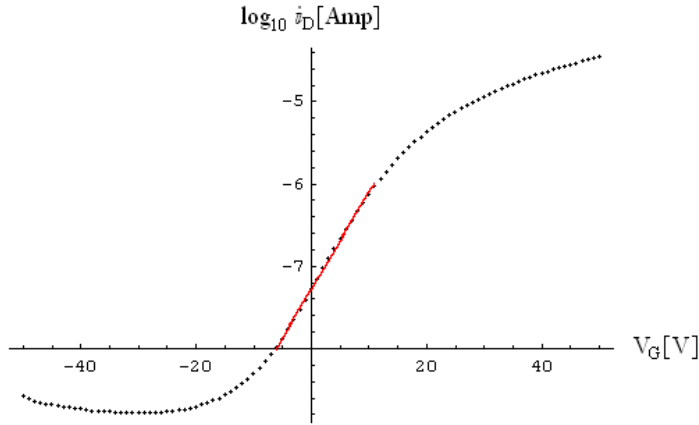
Yukarıdaki transfer karakteristiği (Şekil 3.12.) kullanılarak elde edilen birinci dereceden doğru denklemi yardımıyla mobilite değeri hesaplanır. Gerekli hesaplamalar, mathematica 5.2 programı aracılığıyla

yapıldığında, elektron mobilite değeri $0.5 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ olarak tespit edilmiştir.

Alan etkili transistörlerin, diğer performans parametresi olan alt eşik değer eğrisi (subthreshold slope) değeri;

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

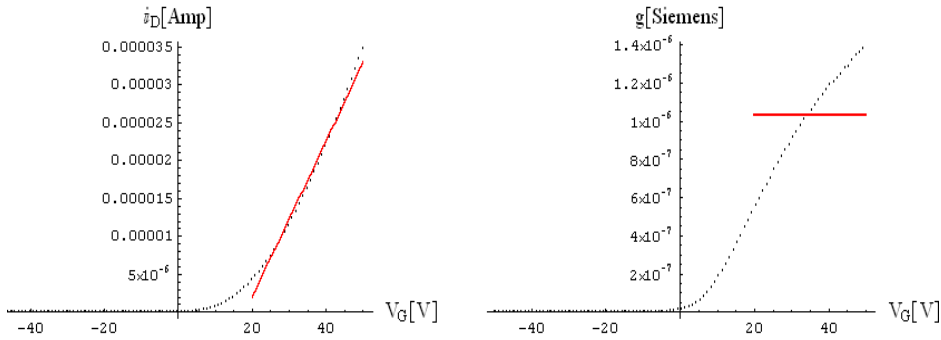
denklemleri yardımıyla, kapı (gate) voltajı ile indüklenen yük taşıyıcı etkisinin farklı yalıtkanlardaki organik yarı iletken madde ile yalıtkan ve yarı iletken ara yüzeyinin çıkış akımına etkisi incelenmiştir. Cam-ITO-BCB- C_{60} -LiF/Al yapısındaki alan etkili transistör için alt eşik değer eğrisi (subthreshold slope) değeri Şekil 3.13.'te verilmiş ve bu değer, Mathematica 5.2 programı aracılığıyla 8.4 V/decade olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.13. Fullerene (C_{60}) OFET'in mathematica 5.2 programı ile hesaplanan eşik değer (threshold) eğrisi

Yapılan bu çalışmada alt eşik değeri eğrisi (subthreshold slope) değerinin büyük çıkmasının en önemli sebebi kullanılan yalıtkan (BCB) ile organik yarı iletken (C_{60}) katmanları arasında meydana gelen ara yüzey tuzaklarıdır. Kullanılan yalıtkan madde kalın seçildiğinde (1-2 μm) bu değer 8-9 V/ decade arasında olduğu bildirilmiştir (Singh et al., 2005b).

Geçiş iletkenlik (transconductance) (g) değeri, sabit bir V_d voltajındaki I_{ds} - V_{gs} eğrisinin değişim oranı olarak hesaplanır. Elde edilen fulleren (C_{60}) tabanlı organik transistörün geçiş iletkenlik değeri, Mathematica 5.2 programı kullanılarak hesaplanmıştır ve elde edilen eğri aşağıda gösterilmiştir (Şekil 3.14.).

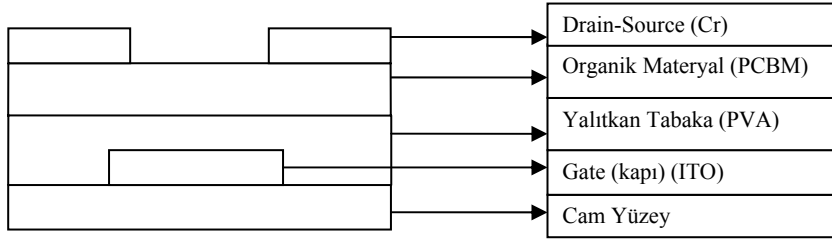


Şekil 3.14. Fulleren (C_{60}) OFET'in mathematica 5.2 programı ile hesaplanan geçiş iletkenlik eğrisi

Tasarlanan alan etkili transistörde, geçiş iletkenlik (transconductance) değeri $1.02 \mu\text{S}$ olarak hesaplanmıştır. İyi bir performans özelliği istenen bir alan etkili transistörde, bu değer yüksek olması gerekmektedir.

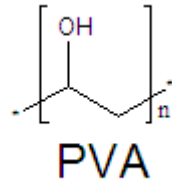
3.2. Döndürerek Kaplama Yöntemi İle Oluşturulan N Tipi Organik Alan Etkili Transistör Denemeleri

Yapılan ikinci çalışmada, döndürerek kaplama (spin coating) yöntemi kullanılarak organik yarı iletken tabaka oluşturulmuş ve oluşturulan organik transistörün performans ve karakteristikleri incelenmiştir. Şekil 3.15'te üretilen alan etkili organik transistörün devre mimarisi gösterilmektedir.



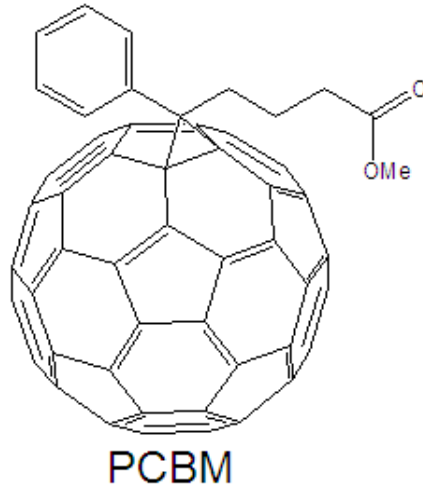
Şekil 3.15. PCBM tabanlı OFET'in devre mimarisi

PVA (polivinil alkol) yalıtkan maddesi, yüksek dielektrik katsayısına ($\epsilon_{PVA}=8$) ve pürüzsüz bir ince film oluşturulma yeteneğine sahip mükemmel bir yalıtkan materyal özelliği göstermektedir (Singh et al., 2005a). Şekil 3.16'da organik yalıtkan material olarak kullanılan PVA kimyasal yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3.16. PVA organik yalıtkan maddesinin kimyasal yapısı

Organik yarı iletken materyal olarak n tipi yarı iletken özellik gösteren ve belirli bir çözücü içerisinde çözülebilme özelliğine sahip olan PCBM (fenil C₆₁-butirik asit metil ester) organik materyali kullanılmıştır (Singh et al., 2005a). Aşağıdaki şekilde, n tipi organik yarı iletken materyal olan PCBM materyalinin kimyasal yapısı gösterilmektedir (Şekil 3.17.)



Şekil 3.17. PCBM organik materyalin kimyasal yapısı

3.2.1. PCBM tabanlı OFET'in Gate Elektrotunun Hazırlanması

Kapı (gate) elektrotunun hazırlanma basamakları; cam kesme, etching (asit ile aşındırma) işlemi ve temizleme işlemleri önceki alan etkili transistörün gate elektrotun hazırlanma işlemleri ile aynıdır.

3.2.2. PCBM Tabanlı OFET'in Yalıtkan Tabakasının Hazırlanması

Yalıtkan kısım, PVA (Polivinil alkol) olarak bilinen bir kimyasal kullanılmıştır. Bu kimyasal;

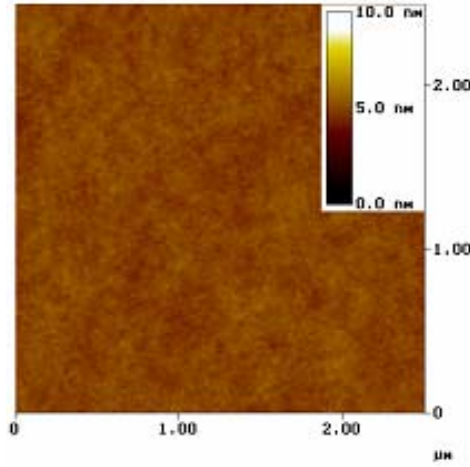
- Suda iyi çözünürlük sağlaması,
- Döndürerek kaplama (spin coating) işlemi sonrasında pürüzsüz bir yüzey elde edilmesi özelliklerinden dolayı tercih edilmiştir.

PVA çözeltisinin hazırlanması: %10 oranında saf sulu çözeltisi hazırlanan PVA döndürerek kaplama (spin coating) cihazında spin coating tekniği ile 1500 rpm hızında hazırlanarak, 0.8 ile 1µm arasında film kalınlığı elde edilmiştir (Çizelge 3.4.).

Çizelge 3.4. PVA yalıtkan tabakanın döndürerek kaplama yöntemi ile oluşturulması

Örnekler	Program	Zaman	Materyal	Rpm(hız)
PO12, PO12*	01	60 sn.	PVA	1500

Elde edilen PVA yalıtkan film yüzeyinin yüzey şekli (AFM resmi) şekil.3.18'de gösterilmiştir.



Şekil 3.18. PVA organik yalıtkan tabakasının AFM resmi

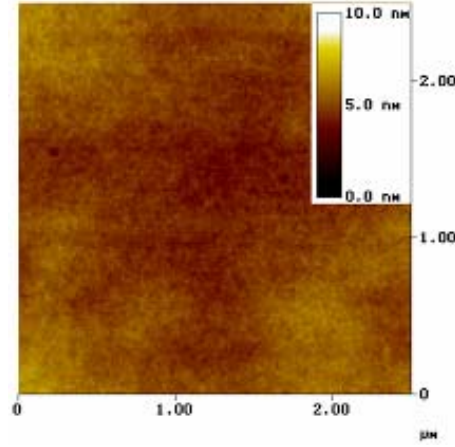
3.2.3. PCBM Tabanlı OFET'in Yarı İletken Tabakasının Hazırlanması

Organik yarı iletken materyal olarak PCBM (Fenil C61 butirik asit metil ester) kullanılmıştır. PCBM kimyasal maddesi ile %3 lük klorobenzen çözeltisi hazırlanarak, döndürerek kaplama (spin-coated) işlemi ile yüzeye kaplanmıştır (Çizelge 3.5.).

Çizelge 3.5. PCBM yarı iletken tabakanın döndürerek kaplama yöntemi ile oluşturulması

Örnekler	Program	Zaman	Materyal	Rpm(hız)
PO12, PO12*	01	60 sn.	PCBM	1500

Elde edilen PVA yalıtkanın üstüne kaplanan PCBM yarı iletken tabakanın AFM resmi aşağıda gösterilmiştir (Şekil 3.19). PCBM materyalinin yüzeyde iyi bir film oluşturduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3.19. PVA üzerine kaplanan PCBM tabakasının AFM resmi

PCBM kimyasal maddesi havaya çok hassas olduğu için döndürerek kaplama işlemi, glow-box içinde gerçekleştirilmiştir.

3.2.4. PCBM tabanlı OFET'in Metal Buharlaştırma İşlemi

PCBM tabanlı organik alan etkili transistörün üst kısmını oluşturan drain-source elektrotlarının elde edilmesi için shadow-mask denilen özel bir maskeden yararlanıldı. Bu maske sayesinde, kanal boyu (L) = 35 μ m ve kanal genişliği (W) = 1.45 mm olarak transistör tasarımı oluşturuldu.

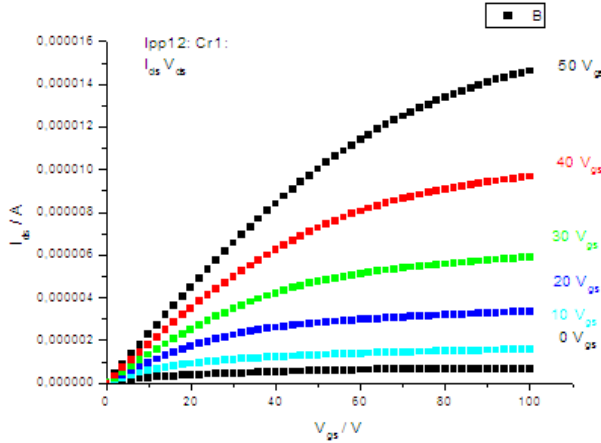
PCBM tabanlı organik alan etkili transistörün üst kısmında source-drain elektrotu olarak Krom metali kullanılmıştır. Aşağıdaki Çizelgede (Çizelge 3.6.) elde edilen elektrotun buharlaştırma basamak değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 3.6. Krom metalinin buharlaştırma değerleri

Materyal	Akım	Kalınlık	Oran(A°/sec)	Basınç(bar)
Cr	105A	50 nm	0.03	6×10^{-6}

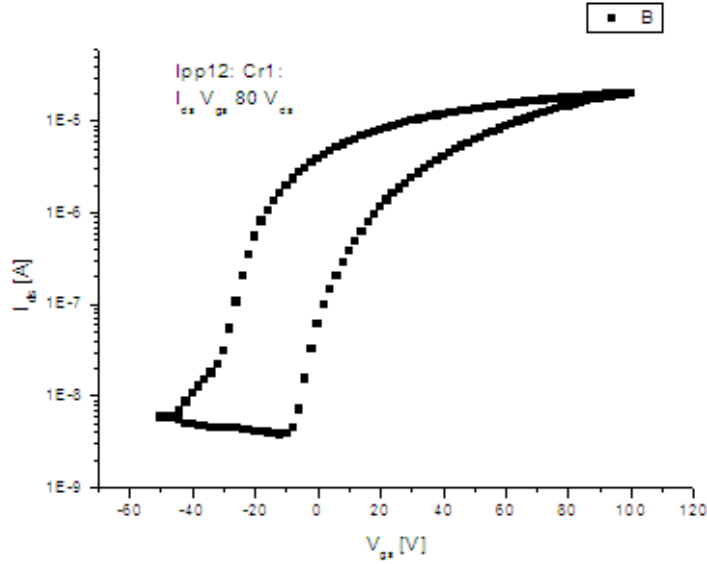
3.2.5. PCBM Tabanlı OFET'in Akım-Gerilim Karakteristiklerinin İncelenmesi

Organik alan etkili transistör yapısı: cam-ITO-PVA-PCBM-Cr olan organik alan etkili transistörün çıkış (output) karakteristiği (Şekil.3.20) ve transfer karakteristiği (şekil.3.21) incelenerek aşağıdaki grafikler elde edildi. Elde edilen organik transistörün parametreleri, Agilent E5273A ölçüm cihazı kullanılarak ölçülmüştür. PCBM, n tipi organik yarı iletken materyalinin havaya hassas bir yapıya sahip olmasından dolayı bütün karakterizasyon işlemleri glowbox denilen özel ortamda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.20. PCBM tabanlı OFET'in çıkış karakteristiği

Şekil 3.20.'de, elde edilen organik alan etkili transistörün I_{ds} - V_{ds} çıkış karakteristiği görülmektedir. Farklı kapı (gate) voltajları uygulandığında çıkış akım ve gerilim değerlerindeki değişim irdelenmiş ve istenilen transistör karakteristiği elde edilmiştir.



Şekil 3.21. PCBM tabanlı OFET'in transfer karakteristiği

Yukarıdaki şekilde, transistörün transfer karakteristiği incelenmiştir (Şekil 3.21.). Bu grafik uygulanan farklı kapı (gate) voltajlarının, drain-source akımına göre değişimlerini göstermektedir. Burada $V_d=80$ V, doyum bölgesindeki değerlerin değişimi gösterilmektedir.

Kapasitans denklemi yardımıyla, PVA organik materyal kaplı yalıtkan tabakanın birim alandaki kapasitans değeri elde edilmektedir.

$$C(\text{F}/\text{cm}^2) = \epsilon_0 \cdot \epsilon_i / d$$

$$\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ F/m} \quad \epsilon_i = 8(\text{PVA}) \quad d = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$$

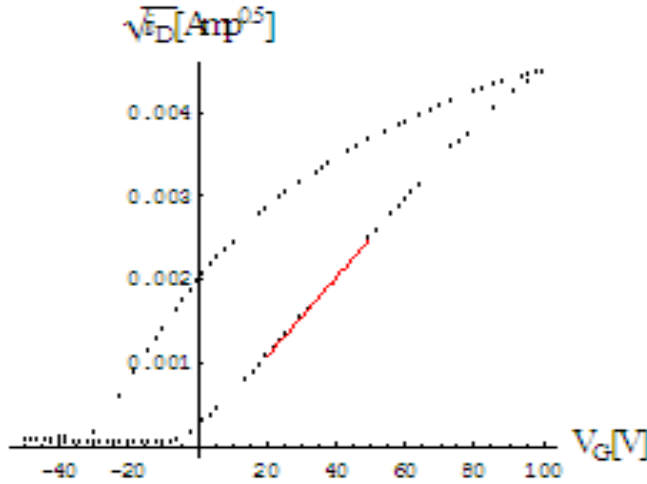
Gerekli hesaplamalar yapıldığında:

$$C(\text{F}/\text{cm}^2) = 1,79 \times 10^{-9} \text{ F}/\text{cm}^2 \text{ (SI) kapasitans değeri elde edilir.}$$

Elde edilen yapının mobilite değeri, Mathematica 5.2 programı aracılığıyla aşağıdaki denklem kullanılarak elde edilmiştir.

$$\mu = \frac{2 \cdot L}{W \cdot C} \left(\frac{\Delta \sqrt{I_{ds}}}{\Delta V_{gs}} \right)^2$$

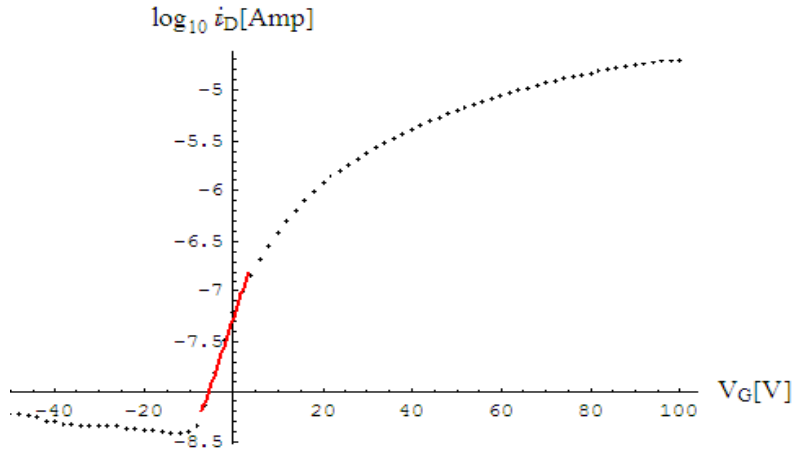
Mobilite değerinin hesabı, drain-source değeri 80 Vds değerine sahipken, Ids-Vgs arasındaki değerler incelenerek (doyum bölgesi) hesaplanmıştır. Şekil 3.22.'de gösterilen grafikte, transistörün doyum bölgesindeki mobilite değeri grafikteki kırmızı eğri yardımıyla hesaplanmış, elde edilen mobilite değeri (μ) yaklaşık $0.09 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1}\text{s}^{-1}$ olarak bulunmuştur.



Şekil 3.22. PCBM tabanlı OFET'in mathematica 5.2 programı kullanılarak elde edilen mobilite eğrisi

Cam-ITO-PVA-PCBM-Cr yapısındaki alan etkili transistörde, alt eşik değeri (subthreshold) eğrisi, transistöre uygulanan kapı (gate) voltajına bağlı olarak I_D çıkış akımının logaritmik değişimine göre hesaplanır.

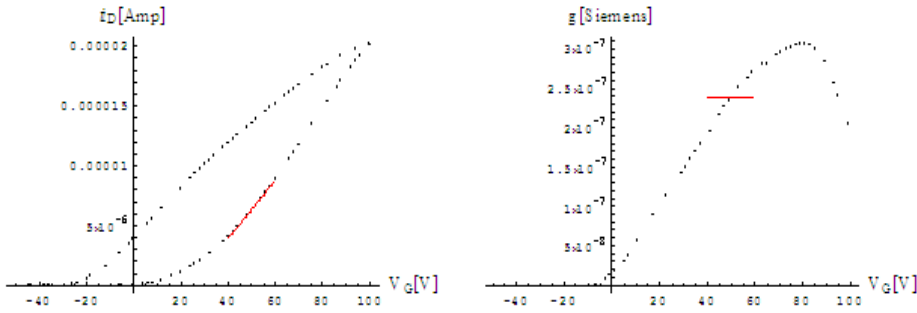
Transistörün transfer karakteristiği incelendiğinde, aşağıdaki grafik elde edilmiştir (Şekil 3.23.).



Şekil 3.23. PCBM tabanlı OFET'in mathematica 5.2 programı ile hesaplanan alt eşik değer eğrisi

Gerekli hesaplamalar yapıldığında alt eşik değeri eğrisi (subthreshold slope) değeri: $7,4 \text{ V decade}^{-1}$ olarak elde edilir. Eşik (threshold) değerinin büyük olması, yalıtkan film ile (PVA) organik yarı iletken madde arasındaki üretim tekniğinden kaynaklanan tuzakların ara yüzeyde bulunmasından dolayıdır.

Geçiş iletkenlik (transconductance) (g) değeri, Cam-ITO-PVA-PCBM-Cr yapısındaki transistör için mathematica 5.2 programı yardımıyla hesaplanmıştır. Aşağıdaki Şekil 3.24.'te elde edilen geçiş iletkenlik (transconductance) eğrisi gösterilmektedir.



Şekil 3.24. PCBM tabanlı OFET'in mathematica 5.2 programı kullanılarak elde edilen geçiş iletkenlik eğrisi

Gerekli hesaplamalar yapıldığında geçiş iletkenlik (transconductance) değeri 0.25μ siemens olarak elde edilmiştir.

3.2.6. PCBM Tabanlı OFET'in Kontak Direnç Etkisi

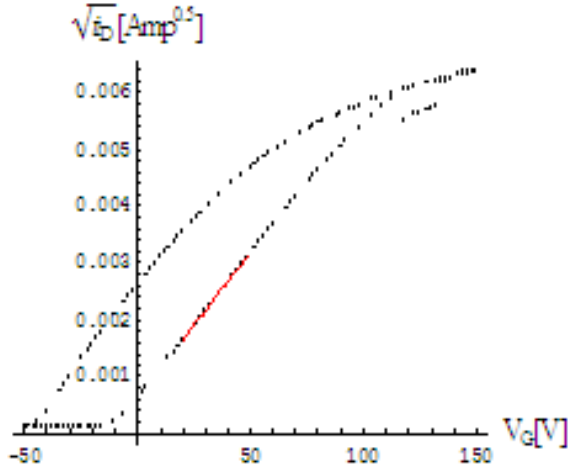
Yapılan bu çalışmada, transistör yapısı: cam-ITO-PVA-PCBM-Cr olan organik alan etkili transistörün sadece kontak elektrotları değiştirilmiş ve transistör yapısı: cam-ITO-PVA-PCBM-LiF/Al yapılarak Cr ile LiF/Al çıkış elektrotlarının, transistör parametrelerine etkisi incelenmiştir.

LiF/Al metallerinin buharlaştırma işlem parametreleri Çizelge 3.7.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.7. LiF/Al metallerinin buharlaştırma değerleri (PCBM)

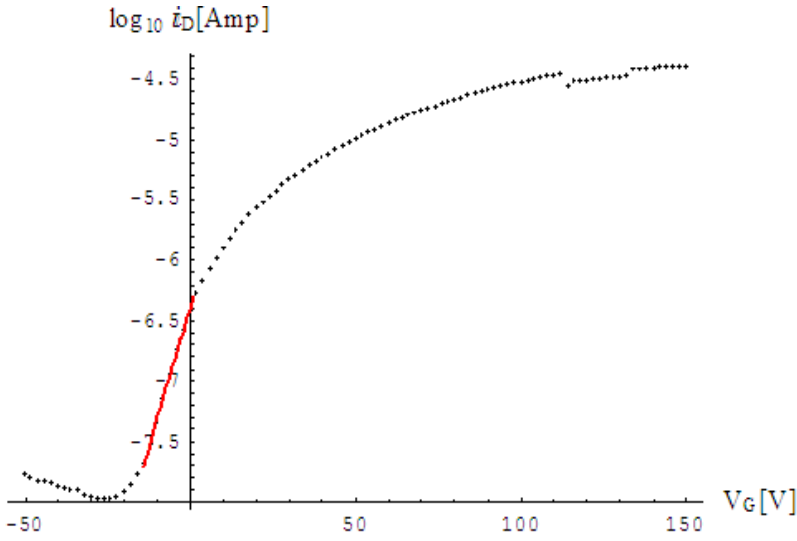
Materyal	Akım	Kalınlık	Oran(A°/sec)	Basınç (bar)
LiF	102A	0.6 nm	0.04	6×10^{-6}
Al	100A	50 nm	0.08	7×10^{-6}

Elde edilen: cam-ITO-PVA-PCBM-LiF/Al olan organik transistör yapısının transfer karakteristiği incelenmiş ve Şekil 3.25.'deki mobilite eğrisinden mobilite değeri; $\mu=0.10 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ olarak elde edilmiştir.

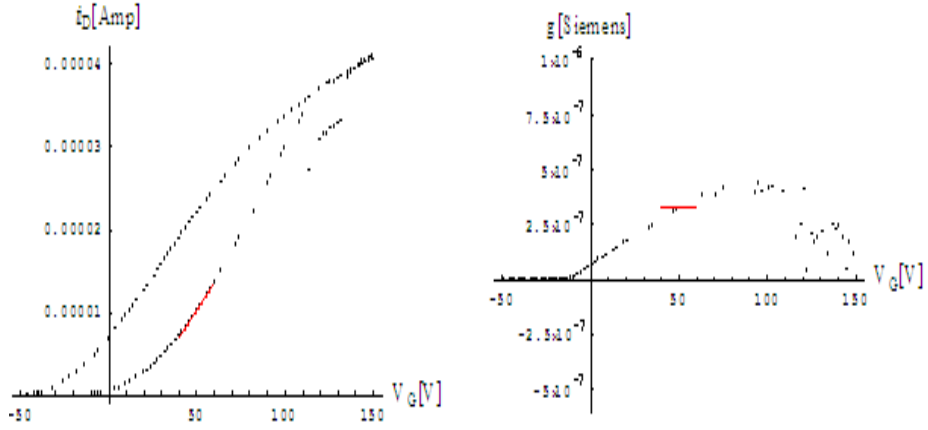


Şekil 3.25. PCBM tabanlı OFET'in farklı elektrot kullanılarak, mathematica 5.2 programı ile hesaplanan mobilite eğrisi

Gerekli hesaplamalar Mathematica 5.2 programı aracılığıyla yapıldığında alt eşik değeri eğrisi (Subthreshold Slope): $S=10.6 \text{ V cm}^{-2} \text{ decade}^{-1}$ (Şekil 3.26.) olarak, geçiş iletkenlik (transconductance)= $0.32 \mu\text{S}$ (Şekil.30) değerleri elde edilmiştir (Şekil 3.27.).



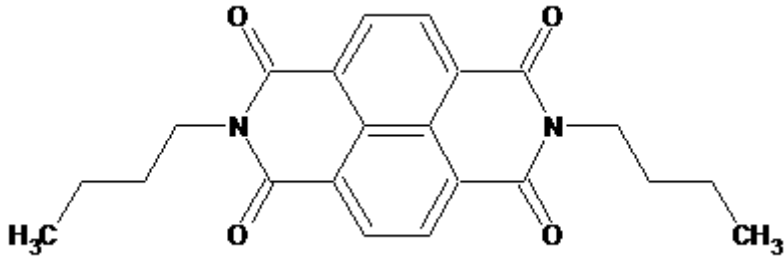
Şekil 3.26. PCBM tabanlı OFET'in farklı elektrot kullanılarak, mathematica 5.2 programı ile hesaplanan alt eşik değeri (subthreshold) eğrisi



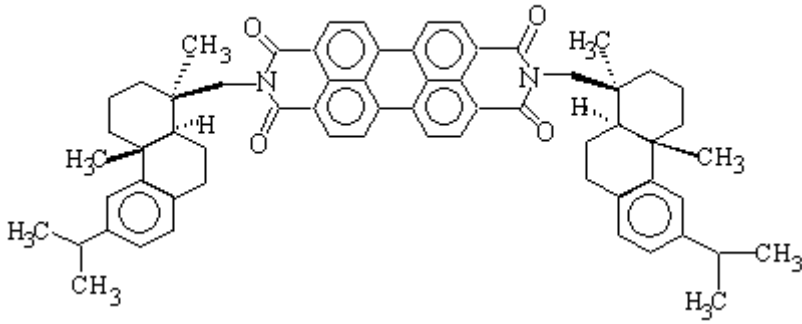
Şekil 3.27. PCBM tabanlı OFET'in farklı elektrot kullanılarak, mathematica 5.2 programı ile hesaplanan geçiş iletkenlik (transconductance) eğrisi

3.3. Naftalen Diimid Ve Perilen Diimid Moleküler Yapıları İle Oluşturulan OFET'ler

Bu çalışmada, naftalen diimid ve perilen diimid molekül yapıları kullanılarak belirli bir çözeltide çözülebilen n tipi organik alan etkili transistörler üretilmiştir. N,N'-bis-butyl-1,4,5,8-naftalen diimid-NDI (Şekil 3.28.) ve N,N'-bis-dehidroabiyetil-3,4,9,10-perilen diimid-PDI (Şekil 3.29.) moleküler yapıları enstitümüzde sentezlenmiştir. Sentezlenen naftalen diimid ve perilen diimid molekül yapıları, yüksek elektron mobilitelerine ve fulleren türevlerinin aksine havada kararlı bir yapıya sahiptirler (Sing et al., 2006c).

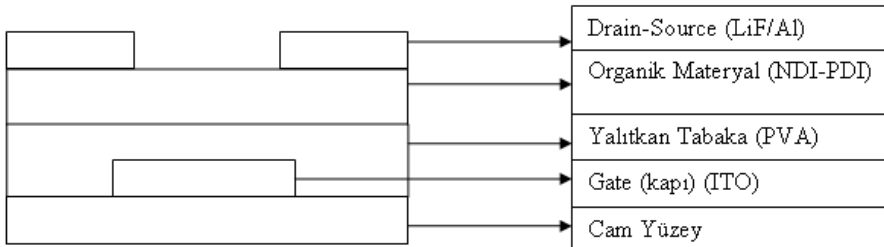


Şekil 3.28. N,N'-bis-butil-1,4,5,8-naftalen diimid-NDI



Şekil 3.29. N,N'-bis-(dehidroabiyetil)-3,4,9,10-perilen diimid-PDI

Döndürerek kaplama (spin coating) yöntemi kullanılarak organik yarı iletken tabaka ve organik yalıtkan tabaka oluşturulmuş ve şekil 3.30.'te gösterilen alan etkili organik transistörün devre mimarisi elde edilmiştir.



Şekil 3.30. NDI veya PDI tabanlı OFET'in devre mimarisi

3.3.1. NDI ve PDI Tabanlı OFET’lerin Gate Elektrotunun Hazırlanması

Kapı (gate) elektrotunun hazırlanma basamakları; cam kesme, etching (asit ile aşındırma) işlemi ve temizleme işlemleri önceki alan etkili transistörlerin gate elektrot hazırlama işlemleri ile aynıdır.

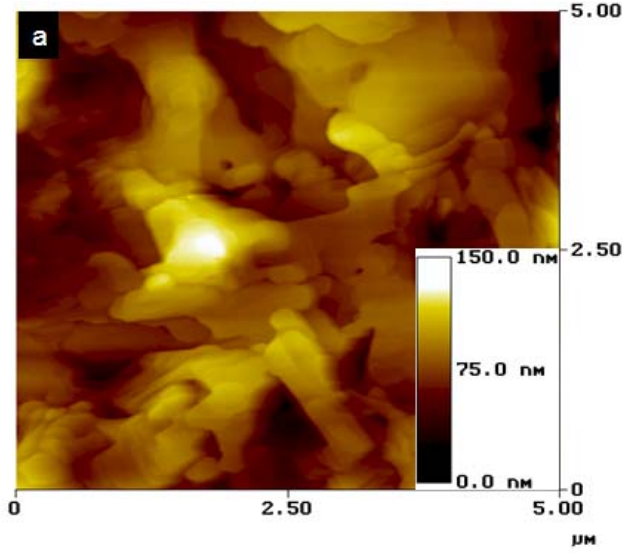
3.3.2. NDI ve PDI Tabanlı OFET’lerin Yalıtkan Tabakalarının Hazırlanması

Yalıtkan kısım PVA (Polivinil alkol) olarak bilinen bir kimyasal kullanılmıştır.

PVA çözeltisinin hazırlanması: döndürerek kaplama (spin coating) cihazında %10 oranında saf sulu çözeltisi hazırlanan PVA, spin coating tekniği ile hazırlanarak, yaklaşık 2 µm film kalınlığı elde edildi.

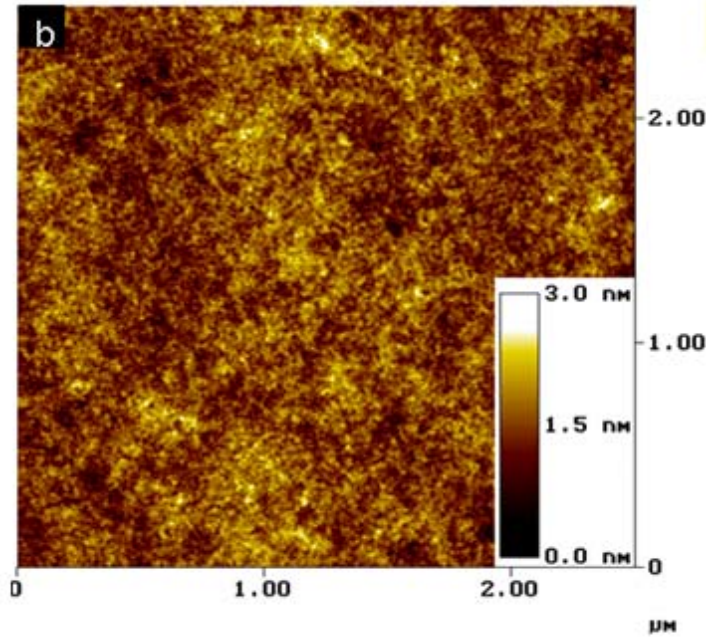
3.3.3. NDI ve PDI Tabanlı OFET’lerin Yarı İletken Tabakalarının Hazırlanması

Organik yarı iletken materyal olarak N,N'-bis-butil-1,4,5,8-naftalen diimid-NDI ve N,N'-bis-(dehidroabiyetil)-3,4,9,10-perilen diimid kullanılmıştır. N,N'-bis-butil-1,4,5,8-naftalen diimid-NDI kimyasal maddesi (%2 lik) asetonitrilde çözeltisi hazırlanarak, döndürerek kaplama (spin-coated) işlemi ile yüzeye kaplanmıştır. Elde edilen PVA yalıtkanın üstüne kaplanan N,N'-bis-butil-1,4,5,8-naftalen diimid-NDI yarı iletken tabakanın AFM resmi Şekil 3.31.’te gösterilmiştir. Yarı iletken materyalinin yüzeyde iyi bir film oluşturduğu aşağıda görülmektedir.



Şekil 3.31. PVA kaplı filmde N,N'-bis-(butil)-1,4,5,8-naftalen diimid molekülü için AFM resmi

Diğer numune ise N,N'-bis-(dehidroabiyetil)-3,4,9,10-perilen diimid kimyasal maddesi (%2 lik) klorobenzende çözeltisi hazırlanarak, döndürerek kaplama (spin-coated) işlemi ile yüzeye kaplanmıştır. PVA yalıtkanın üstüne kaplanan N,N'-bis-butyl-1,4,5,8-naftalen diimid-NDI yarı iletken tabakanın AFM resmi aşağıda gösterilmiştir (Şekil 3.32.).



Şekil 3.32. PVA kaplı filmde N,N'-bis-(dehidroabiyetil)-3,4,9,10-perilen diimid molekülü için AFM resmi

3.3.4. NDI ve PDI Tabanlı OFET'lerin Metal Buharlaştırma İşlemi

Naftalen diimid ve perilen diimid tabanlı organik alan etkili transistörün üst kısmını oluşturan drain-source elektrotları shadow mask denilen özel bir maskeden yardımıyla oluşturulur. Bu maske sayesinde kanal boyu (L) = 30 μm ve kanal genişliği = 1.45 mm elde edildi.

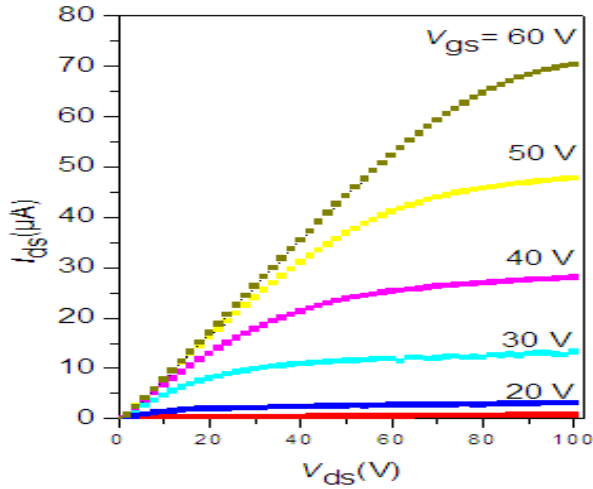
Organik alan etkili transistörün üst kısmında source-drain elektrotu olarak LiF/Al metali kullanılmıştır. Aşağıdaki Çizelgede (Çizelge 3.8.) elde edilen elektrotun buharlaştırma değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 3.8. LiF/Al metalinin buharlaştırma değerleri

Materyal	Uygulanan akım	Kalınlık	Buharlaştırma oranı (Å°/sani.)	Basınç (bar)
LiF	102A	0.6 nm	0.02	6×10^{-6}
Al	98A	65 nm	0.06	7×10^{-6}

3.3.5. NDI ve PDI Tabanlı OFET'lerin Akım-Gerilim Karakteristiklerinin İncelenmesi

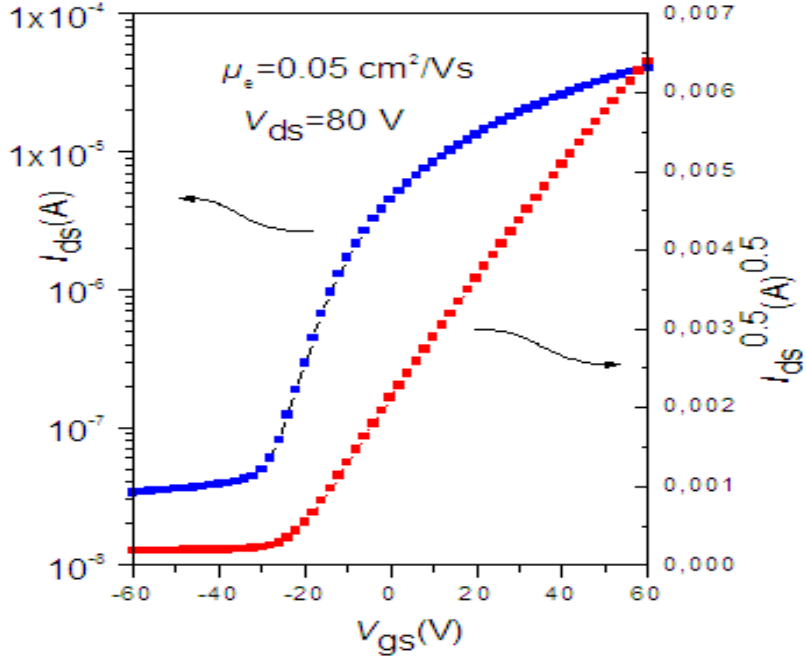
İlk olarak, transistör yapısı: cam-ITO-PVA-NDI-LiF/Al olan organik alan etkili transistörün çıkış (output) karakteristiği (Şekil 3.33.) ve transfer karakteristiği (Şekil 3.34.) aşağıda gösterilmiştir. Transistörün parametreleri Agilent E5273A ölçüm cihazı kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 3.33. Naftalen diimide tabanlı OFET'in çıkış karakteristiği

Elde edilen organik alan etkili transistörün I_{ds} - V_{ds} çıkış (output) karakteristiği, farklı kapı (gate) voltajları uygulandığında çıkış akım ve gerilim değerlerindeki değişim irdelenmiş ve istenilen transistör

karakteristiği elde edilmiştir (60V kapı (gate) voltajı uygulandığında yaklaşık 70 μ A çıkış akımı elde edilir).



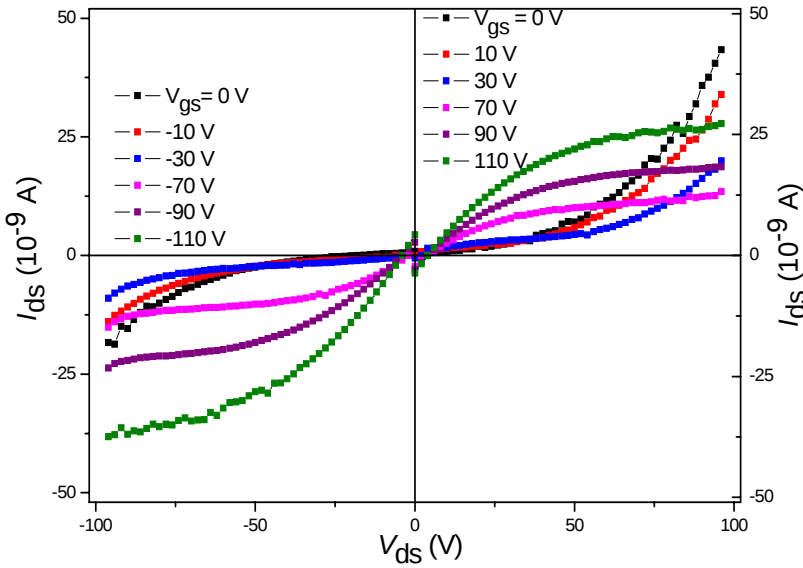
Şekil 3.34. Naftalen diimid tabanlı OFET'in transfer karakteristiği

Yukarıdaki Şekil 3.34.'de transistörün transfer karakteristiği incelenmiştir. Bu grafik, farklı kapı (gate) voltajlarının savak (drain)-kaynak (source) akımına göre değişimlerini göstermektedir. Burada $V_d = 80$ V (doyum bölgesi) değerindeki değişim elde edilmiştir. Transfer karakteristiği incelendiğinde on/off oranının 10^{-4} ten küçük olduğu görülmektedir.

Kapasitans hesabı, PVA dielektrik katsayısı ($\epsilon_i = 8$), kanal genişliği ve kanal boyu kullanılarak $C(\text{F}/\text{cm}^2) = 1,79 \times 10^{-9} \text{ F}/\text{cm}^2$ olarak elde edilir.

Hesaplanan kapasitif etki yardımıyla mobilite değeri, $\mu=0.05$ cm^2/Vs olarak tespit edilir.

Yapılan en son çalışmada, organik transistör yapısı olan: cam-ITO-PVA-PDI-LiF/Al olan organik alan etkili transistörün çıkış (Şekil 3.35.) ve transfer karakteristikleri (Şekil 3.36.) gösterilmiştir.



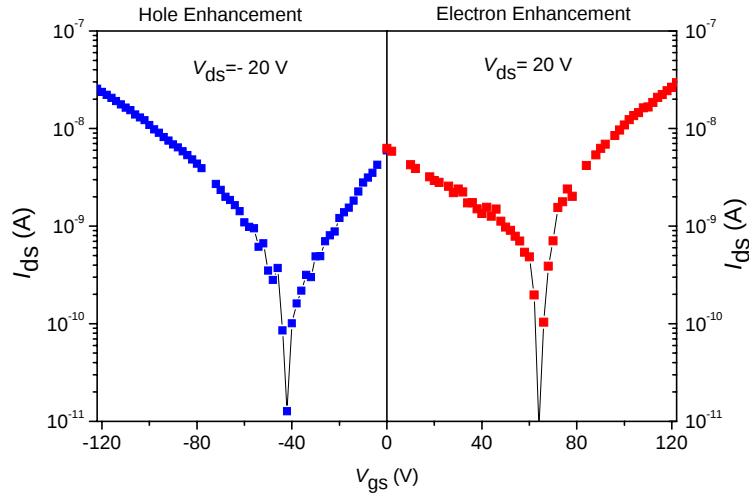
Şekil 3.35. Ambipolar N,N'-bis (dehidroabiyetil)-3,4,9,10-perilen diimid yarı iletken material tabanlı OFET'in çıkış karakteristiği

Elde edilen çıkış karakteristik eğrisinde , farklı kapı (gate) voltajları uygulandığında, çıkış akım ve gerilim değerlerindeki değişimi incelendiğinde organik yarı iletken maddenin ambipolar özellik gösterdiği tespit edilmiştir.

Eğer bir yarı iletken hem n-tipi hem de p-tipi iletkenliğe sahip olabiliyorsa, bu tip yarı iletkenlere ambipolar denir. Bu değişik davranış,

HOMO-LUMO arasına elektron sağlamak için konulan maddenin cinsine ya da transistörlerde gate voltaj'ın pozitif ya da negatif olmasına göre belirlenir (Singh, 2007a). Hem n tipi hem de p tipi özellik gösterebilen transistör yapılarına ambipolar çevirici (inverter) adı verilir ve organik elektronik uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır (Singh et. al., 2006)

Aşağıda, Şekil 3.36'da ambipolar özellik gösteren organik transistörün transfer karakteristiği incelenmiştir.



Şekil 3.36. Ambipolar N,N'-bis (dehidroabiyetil)-3,4,9,10-perilen diimid yarı iletken materyal tabanlı OFET'in transfer karakteristiği

N,N'-bis (dehidroabiyetil)-3,4,9,10-perilen diimid organik yarı iletkeninde bulunan ambipolar özelliği transfer karakteristiğinde daha net görülmektedir. Uygulanan farklı kapı (gate) voltajının, savak (drain)-kaynak (source) akımına göre değişimlerinde görüldüğü gibi hem delik enjeksiyonu hem de elektron enjeksiyonu meydana gelmektedir.

Transfer karakteristiğinden hesaplanan mobilite değerleri; ambipolar malzeme delik (hole) mobilitesi; $\mu_h = 6.10^{-5} \text{ cm}^2 / \text{V.s}$ ve elektron mobilitesi; $\mu_e = 7.10^{-5} \text{ cm}^2 / \text{V.s}$ olarak hesaplanmıştır.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Organik alan etkili transistör teknolojisinde, PCBM ve C_{60} gibi n tipi yarı iletken özeliğine sahip organik materyaller havaya hassas bir yapıya sahip olmalarına rağmen yüksek mobilite değerlerine sahip olmaları ve organik yarı iletken malzemelerle uyumlu bir yapıda olmalarından dolayı tercih edilmektedirler. Ayrıca, döndürerek kaplama (spin coating) ve vakum buharlaştırma tekniği gibi düşük maliyetli üretim teknikleri kullanılarak oluşturulan organik transistörler, inorganik alan etkili transistörlere göre üstünlük gösterir.

Yapılan ilk çalışmalarda, farklı üretim teknikleri kullanılarak oluşturulan n-tipi organik alan etkili transistörlerin üretimleri ve elde edilen alan etkili transistörlerin performans ve karakteristikleri özellikleri incelenmiştir. Bu incelemelerde elektron ilgisi yüksek ve yüzeyde iyi bir film yüzeyi oluşturan, literatürde n tipi yarı iletken materyal olarak bilinen PCBM ve C_{60} organik yarı iletken materyalleri kullanılmıştır. Yalıtkan materyaller olarak, fulleren türevleri ile uyumlu yüksek yük saklama kapasitesine sahip BCB ve PVA organik yalıtkan materyalleri tercih edilmiştir.

Yapılan ilk alan etkili transistör denemesinde, döndürerek kaplama yöntemi ile elde edilen, düşük dielektrik katsayısına sahip ($\epsilon_{BCB}=2.6$) ve sıcaklık termal genleştirme katsayısına bağlı termal kararlılığa sahip mükemmel bir yalıtkan materyal özelliği gösteren BCB (diviniltetrametildisiloksan bis(benzosiklobuten) yalıtkan maddesi kullanılmıştır. Yalıtkan ince film tabakanın kalınlığı 2 μm dir. N tipi organik yarı iletken materyal olarak, termal vakum buharlaştırma tekniği

kullanılarak, elektron ilgisi yüksek ve küçük molekül özelliğine sahip C_{60} fulleren bileşiği tercih edilmiştir. Elde edilen ince film kalınlığı yaklaşık 100 nm olarak belirlenmiş ve AFM cihazı yardımıyla ince film yüzeyi incelenmiştir. Oluşturulan organik yarı iletken film yüzeyinin üstüne özel maske yardımıyla LiF (0.6 nm) ve Al (80 nm) iletken metalleri buharlaştırılarak savak (drain) ve kaynak (source) elektrotları elde edilmiştir. Meydana getirilen n-tipi organik alan etkili transistörün performans ve karakteristikleri incelenmiş ve Çizelge 4.1.'deki değerler elde edilmiştir.

Çizelge 4.1. Fulleren (C_{60}) tabanlı OFET'in performans parametreleri

Örnek	Mobilite (cm^2/Vs)	Geçiş iletkenliği (transconductance)(μS)	Alt eşik değer eğrisi (subthreshold slope) (V/decade)
P015	0.5	1.02	8.4

Elde edilen bu veriler literatürle karşılaştırıldığında, 2003 yılında S. Kobayashi ve arkadaşları tarafından oluşturulan C_{60} tabanlı OFET'lerde 0.5 civarlarında elektron mobilite değeri elde edilmiştir. Ayrıca 2007 yılında Dr. Brendra Singh ve N. S. Sarıçifci tarafından yayınlanan diğer bir C_{60} tabanlı organik alan etkili transistör çalışmasında, oda şartlarında (25°C) $0.6\text{-}1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ arasında mobilite değeri bulunmuştur. Hatta bu mobilite değerleri 250°C sıcaklığa çıkıldığında $6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ civarlarına kadar yükselmektedir (Singh et al., 2007b). Alt eşik değer eğrisi incelendiğinde, kullanılan yalıtkan madde ile yarı iletken madde arasındaki elektron tuzakları ve yalıtkan madde kalın seçildiğinde (1-2

μm) alt eşik değeri eğrisi 8-9 V/ decade arasında olduğu bildirilmiştir (Singh et al., 2005b).

Yapılan ikinci organik alan etkili transistör denemesinde hem yalıtkan materyal tabakanın oluşturulmasında hem de organik yarı iletken ince film tabaka oluşumunda basit bir yöntem olan döndürerek kaplama (spin coating) tekniği tercih edilmiştir. Yalıtkan materyal tabaka olarak, PVA (Polivinil alkol) olarak bilinen suda çok iyi çözülebilme yeteneğine sahip, aynı zamanda dielektrik katsayısı çok yüksek ($\epsilon_{\text{PVA}}=8$) bir polimer kullanılmıştır (Singh et al., 2005a). Organik yarı iletken materyal olarak n tipi yarı iletken özellik gösteren ve yapısındaki zincirden dolayı çözücü içerisinde çözülebilme özelliğine sahip olan PCBM (fenil C_{61} -butirik asit metil ester) organik materyali seçilmiştir (Singh et al., 2005a). Oluşturulan organik yarı iletken film yüzeyinin üstüne özel maske yardımıyla Cr (50 nm) iletken metalleri buharlaştırılarak savak (drain) ve kaynak (source) elektrotları elde edilerek alan etkili transistör meydana getirilmiştir. Daha sonra aynı PCBM kaplı ince film tabakanın üzerine özel maske yardımıyla LiF(0.6 nm)/Al (50 nm) kaplanarak savak (drain)-kaynak (source) elektrotları farklı bir başka transistör oluşturulmuştur. Oluşturulan PCBM tabanlı organik alan etkili transistörlerin, performans ve karakteristikleri incelenmiş ve Çizelge 4.2 deki değerler elde edilmiştir.

Çizelge 4.2. PCBM tabanlı farklı elektrotlara sahip OFET’lerin performans parametreleri

Örnek	Mobilite (cm²/Vs)	Geçiş iletkenliği (transconductance)(μS)	Alt eşik değer eğrisi (subthreshold slope) (V/decade)
P012	0.09	0.24	7.4
P012	0.10	0.32	10.6

Elde edilen bu veriler literatürle karşılaştırıldığında, 2005 yılında Th. Brendra Singh ve arkadaşları tarafından çözülebilir bir n tipi yarı iletken materyal olan PCBM tabanlı alan etkili transistör çalışmalarında 10^{-3} ile $0.2 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ mobilite değerleri gösterilmiştir. Bu tip yöntemlerle tasarlanan alan etkili transistörlerin alt eşik değer eğrisi (subthreshold slope) değeri yalıtkan tabakanın kalın olması nedeniyle 1 ile 10 V/decade olarak literatürde bulunmaktadır (Klauk et al., 2002). Bu çalışmada tasarlanan PCBM tabanlı alan etkili transistörlerin literatüre uygun olduğu saplanmıştır (Singh et al., 2005a).

Ayrıca Çizelge 4.2. de gösterildiği gibi krom materyali olan drain-source elektrotlarını LiF/Al ile değiştirildiğinde mobilite değerinde artma gözlemlenmiştir. Bu iki mobilite değeri arasındaki fark, yüksek iş fonksiyon (work function) metal elektrot etkisi olarak açıklanır. Eğer yüksek iş fonksiyon (work function) değerine sahip ($\text{Cr} \approx 4.5 \text{ eV}$) bir elektrot kullanılırsa, mobilite değeri, yüksek kontak direnç (contact resistance effect) etkisi nedeniyle biraz düşmektedir (Singh et al., 2005b)

Yapılan son transistör denemeleri, enstitümüz tarafından sentenzlenen naftalen ve perilen diimid türevleri kullanılarak elde edilmiştir. Naftalen diimid türevi olan havada kararlı ve yüksek elektron ilgisine sahip N,N'-bis-butyl-1,4,5,8-naftalen diimid-NDI yarı iletken materyal tabanlı organik alan etkili transistör denemesinde yüksek elektron mobilite değeri ($\mu_e \approx 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{Vs}$) elde edilmiştir. Katz ve arkadaşları tarafından çözelti tekniği kullanılarak $0.1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ mobilite değeri elde edilmiştir (Singh et al., 2006c). Ayrıca N,N'-bis (dehidroabiyetil)-3,4,9,10-perilen diimid organik yarı iletken tabanlı ofetlerde, PVA yalıtkan materyali kullanılarak hem elektron mobilitesi ($\mu_e = 6.10^{-5} \text{ cm}^2 / \text{V.s}$) hem de delik (hole) mobilitesi ($\mu_h = 7.10^{-5} \text{ cm}^2 / \text{V.s}$) elde edilerek ambipolar özellik gösterdiği tespit edilmiştir. Perilen diimiid türevinin yan zincirinde bulunan ikinci aromatik halka nedeniyle ambipolar davranış gösterdiği açıklanmıştır (Singh et al., 2006c).

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, üzerinde çalışılan yüksek mobilite değerlerine sahip n tipi organik yarı iletken materyaller organik alan etkili transistörler için idealdir. Yapılan çalışmalarda ortam sıcaklıklarının arttırılmasıyla ve daha etkin üretim tekniklerinin kullanılması ile verimlerde ve elektriksel parametrelerde artış sağlanabileceği açıktır.

KAYNAKLAR

Kahng D. and Atalla M. M., 1960, IRE Solid-State Devices Research Conference, Pittsburgh, PA

Heeger J., Kivelson S., Schrieffer J.R., Su W. P., 1988, Solution in conducting Polimers, Rev Mod. Phys. 60, 781-850

Koezuka H., Tsumura A., Ando T., Synth. Met., February 1987, Field-effect transistor with polythiophene thin film, Proceedings of the International Conference of Science and Technology of Synthetic Metals 18, 699

Dimitrakopolous C.D. and Malenfant P.R.L., 2002, N-type organic thin-film transistor with high field-effect mobility based on a N,N 8 -dialkyl-3,4,9,10-perylene tetracarboxylic diimide derivative, Adv. Mater, 14, 99)

Horowitz G., 2004, Organic thin film transistors: From theory to real devices, J. Mater. Res. 19,1946

Sun Y., Lin Y., Zhu D., 2005, Advances in organic field-effect transistors, J. Mater. Chem, 15, 53-65

Tsumura, Koezuka H., Ando T., 1986, Field effect transistor patent, patent number 5,107,308

KAYNAKLAR (devam)

Facchetti, Yoon M. H., Marks T. J., 2005, Gate Dielectrics for Organic Field Effect Transistors: New Opportunities for Organic Electronics, *Adv. Mater*, volume 17, 1705-1725

Kawase T., Shimoda T., Newsome C., Sirringhaus H., Friend R. H., 2003, *Thin Solid Films*, 438, 279

Sze S. M., 2001, *Semiconductor Devices*, Physics and Technology, 2, 169-220

Singh Th. B., Saricifci N. S., Jaiswal M., Menon R., 2008, Handbook of Organic Electronics and Photonics, Volume.3, Pages (153-176),

Singh Th. B., 2007, 346005 Organic transistors lecture , Linz Institute for organic solar cell, johannes Kepler Uninersity

Stadler P., 2006, Hysteresis in Bio-Organic Field-Effect Transistors, *Diploma Thesis at Linz Institute of Organic Solar Cells*

Singh Th. B. and Sariciftci N. S., 2006, Progress in Plastic Electronics Device, *Annu. Rev. Mater. Res.* 2006, 36, 199-230

KAYNAKLAR (devam)

- Singh Th. B., Marjanovic N., Stadler P., Auinger M., Matt G. J., Günes S., Sariciftci N. S., Schwödiauer R., Bauer S., 2005,** Fabrication and characterization of solution-processed methanofullerene-based organic transistors, *J. Appl Phys.*, 97, 083 714
- Peng X., Horowitz G., Fichou D., Garnier F., 1990,** Organic-based field-effect transistors: Critical analysis of the semiconducting characteristics of organic materials, *Appl. Phys. Lett.*, 57, 2013
- Klauk H., Halik M., Zschieschang U., Schmid G., Radlik W., Weber W., 2002,** High-mobility polymer gate dielectric pentasen thin film transistors, *J. Appl. Phys.*, 92, 5259
- Veres J., Ogier S. D., Leeming S. W., Cupertino D. C., Khaffaf S. M., 2003,** Low-k Insulators as the Choice of Dielectrics in Organic Field-Effect Transistors, *Adv. Funct. Mater.*, 13, 199
- Chua L. L., Zaumseil J., Chang J. F., Ou E. C. W., Ho H., Sirringhaus H., Friend R. H., 2005,** General observation of n-type field-effect behaviour in organic semiconductors, *Nature* 434, 194-199
- De Leeuw D. M., Simenon J. M. M., Brown A. R., Einerhand R. E. F., 1997,** Stability of n-type doped conducting polymers and consequences for polymeric microelectronic devices, *Synth. Met.*, 87, 53

KAYNAKLAR (devam)

- Paloheimo J., Stubb H., Lahti P. Y., Kuivalainen P.**, 1991, "Field-Effect Conduction in Polyalkylthiophenes," *Synth. Met.* 41-43, 563
- Sirringhaus H., Tessler N., Friend R. H.**, 1998, Integrated Optoelectronic Devices Based on Conjugated Polymers *Science*, 280, 5370, 1741
- Park J., Park S. Y., Shim S., Kang H., Lee H. H.**, 2004, A polymer gate dielectric for high-mobility polymer thin-film transistors and solvent effects, *Appl. Phys. Lett.* 85, 3283
- Heeney M.**, 2005, Stable Polythiophene Semiconductors Incorporating Thieno[2,3-b]thiophene, *J. Am. Chem. Soc.* 127, 1078.
- Street R. A. and Salleo A.**, 2002, Contact effects in polymer transistors, *Appl. Phys. Lett.* 81, 2887
- Salleo, Chabinyc M. L., Yang M. S., Street R. A.**, 2002, Polymer thin-film transistors with chemically modified dielectric interfaces, *Appl. Phys. Lett.* 81, 4383.
- Kelley T. W., Muyres D. V., Baude P. F., Smith T. P., Jones T. D.**, 2003, High Performance Organic Thin Film Transistors *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 771, L6.5.1

KAYNAKLAR (devam)

Eder F., Klauk H., Halik M., Zschieschag U., Schmid G., Dehm C., 2004, Organic electronics on paper, Appl. Phys. Lett. 84, 2673

Gelinck G. H., Van Veenendaal E., Coehoorn R., 2005, Dual-gate organic thin-film transistors, Appl. Phys. Lett. 87, 073508

Van de Craats M., Stutzmann N., Bunk O., Nielsen M. M., Watson M., Friend R. H., 2003, Meso-Epitaxial Solution-Growth of Self-Organizing Discotic Liquid-Crystalline Semiconductors, Adv. Mater. 15, 495.

Hotta S., and Waragai K., 1991, Alkyl-substituted oligothiophenes: crystallographic and spectroscopic studies of neutral and doped forms, J. Mater. Chem, 1, 835.

Horowitz G. and Hajlaoui M. E., 2000, Mobility in polycrystalline oligothiophene field-effect transistors dependent on grain size, Adv. Mater, 12, 1046-1050.

Halik M., Klauk H., Schmid G., Kirchmeyer S., Weber W., 2003, Relationship Between Molecular Structure and Electrical Performance of Oligothiophene Organic Thin Film Transistors, Adv. Mater. 15, 917.

Bao Z., Lovinger A. J., Dodabalapur A., 1996, Soluble and processable regioregular poly(3-hexylthiophene) for thin film field-effect transistor applications with high mobility, Appl. Phys. Lett. 69, 4108.

KAYNAKLAR (devam)

Zang J., Wang J., Wang H., Yan D., 2004, Organic thin-film transistors in sandwich configuration Appl. Phys. Lett. 84, 142.

Lin Y. Y., Gundlach Y. Y., Nelson S. F., Jackson T. N., 1997, Stacked pentasen layer organic thin-film transistors with improved characteristics, IEEE, Electron, Devices, Lett. 18, 606

Kelly T. W., Boardman T. W., Dunbar T. D., Muyres D. V., Smith T. P., 2003, High-Performance OTFTs Using Surface-Modified Alumina Dielectrics, J. Phys. Chem, 107, 5877

Frank P., 2007, Fourier Transform Infrared Spectroscopy of Organic Dielectric / Organic Semiconductor Interface, Diploma Thesis at Linz Institute of Organic Solar Cells

Kastner J., Paloheimo J., Kuzmany H., 2002, ‘Electron Properties of high- T_c superconductors, springer series in solid state sciences, springer, New York.

Haddon R. C., Perel A. S., Morris R. C., Palstra T. T. M., Hebard A. F., 1995, C₆₀ thin film transistors, Appl. Phys. Lett, 67, 121.

Kobayashi S., Takenobu T., Mori S., Fujiwara S., Iwasa Y., 2003, Fabrication and characterization of C₆₀ thin-film transistors with high field effect mobility, Appl. Lett. 82, 4581.

KAYNAKLAR (devam)

Singh B., Senkarabacak P., Sariciftci N. S., Tanda A., Lackner C., Hagelauer R., Horowitz G., 2006, Organic inverter circuits employing ambipolar pentasen field-effect transistors, Appl. Phys. Lett. 89, 033512-1.

Roberts G., 1990, Langmuir-Blodgett Films, Plenum Press, New York

Singh Th. B., Marjanovic N., Matt G.J., Sariciftci N.S., Schwodiauer R., Bauer S., 2004, Nonvolatile organic field-effect transistor memory element with a polymeric gate electrot, Appl. Phys. Lett., 85,No:22, 5409.

Matt G.J., Singh Th. B., Sariciftci N. S., Montaigne Ramil A., Sitter H., 2006, Switching in C60-fullerene based field effect transistors, Appl. Phys. Lett. 88, 263516.

Singh Th., Marjanovic N., Matt G., Guenes S., Sariciftci N.S., Montaigne A., Andreev A., Sitter H., Schwoediauer R., Bauer S., 2005, High-mobility n-channel organic field-effect transistors based on epitaxially grown C60 films, Organic Electronics, 6, 105-110.

Singh Th. B., Yang H., Plochberger B., Sitter H., Neugebauer H., Sariciftci N.S., 2007, Characterization of highly crystalline C60 thin films and their field-effect mobility, Phys. Stat. Sol. 244,No.11, 3845-3848

KAYNAKLAR (devam)

Singh B., Sariciftci N.S., Yang H., Yang L., Plochberger B., Sitter H., 2007, Correlation of crystalline and structural properties of C60 thin films grown at various temperature with charge carrier mobility, Applied Physics Letters 90, 213512

Singh Th.B., Erten S., Gunes S., Zafer C., Turkmen G., Kuban B., Teoman Y., Sariciftci N.S., İcli S., 2006, Soluable derivatives of perylene and napthalene dimide for n-channel organic field-effect transistors, Organic Electronics, 7, 480-489

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mustafa Emre AKIN

Akademik Ünvanı : Yüksek Lisans

Doğum Tarihi/yeri : 03.03.1982/Aydın

Uyruğu : T.C.

Adres : E.Ü. Güneş Enerjisi Enstitüsü
35100 Bornova- İZMİR / TÜRKİYE

Telefon Numarası : 0(232) 388 60 28

Fax : 0(232) 388 60 27

E-mail : memre_akin@yahoo.com,
memre_akin@hotmail.com

AKADEMİK GEÇMİŞİ :

Yüksek Lisans, Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, Enerji Bölümü (2006-2008)

Socrates Erasmus programı çerçevesinde Avusturya Johannes Kepler Üniversitesi Linz Institute for Organic Solar Cells Institute Of Physical Chemistry (24.09.2007-24.12.2007)

Lisans, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü (2001-2005)

TEZ KONUSU:

Yüksek Lisans, N-tipi yarı iletken malzemelere dayalı organik alan etkili transistörlerin üretimleri, performans ve karakteristiklerinin incelenmesi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008, Danışman: Yrd. Doç. Dr. Şule ERTEN ELA.

Lisans, PIC 16F84A Mikrodenetleyici kontrolü ile PWM inverter tasarımı, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 2005, Danışman: Yrd. Dr. Selim Börekçi.

AKADEMİK PROJELER:

1- Yrd. Doç. Dr. Şule ERTEN ELA, “ **Organik Güneş Pillerinin Üretimi Performans Ve Karakteristiklerinin İncelenmesi** ”, 2006-2008, 24 Ay, 06-GEE-009, E.Ü.BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJESİ (devam etmekte), **Araştırmacı: M. Emre AKIN.**

2- Yrd. Doç. Dr. Şule ERTEN ELA, “**Organik Fotoelektronik yeni bir sistemin üretimi: Alan etkili organik transistörler (OFET ve Photofet)**”, 2006-2009, 36 Ay, TUBITAK, TBAG_106T061, TÜBİTAK PROJESİ (devam etmekte), **Araştırmacı: M.Emre AKIN.**

ULUSAL SEMPOZYUM VE KONGRELER:

1- **Akın, M.E.**, Erten, Ş., Eren, E., Can, M., İçli, S., “The fabrication of dye sensitized solar cells and investigation of their performance”, Nano TR3 Nanoscience and Nanotechnology Konferans, 11-14 Haziran 2007, Bilkent Üniversitesi, Ankara-Türkiye, Sözlü Sunum.

2- **Akın, M.E.**, Stadler, P., Ela, Ş.E., Sarıciği, N.S., İçli, S., “N-Channel Organic Field Effect Transistors”, Nano TR4 Nanoscience and Nanotechnology Konferans, 9-13 Haziran 2008, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul-Türkiye, Poster.

Yabancı Dil: İngilizce.

İlgi Alanları: Otonom Fotovoltaik Güç Sistemleri, Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Güç Sistemleri, Fotovoltaik Güneş Pilleri, Organik Alan Etkili Transistörler.