



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**KAYNAK GEOMETRİSİNİN TRANSİSTOR
PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ**

Bilal İSTANBULLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nanoteknoloji ve İleri Malzemeler Anabilim Dalı

Temmuz-2017
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Bilal İSTANBULLU tarafından hazırlanan “Kaynak Geometrisinin Transistor Performansı Üzerindeki Etkisi” adlı tez çalışması 03/07/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nanoteknoloji ve İleri Malzemeler Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Yrd. Doç. Dr. Yasin Ramazan EKER

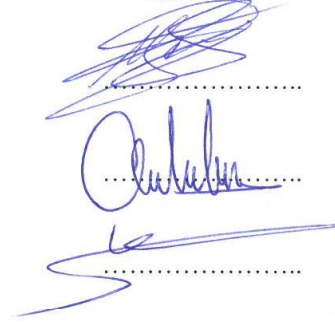
Danışman

Prof. Dr. Mahmut KUŞ

Üye

Doç. Dr. Mustafa KARAMAN

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa YILMAZ
FBE Müdürü

Bu tez çalışması Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından 16201050 nolu proje, TÜBİTAK 2210-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurtiçi Yüksek Lisans Burs Programı 1649B021502481 nolu destek kapsamında desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.


İmza
Bilal İSTANBULLU

Tarih: 03.07.2017

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KAYNAK GEOMETRİSİNİN TRANSİSTÖR PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Bilal İSTANBULLU

**Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Nanoteknoloji ve İleri Malzemeler Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Mahmut KUŞ

2017, 53 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mahmut KUŞ

Doç. Dr. Mustafa KARAMAN

Yrd. Doç. Dr. Yasin Ramazan EKER

Bu yüksek lisans tezinde, organik alan etkili transistör performansa etkisinin araştırılması amacıyla, fotolitografi yöntemi aracılığıyla farklı geometrilere sahip organik alan etkili transistörler üretilmiştir. Silikon altlık üzerine fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile kaplanan altın, maskesiz fotolitografi yöntemi kullanılarak desenlenmiştir. Organik alan etkili transistörler için düzlemsel ve iç içe geçmiş kaynak-akaç elektrotları desenlenmiş daha sonra 2,7-Dioctyl [1] benzothieno [3,2-b] [1] benzothiophene (C8-BTBT) yarı iletken malzeme kaplanarak organik alan etkili transistör üretimi tamamlanmıştır. Elektriksel karakterizasyonları yapılan organik alan etkili transistörlerin performansları birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Aynı zamanda temel geometrileri aynı fakat kanal uzunluk ve genişlikleri farklı organik alan etkili transistörler de üretilerek elektriksel karakterizasyonları yapıldıktan sonra, kanal geometrisindeki değişimin transistör performansını nasıl etkilediği araştırılmıştır. İç içe geçmiş geometriye sahip OFET'lerin genel olarak düzlemsel geometriye sahip OFET'lere göre daha performanslı çalıştığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fotolitografi, İnce Film Transistor, Mobilite, Organik Yarıiletkenler, Organik Alan etkili Transistörler.

ABSTRACT

MS THESIS

EFFECT OF SOURCE GEOMETRY ON TRANSISTOR PERFORMANCE

Bilal İSTANBULLU

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
SELÇUK UNIVERSITY**

**THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE OF PHILOSOPHY
IN NANOTECHNOLOGY AND ADVANCED MATERIALS**

Advisor: Prof. Dr. Mahmut KUŞ

2017, 53 Pages

Jury

Prof. Dr. Mahmut KUŞ

Assoc. Prof. Mustafa KARAMAN

Asst. Prof. Dr. Yasin Ramazan EKER

In this master thesis work, organic field effect transistors with different geometries were fabricated by using maskless photolithography method, in order to investigate effect of transistor geometry on transistor performance. Thermally evaporated gold on silicon wafers was patterned by using maskless photolithography method. Two different geometries were patterned for organic field effect transistors which are linear and interdigitated and finally 2,7-Dioctyl [1] benzothieno [3,2-b] [1] benzothiophene (C8-BTBT) semiconductor was spin coated. Electrical characterizations of organic thin film transistors were carried out and their performances were compared to each other.

At the same time, organic field effect transistors with same general geometry but different channel length and width were fabricated and effect of different channel dimensions on transistor performance was investigated. It was observed that OFETs with interdigitated geometry work better than OFETs with linear geometry.

Keywords: Mobility, Organic Semiconductors, Organic Field Effect Transistors, Photolithography, Thin Film Transistor.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim ve çalışmalarım boyunca benden desteğini esirgemeyen değerli danışmanım Prof. Dr. Mahmut KUŞ'a,

Tez çalışmam boyunca hem bilimsel desteklerinden hem de keyifli vakit geçirmemi sağladıklarından dolayı değerli Selçuk Üniversitesi İLTEK çalışma arkadaşlarım Çisem KIRBIYIK, Koray KARA, Duygu AKIN KARA, Abdalaziz ALJABOUR, Hüseyin ŞAKALAK, Burak BÜYÜKBEKAR ve Sümeyra BÜYÜKÇELEBİ'ye, ayrıca takıldığım noktalarda bilgilerini paylaştığı için Linz Institute For Organic Solar Cells üyesi Halime ÇOŞKUN'a,

Bilgi, tecrübe ve imkânlarını bana sunduğu için Doç. Dr. Cem TOZLU'ya,

Litografi sistemini öğrenmeye çalıştığım sırada yardımcı olup, öğrenme sürecimi oldukça kısaltmama olanak sağlayan Advanced Micro Patterning Genel Müdürü Jay SASSERATH'a,

Çalışmalarım sırasında önemli noktalarda tecrübesini, bilgisini ve imkânlarını benimle paylaştığı için French National Centre for Scientific Research öğretim üyesi Mamatimin ABBAS'a,

Tüm hayatım ve eğitimim boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen değerli ailem Yasin İSTANBULLU, Kamile İSTANBULLU, Büşra İSTANBULLU KARA, Merve İSTANBULLU, Zeynep İSTANBULLU ve Süleyman KARA'ya,

Bilal İSTANBULLU
KONYA-2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Organik Alan Etkili Transistörler	1
1.1.1. Organik Alan Etkili Transistörlerin Yapısı	2
1.1.2. Organik Alan Etkili Transistörlerin Çalışma Prensibi	3
1.2. Litografi	8
1.2.1. Fotolitografi	9
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	16
3. MATERYAL VE YÖNTEM	21
3.1. OFET Üretiminde Kullanılan Kimyasal Maddeler	21
3.2. OFET’lerin Karakterizasyonunda Kullanılan Cihaz ve Teknikler	21
3.2.1. Akım-Voltaj Karakterizasyonu	21
3.2.2. Desenlenmiş Elektrotların Yüzey Karakterizasyonu	22
3.3. Deneysel Çalışmalar	23
3.3.1. Maskesiz Fotolitografi Cihazının Kalibre Edilmesi	23
3.3.2. OFET Üretimi	29
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	31
4.1. İki Farklı Temel Geometriye Sahip OFET Performanslarının Karşılaştırılması	31
4.2. Temel Geometrileri Aynı Kanal Geometrileri Farklı OFET’lerin Performanslarının Karşılaştırılması.....	35
4.2.1. Düzlemsel Geometriye Sahip OFET’lerin Performanslarının Karşılaştırılması.....	35
4.2.2. İç İç Geçmiş Geometriye Sahip OFET’lerin Performanslarının Karşılaştırılması.....	41
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	47
5.1 Sonuçlar	47
5.2 Öneriler	47
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ	51

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

V	: Volt
V _{DS}	: Kaynak-Akaç gerilimi
V _G	: Kapı gerilimi
V _{TH}	: Eşik değer gerilimi
I _G	: Kaçak akım
A	: Amper
W	: Kanal genişliği
L	: Kanal uzunluğu
mg	: Miligram
mL	: Mililitre
μ	: Mobilite
μm	: Mikrometre
nm	: Nanometre
R _s	: Kanal direnci

Kısaltmalar

OFET	: Organik alan etkili transistör
FET	: Alan etkili transistör
OTFT	: Organik ince film transistör
TFT	: İnce film transistör
AMOLED	: Aktif matris organik ışık yayan diyot
AM-LCD	: Aktif matris sıvı kristal ekran
a-Si:H	: Amorf silikon
PMMA	: Polimetilmetakrilat
Au	: Altın
Al	: Alüminyum
Ag	: Gümüş
ITO	: İndiyum kalay oksit
HOMO	: En yüksek dolu moleküler orbital
LUMO	: En düşük boş moleküler orbital

SiO₂ : Silikon dioksit
KOH :Potasyum hidroksit
AFM : Atomik kuvvet mikroskobu



1. GİRİŞ

Teknoloji, hayatımızı birçok alanda kolaylaştırmış ve hayatımızın vazgeçilmez unsurlarından biri haline gelmiştir. Günümüzün yüksek teknoloji cihazları, yıllar süren araştırmaların sonucu olarak bugüne taşınmış ve sürekli geliştirilmektedirler. Kullandığımız LCD ekranlar, cep telefonları, bilgisayarlar gibi birçok teknolojik ürünün ardında yarı iletken teknolojileri yatmaktadır. Dolayısıyla bu teknolojilerin geliştirilmesi adına yapılan araştırma ve geliştirme çalışmalarının büyük bir kısmı yarı iletken araştırmalarından oluşmaktadır.

Bir yarı iletken teknolojisi olan transistör, kullanılan yüksek teknoloji ürünlerin yapı taşı haline gelmiştir. Geniş bir LCD televizyon, bir bilgisayar ya da telefon ekranındaki görüntü, ekran üzerindeki bazı piksellerin açılması ya da kapanması sonucu oluşturulur. Piksellerin açılması ya da kapanması olayı anahtar görevi gören transistörler tarafından gerçekleştirilir. Piksellere atanan transistörlere akım uygulanarak transistörlerin açık ya da kapalı duruma geçmesi sağlanır ve böylece pikseller aktif ya da pasif duruma geçirilir.

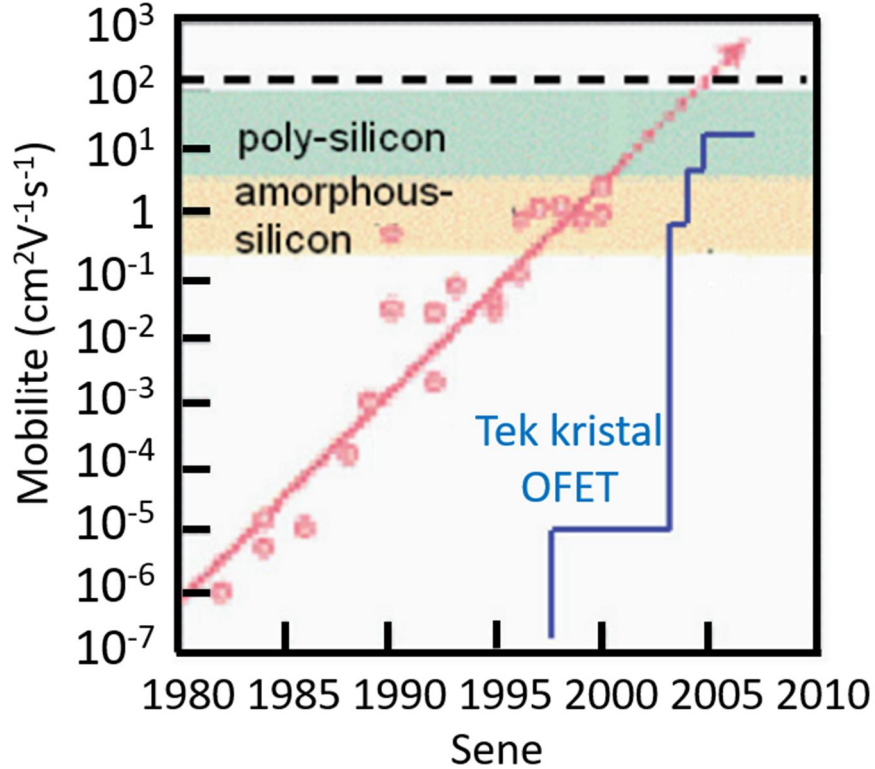
Teknolojik cihazlar içerisinde transistörlerin önemli rol oynadığı bir diğer alan ise işlemcilerdir. Bizim adımıza birçok işlemi gerçekleştiren bilgisayar, telefon vb. cihazların işlemcileri içinde milyonlarca transistör bulunmaktadır. 1 ve 0'lar şeklinde tanımladığımız işlemci verileri, transistörlerin açık (1) ve kapalı olması (0) şeklinde oluşturulur.

Günümüz teknolojileri için bu denli önem arz eden transistörlerin ilk örnekleri geçen yüzyılın ortalarında ortaya atılmış olması göz önüne alındığında, şu an 1 cm^2 'lik küçük bir çip içerisinde milyarlarca transistör bulunuyor olması oldukça şaşırtıcıdır (Riordan ve ark., 1999). Aynı zamanda üzerine yapılan çalışmaların ne denli hızla ilerlediğini de gözler önüne sermektedir.

1.1. Organik Alan Etkili Transistörler

1930'da ilk alan etkili transistörün (FET) üretilmesinin (Lilienfeld, 1930) ardından geçen zaman içerisinde yapılan çalışmalar ve gelişen teknoloji ile birlikte birçok alan etkili transistör modellemesi yapılmıştır. Hem alan etkili transistörün geometrisinin hem de kullanılan maddelerin değiştirilmesi ile günümüzde milyonlarca çeşit alan etkili transistör bulunmaktadır. Bu alan etkili transistörlerin yarıiletken tabakasında organik

yarıiletkenlerin kullanılması ile organik yarıiletken transistörler (OFET) ortaya çıkmıştır. Bir OFET, FET’lerde olduğu gibi kaynak (source) ile akış (drain) arasında bulunan yarıiletken üzerinden geçen akımın kapı (gate) elektrotuna uygulanan gerilimle kontrol edildiği bir aygıttır. Yarıiletken tabakada organik moleküllerin kullanılmasından bu yana birçok OFET geliştirilmesine rağmen henüz inorganik FET performanslarına ulaşılabilmiş değildir (Gök, 2015).



Şekil 1.1. Alan etkili transistörlerin mobilite değerlerinin yıllara göre gelişimi (Hasegawa ve Takeya, 2009).

Geçmişten günümüze silikon tabanlı alan etkili transistörler popülerliğini devam ettirse de yapılan çalışmalar sonucunda OFET’ler Şekil 1.1’de görüldüğü gibi silikon tabanlı FET’ler ile rekabet edecek seviyeye gelmiş durumdadırlar (Hasegawa ve Takeya, 2009).

1.1.1. Organik Alan Etkili Transistörlerin Yapısı

OFET’ler, kapı elektrotu üzerine kaplanan yalıtkan ve yarıiletken tabakalar ile bunların üzerine kaplanan kaynak ve akış elektrotlarından oluşmaktadır. Şekil 1.2’de

görüldüğü üzere temelde dört farklı OFET yapısı bulunmaktadır (Shekar ve ark., 2004). Bu yapıların sahip olduğu kapı elektrotu altın (Au), alüminyum (Al), gümüş (Ag), indiyum kalay oksit (ITO) vb. maddeler kullanılarak ince iletken bir tabaka halinde oluşturulur. Kaynak ve akaç elektrotlarının seçimi ise organik yarıiletken malzemenin türü, HOMO (en yüksek dolu moleküler orbital) ve LUMO (en düşük boş moleküler orbital) enerji seviyeleri gibi parametreler göz önüne alınarak yapılmaktadır. Kaynak ve akaç elektrotları organik yarıiletkenin HOMO ve LUMO enerji seviyesine uygun, dolayısıyla yarıiletkene enerji bariyeri oluşturmayacak maddelerden seçilmektedir (Kawase ve ark., 2003). Yalıtkan tabaka, yüksek dielektrik katsayısına sahip polimer veya inorganik maddelerden seçilir. OFET yapısına göre bir veya birden fazla yalıtkan kullanılabilir (Facchetti ve ark., 2005).

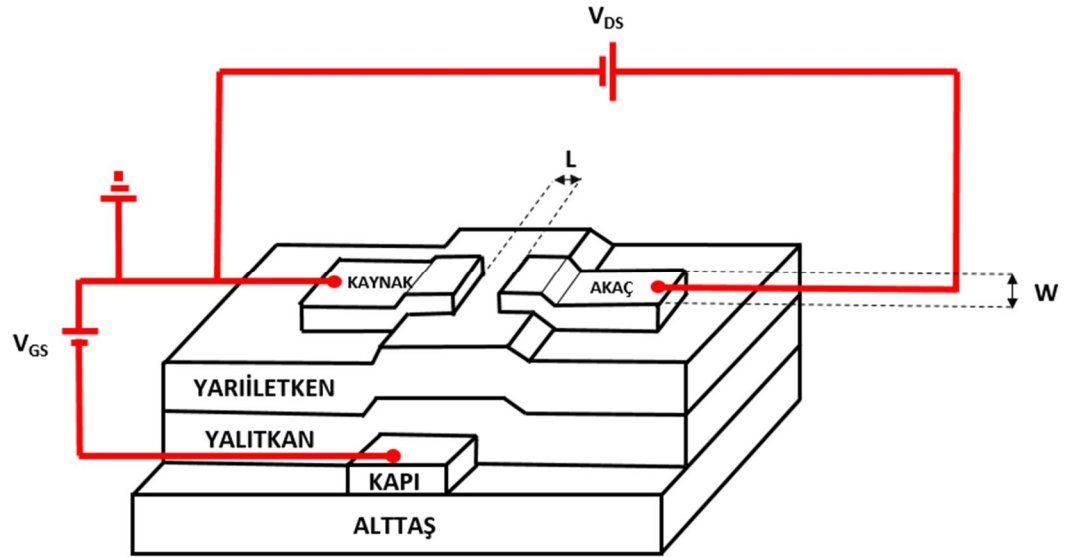


Şekil 1.2. İnce film alan etkili transistör yapıları.

Transistörlerde kapı, kaynak ve akaç elektrotları fotalitografi, maskeleme (shadow mask) ve baskılama (printing) yöntemleri ile oluşturulabilmektedir (Kara, 2012).

1.1.2. Organik Alan Etkili Transistörlerin Çalışma Prensibi

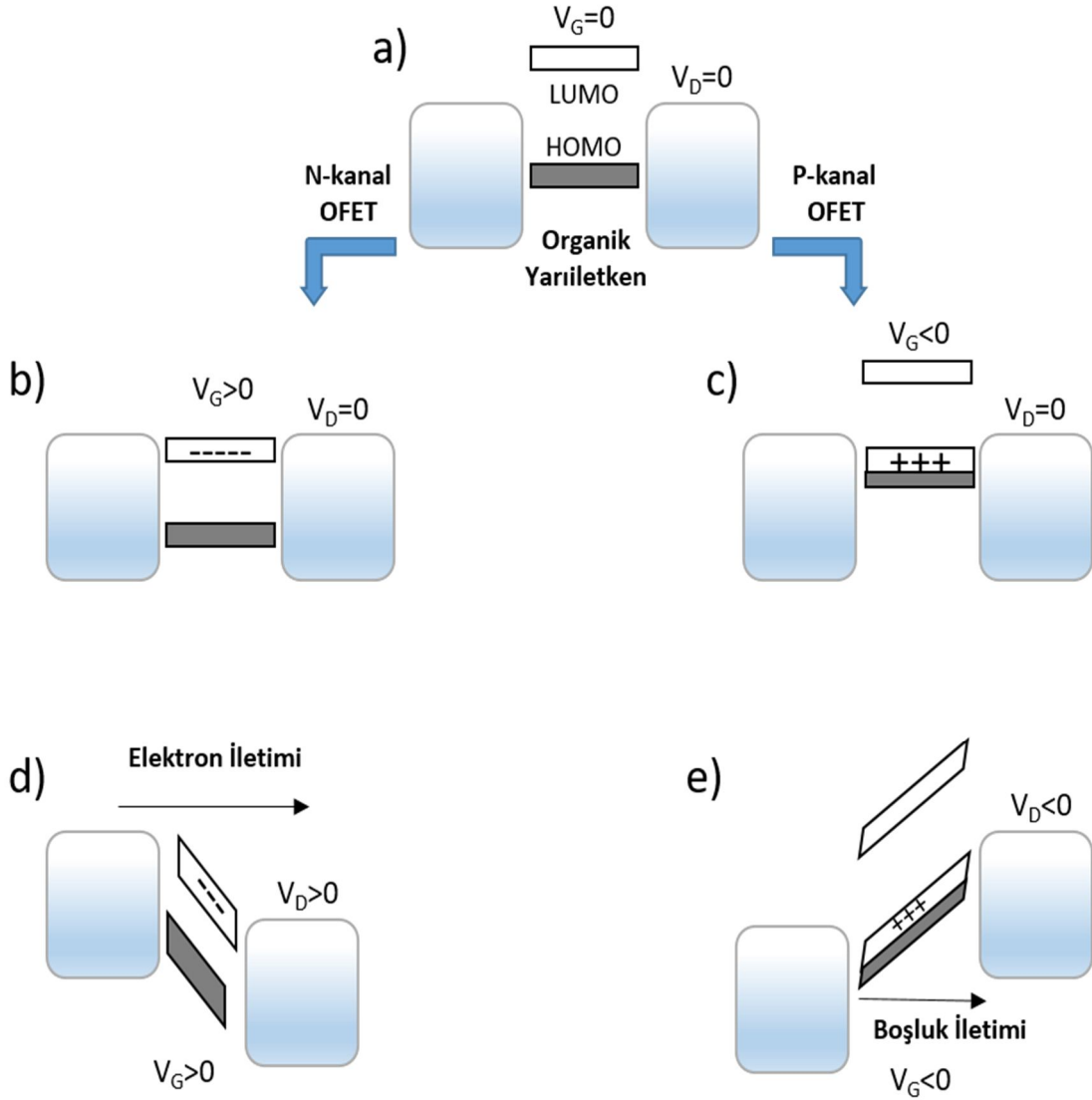
Şekil 1.3’de gösterildiği gibi akaç ve kaynak elektrotları arasında kalan alan kanal uzunluğu (L), elektrotların genişliği ise kanal genişliği (W) olarak adlandırılır. Bir OFET yığınının çalıştırılması amacıyla akaç-kaynak elektrotları ve kapı-kaynak elektrotları arasına gerilim uygulanmalıdır. Bu gerilimler akaç-kaynak gerilimi (V_{DS}) ve kapı-kaynak gerilimi (V_{GS}) olarak isimlendirilir. Uygulanan V_{DS} gerilimi sayesinde kaynak elektrotundan akaç elektrotuna doğru bir akım geçer ve bu akım V_{GS} gerilimi ile kontrol edilir. V_{GS} geriliminin büyüklüğüne bağlı olarak, uygulanan V_{DS} gerilimi ile kaynak ve akaç elektrotları arasından geçen akımın büyüklüğü değişir. Kapı elektrotuna sıfır gerilim uygulandığı takdirde kaynak ve akaç elektrotu arasından çok az bir akım geçer, bu akıma sızıntı akımı (leakage current) adı verilir. Sızıntı akımının değeri akaç voltajının (V_D) kanal direncine (R_S) oranından elde edilir (Singh ve Sariciftci, 2006).



Şekil 1.3. Organik alan etkili transistörlerin genel yapısı.

OFET üretiminde n-tipi (elektron iletim malzemesi) bir organik yarıiletken kullanılması durumunda kapı elektrotuna pozitif gerilim uygulanması gerekir. Kapı elektrotuna uygulanan pozitif gerilim, organik yarıiletken/yalıtkan ara yüzeyinde negatif yüklerin birikmesine sebep olmaktadır. P-tipi (boşluk iletim malzemesi) bir organik yarıiletken kullanılması durumunda ise kapı elektrotuna negatif gerilim uygulanması gerekir. Kapı geriliminin (V_G) negatif değerinin sonucu olarak yarıiletken/yalıtkan ara yüzeyinde pozitif yükler birikir. Uygulanan kapı geriliminin pozitif veya negatif olması sonucunda, ara yüzeyde yarıiletken ve yalıtkan malzemelerden oluşan seri bağlı bir kapasitör etkisi oluşmaktadır. Alan etkisi ile ara yüzey boyunca pozitif veya negatif

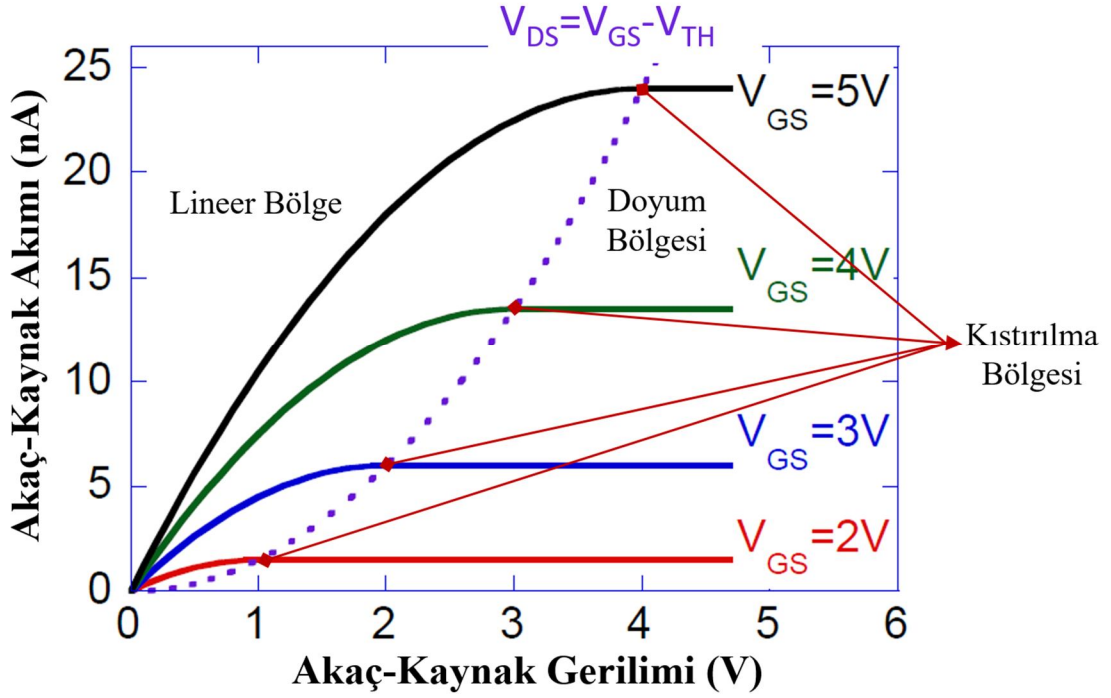
yüklenen taşıyıcılar, kaynak ve akçe elektrotları arasında iletkenliği arttırmaktadır (Tozlu, 2010).



Şekil 1.4. Enerji düzeyi diagramı ile OFET çalışma mantığı (Newman ve ark., 2004).

Kapı elektrotuna herhangi bir gerilim uygulanmazsa Şekil 1.4 (a)'da görüldüğü gibi organik yarıiletken üzerinde herhangi bir yük taşıyıcı gözlenmez. Eşik değer gerilimi (threshold, V_{TH}), yük taşıyıcıların organik yarıiletken ve yalıtkan ara yüzeyinde birikmesini sağlamak amacıyla gerek duyulan minimum gerilim değeridir (Tozlu, 2010). Şekil 1.5 akım-gerilim grafiğinde gösterilen lineer bölge, kapı ve eşik değer gerilimi arasındaki farkın akçe-kaynak geriliminden (V_{DS}) büyük olduğu bölgedir. Kanal içerisinde bulunan yükler kanal boyunca homojen bir şekilde dağılmıştır. Bu bölgede kanal sabit bir direnç değerine sahiptir. Dolayısıyla uygulanan akçe gerilimine karşılık kanaldan geçen akım grafiği lineer olarak artmaktadır. I_{DS} (akçe-kaynak akımı)

değerlerinin V_{DS} değerleri ile doğru orantılı olarak arttığı bu bölgeye OFET'in lineer bölgede çalışması denir. Bir OFET'de I_{DS} ile V_{DS} arasındaki ilişki Eşitlik 1.1'de verilmiştir (Sze, 1998).



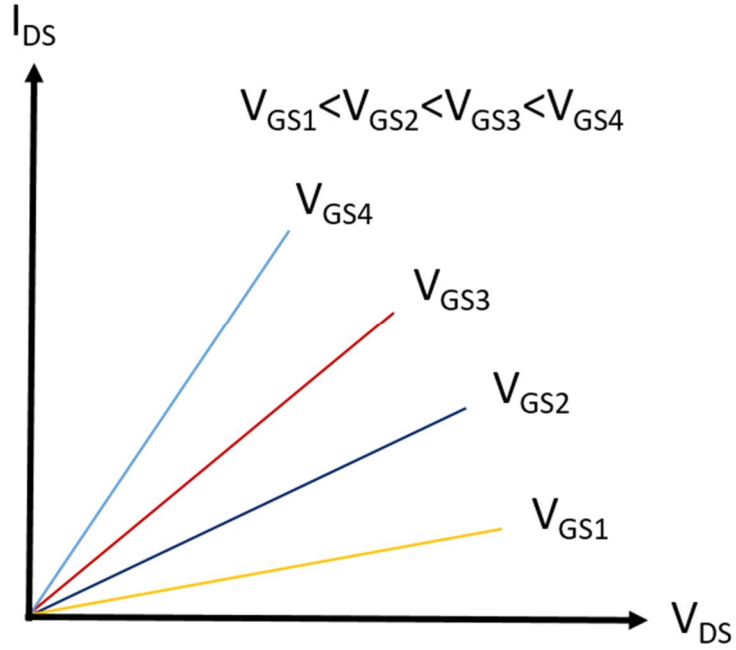
Şekil 1.5. N-kanal OFET'in farklı kapı gerilimlerinde gözlenen akım-gerilim grafiği.

$$I_{DS} = \mu \frac{W}{L} C_i \left[(V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right] \quad (1.1)$$

Eşitlik 1.1'de W kanal genişliğini, L kanal uzunluğunu, C_i yalıtkan tabakanın birim alandaki kapasitansını, μ yük hareketliliği ve V_{TH} ise eşik değer gerilimidir. V_{DS} değerinin oldukça küçük olduğu durumlarda kanal bölgesinden geçen akım Ohm yasasına uyar. Bu durumda Eşitlik 1.1, Eşitlik 1.2'de gösterildiği gibi türetilcektir.

$$I_{DS} = \mu \frac{W}{L} C_i (V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} \quad (1.2)$$

Eşitlik 1.2'den de görüleceği gibi lineer bölgede I_{DS} değeri V_{DS} değeri ile orantılıdır. Dolayısıyla farklı V_{GS} değerlerinde I_{DS} 'nin V_{DS} ile değişimi Şekil 1.6'da gösterildiği gibi olacaktır.



Şekil 1.6. V_{DS} gerilimine karşılık I_{DS} akımının değişimi.

Akaç ve kaynak elektrotları arasındaki gerilim, eşik değer gerilimi ve kapı elektrotu arasındaki farka eşit olduğunda akaç-kaynak gerilimi ile kanaldan geçen akım arasındaki lineer ilişki ortadan kalkar. Şekil 1.5'te gösterilen akım-gerilim grafiği üzerindeki bu bölgeye kısırılma bölgesi (pinch-off) adı verilir. Artan akaç-kaynak gerilimine karşılık akım lineer bölgedeki gibi artmamaktadır. OFET'in sahip olduğu kanal kısırılma bölgesinde homojenliğini kaybetmiştir, yani düzenli olmayan bir yük yoğunluğuna sahip olmuştur.

Akaç elektrotu ile kaynak arasında uygulanan gerilim, eşik değer gerilimi ve kapı gerilimi arasındaki farktan büyük olduğu durumda OFET kanalı doyuma ulaşır ve bu bölgeye Şekil 1.5'te gösterilen akım-gerilim grafiği üzerinde doyum bölgesi adı verilir. Kanal tamamen doyuma ulaştığından artan akaç-kaynak gerilimine karşılık sabit kanal akımı değeri (I_{DS}) göstermektedir. Doyum bölgesinde, I_{DS} ile V_{DS} arasındaki ilişkiyi niteleyen eşitlik aşağıdaki gibidir.

$$I_{DS} = \frac{1}{2} \mu C_i \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (1.3)$$

Eşitlik 1.3'te görüldüğü gibi doyum bölgesinde I_{DS} değeri, V_{DS} değerine bağlı değildir. Sabit kapı gerilimi arttırıldığında akaç ve kaynak elektrotları arasında kalan

kanalın sahip olduğu direnç değeri düşer. Bunun sonucu olarak uygulanan akaç-kaynak gerilimine karşılık kanaldan geçen akım daha yüksek değerlere ulaşacaktır.

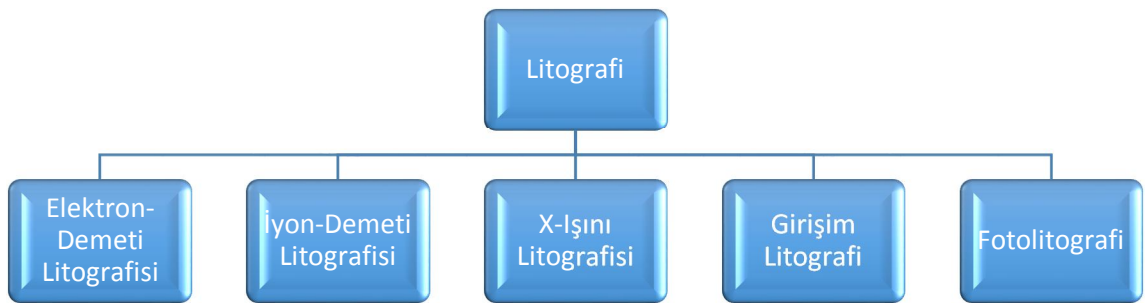
OFET doyum bölgesinde çalıştırılırken, Eşitlik 1.4'te gösterildiği gibi $\sqrt{I_{DS}}$ ifadesine karşılık V_{GS} değerinin eğimi hesaplandığında yük hareketliliği (mobilite, μ) hesaplanmış olur.

$$\mu = \frac{d\sqrt{I_{DS}}}{dV_{GS}} \frac{2L}{WC_i} \quad (1.4)$$

1.2. Litografi

Litografi, Alman yazar Alois Senefelder tarafından 1796 yılında yazı baskılamaya çalışmalarının daha ucuz bir metotla yapılması amacıyla ortaya çıkarılmıştır. Senefelder, çalışmalarında sanatsal şekilleri ve yazıları kireç taşı üzerine oyma yoluyla çizdikten sonra mürekkep ile boyayarak kâğıt üzerine baskı yöntemiyle geçirmiştir (Wikipedia, 2017). Litografi tekniği ortaya çıkarıldığı gibi kalmamış, üzerinden geçen zaman içerisinde geliştirilerek, günümüzde entegre devrelerin üretiminde de kullanılan bir teknik haline gelmiştir.

Son elli sene içerisinde, çeşitli lens sistemlerine ya da foton, x ışını, elektron, iyon ve nötral atomlar gibi farklı radyasyon kaynaklarına sahip birçok litografi çeşidi geliştirilmiştir. Genel olarak kullanılan litografi teknikleri Şekil 1.7'de gösterildiği gibidir.



Şekil 1.7. Güncel olarak kullanılan litografi çeşitleri

Geliştirilen litografik teknikler arasından fotolitografi, mikro elektronik devrelerin üretimi gibi birçok alanda en fazla kullanılan teknik haline gelmiştir.

1.2.1. Fotolitografi

Fotolitografi, aynı zamanda optik litografi veya UV litografi olarak da bilinen ince film desenleme yoluyla genellikle entegre devre üretiminde kullanılan bir tekniktir. Entegre devre endüstrinde, maskeden bir ince film yüzeyine desen transfer etme işlemleri fotolitografi yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Temelde iki boyutlu bir işlem olan fotolitografi, ortaya çıktığından beri çok hızlı gelişmiş ve gün geçtikçe daha küçük desenleme yapabilme yeteneği gelişmeye devam etmektedir.

Bir fotolitografik işlemin performansı, çözünürlük, maske üzerindeki desenin başarılı bir şekilde hizalanabilmesi ve iş/zaman oranı gibi etkenler ile tanımlanabilir. Bu terimler arasından çözünürlük, yüzey üzerine taşınabilecek en küçük desen boyutudur. Günümüz teknolojileri ile geliştirilen fotolitografi cihazları, oldukça yüksek çözünürlüğe, yani oldukça küçük boyuta sahip desenlerin yüzeye taşınması yeteneğine sahiptirler.

Fotolitografide desenin yüzeye taşınması, birbirini takip eden bir takım işlem sonucunda gerçekleştirilmektedir. Bu işlemler sırasında fotorezist adı verilen ışığa duyarlı kimyasallar ve bunların çözücülerini (developer) kullanılmaktadır. Negatif ve pozitif olmak üzere iki çeşit fotorezist bulunmaktadır. İkisini birbirinden ayıran temel fark ise, pozitif fotorezistin ışık gören kısımları developerda çözünür hale gelirken, negatif fotorezistin ışık gören kısımları developerda çözünemez hale gelmesidir.

1.2.1.1. Fotolitografide genel işlem basamakları

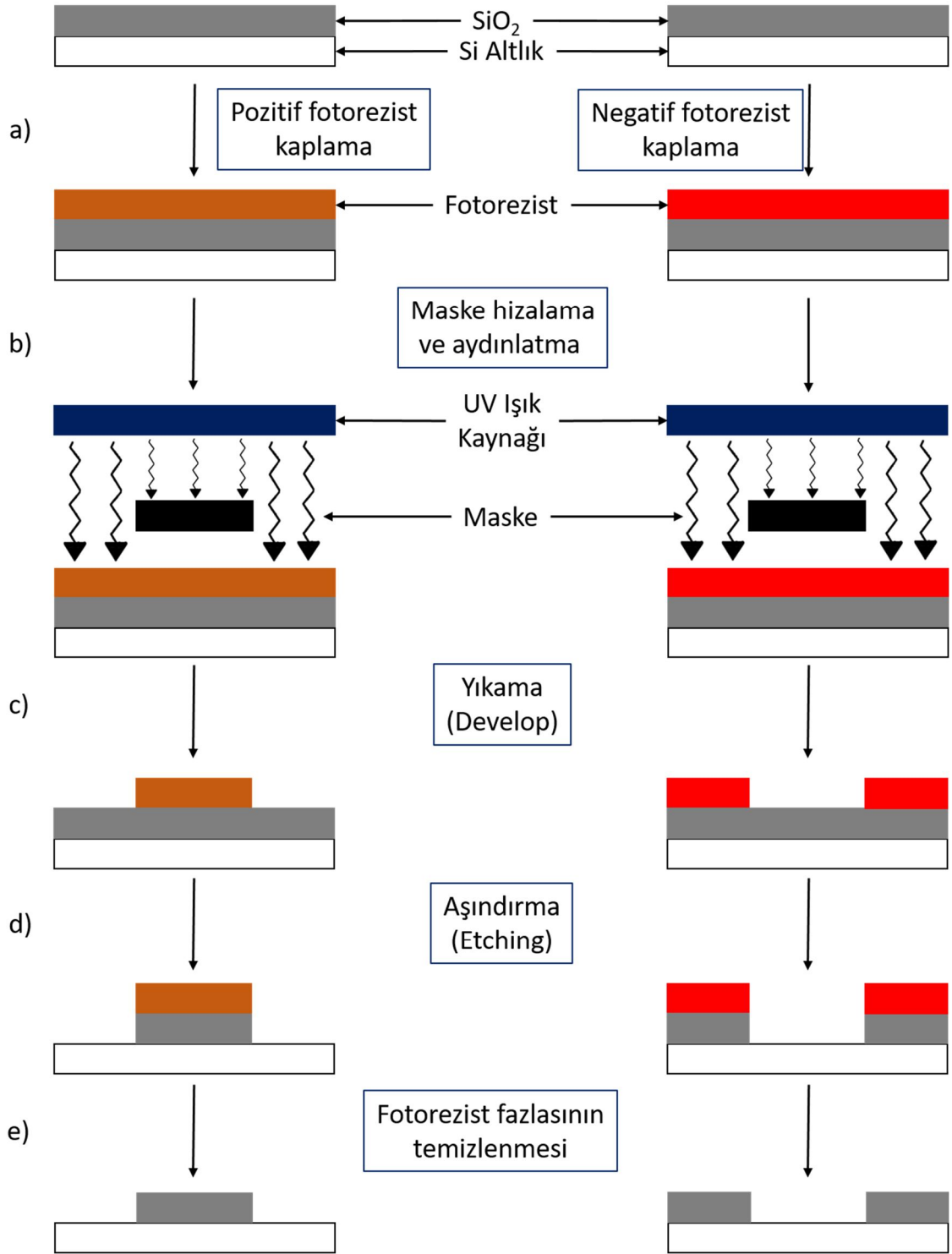
Genel bir fotolitografik işlem toplamda altı adımda gerçekleşir. Bu adımlar işlemin tamamlanması amacıyla yönelik sırayla uygulanır. Uygulanması gereken adımlar genel olarak şu şekilde sıralanmaktadır:

- Fotorezist kaplama,
- Maske hizalama (mask alignment),
- Aydınlatma (exposure),
- Yıkama (develop),
- Aşındırma (etching),
- Fotorezist fazlasını temizleme.

Yukarıda sıralanan fotolitografi işlemlerinin dışında kalmasına rağmen, fotolitografi sonucunu derinden etkileyen, bir diğer önemli adım ise altlık tabakasının

temizlenmesidir. Genel bir altlık temizleme işlemi sırasında metil alkol, aseton, trikloroetilen ve izopropil alkol gibi çözücüler kullanılır. Altlık üzerinde bulunan kirlilikler istenmeyen maskeleme etkilerine ve foto maske üzerinde çizilmelere sebep olabilir.

Fotolitografide desenleme işlemlerine başlarken, desenlenmesi istenen yüzeye fotorezist kaplanmalıdır (Şekil 1.8 (a)). Fotorezist kaplama işleminde genelde döngüsel kaplama (Spin coating) tekniği kullanılmaktadır. Altlık döngüsel kaplama cihazının vakum haznesine yerleştirildikten sonra yüzeye bir mikro pipet yardımıyla belirli miktarda fotorezist bırakılır. Altlık cihaz tarafından vakum ile sabitlendikten sonra gerekli hızlarda döngüsel kaplama işlemine başlanır. Döngüsel kaplama hızı, yüzeyde oluşacak fotorezist ince film kalınlığını etkilemektedir. Fotorezist kalınlığı ise ileride uygulanacak olan aydınlatma işlemi süresini, dolayısıyla çözünürlüğü etkilemektedir. Bu yüzden aydınlatma işleminden önce fotorezist kalınlığı optimize edilmelidir. Gereken fotorezist kalınlığı kullanılan fotorezist maddeye göre değişkenlik gösterir.



Şekil 1.8. Fotolitografik sürecin şematik gösterimi.

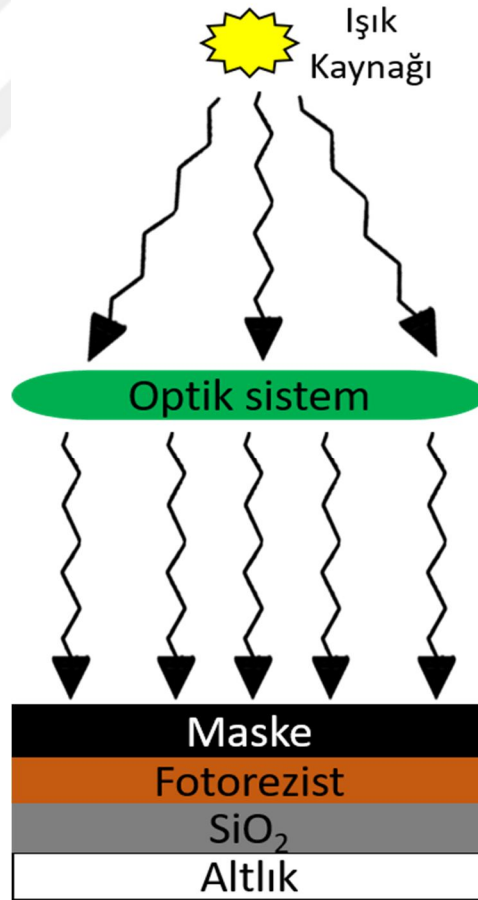
Fotorezist kaplama işleminden sonra Şekil 1.8 (b)'de şematik olarak gösterildiği gibi maske hizalama ve aydınlatma (exposure) işlemi uygulanır. Maske hizalama işlemi genel olarak dört farklı şekilde gerçekleştirilebilir. Bunlar;

- Temaslı baskılama (contact printing),

- Yakın baskılama (proximity printing),
- İz düşüm baskılama (projection printing)
- Maskesiz baskılama (maskless photolithography)

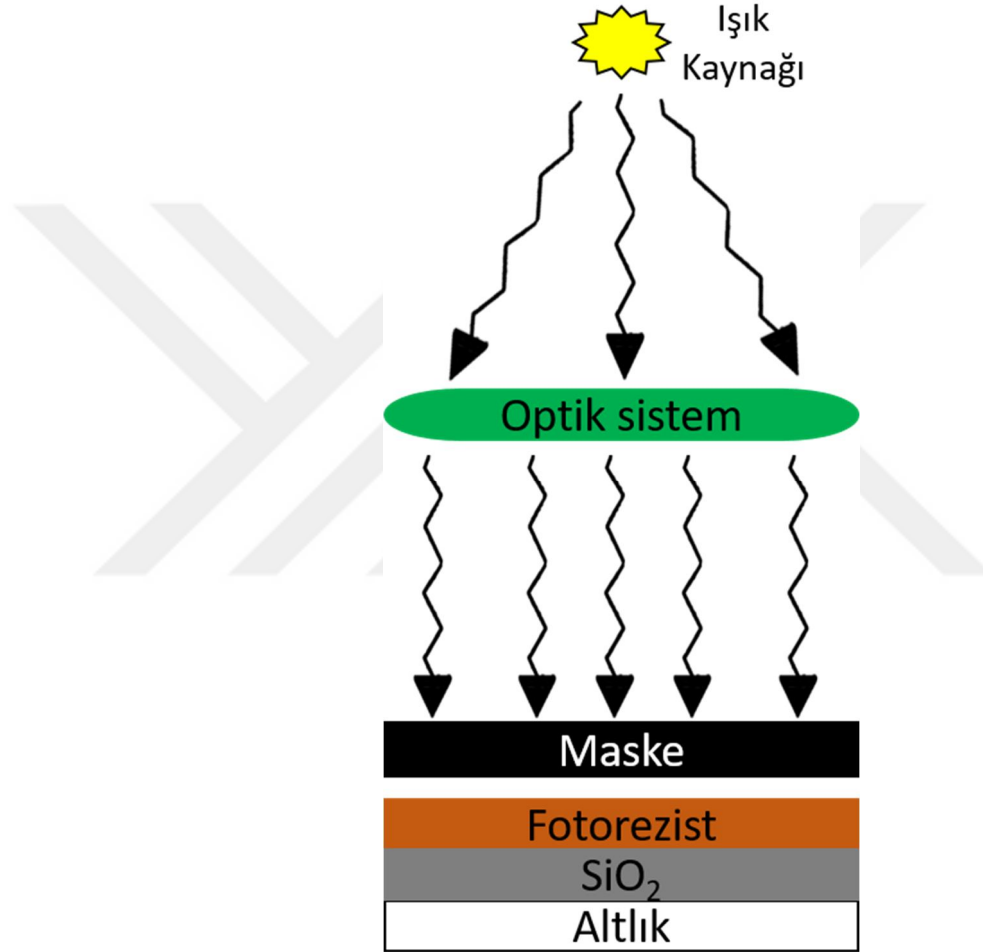
şeklinde sıralanabilir.

Temaslı baskılama yönteminde Şekil 1.9'da gösterildiği gibi maske ile desenlenmesi istenen yüzey birbiri ile temas halindedir. Işık kaynağı tarafından üretilen UV ışık yüzeye optik sistem tarafından yönlendirilir. Yönlünen ışık birbiri ile temas halinde olan maske ve fotoreziste çarpar. Işığın bir kısmı maske tarafından maskelenirken diğer bir kısmı fotorezist yüzeyine çarpar. Böylece fotorezistin ışık gören kısımları kimyasal olarak değişime uğrar ve böylece çözünür (pozitif fotorezist) ya da çözünmez (negatif fotorezist) hale gelir. Temaslı baskılama yönteminde ince film yığını ve maske temas haline olduğundan çözünürlük oldukça yüksektir fakat bu maske ile yüzey arasında kalabilecek olan kirlilikler maskeye, dolayısıyla desene zarar vermektedir.



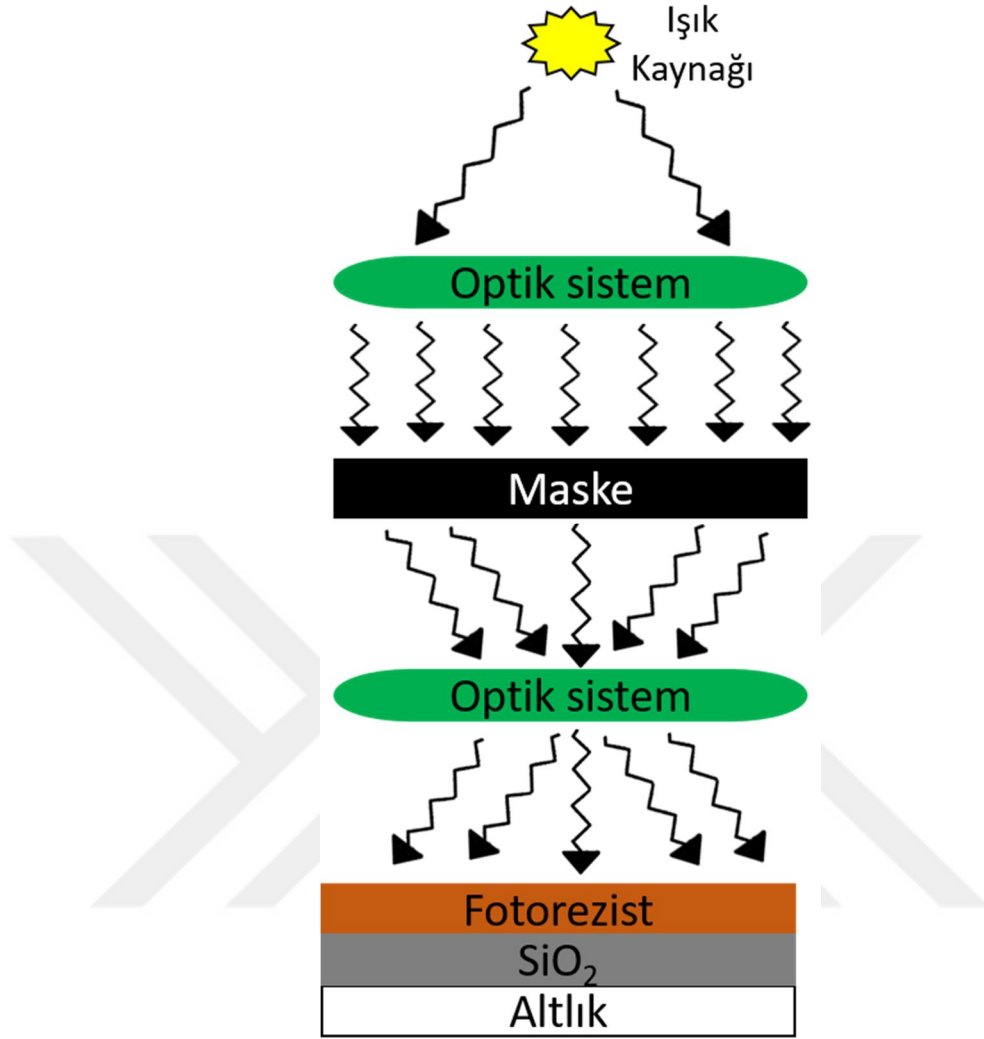
Şekil 1.9. Temaslı baskılamanın şematik gösterimi.

Yakın baskılamada Şekil 1.10'da gösterildiği gibi, temaslı baskılamaya kıyasla maske ve yüzey arasında bir miktar boşluk vardır. Bu yöntemde yüzey ve maske arasında kalan kirliliklerin sonucu olan maskedeki deformasyonlar en aza indirilmiş olur fakat çözünürlük bir miktar düşer ve yaklaşık olarak 2-4 mikronluk bir seviyeye çıkar. Maske üzerinde oluşan deformasyonlar tamamen bertaraf edilemediğinden desen üzerinde oluşabilecek kusurların önüne tamamen geçilememektedir.



Şekil 1.10. Yakın baskılama yönteminin şematik gösterimi.

İz düşüm baskılama tekniği Şekil 1.11'de şematik olarak gösterilmiştir. Bu teknikte diğer yöntemlerden farklı olarak maske ve yüzey arasındaki boşluk birkaç santimetreye çıkmaktadır. Maske ve yüzey arasında bırakılan bu geniş boşluk sayesinde maske zedelenmeleri ve bundan kaynaklanan desendeki kusurlar tamamen ortadan kalkmaktadır. Bu yöntem ile yapılan desenlemelerin çözünürlüğü ise yaklaşık olarak 1 mikron seviyesindedir.



Şekil 1.11. İz düşüm baskılama tekniğinin şematik gösterimi.

Maskeleme ve aydınlatma işlemi türlerinden sonuncusu ise tamamen maske kullanılmayan maskesiz baskılama (maskesiz fotolitografi) yöntemidir. Bu teknikte maske yerine bir dizi optik parçalardan oluşan bir sistem kullanılır. Baskılanacak desen bilgisayar tarafından, genelde akıllı filtre olarak adlandırılan, mikron ve mikron altı boyutta aynalardan oluşan bir filtreleme sistemine iletilir. Filtreleme sistemi üzerinde şekillendirilen ışık, çeşitli optik parçalar bulunan bir ışık yolu vasıtasıyla yüzeye gönderilir. Bu yöntem ile yapılan fotolitografik işlemlerde çözünürlük 1 mikronun altında bir değere sahiptir. Ucuz ve kolay uygulanabilir bir yöntem olduğundan günümüzde en çok kullanılan yöntemlerden biridir ve bundan dolayı hızla gelişmeye devam etmektedir.

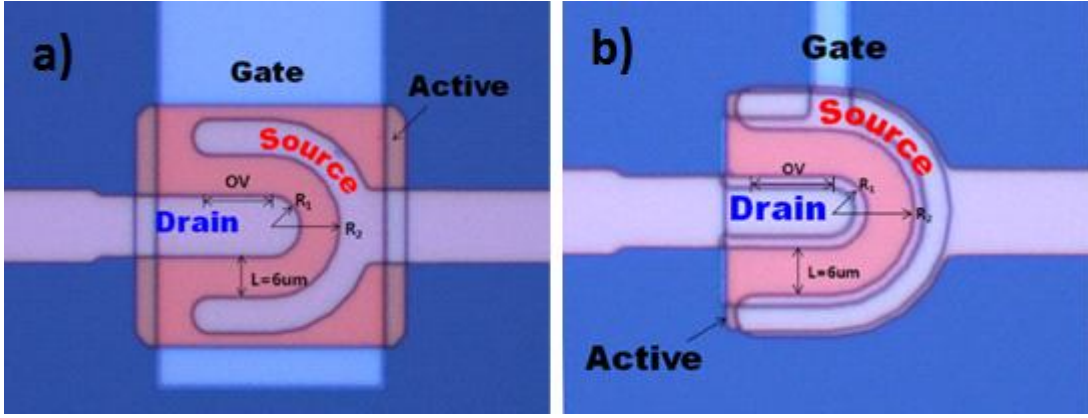
Maske hizalama ve aydınlatma işlemlerinden sonra yıkama (develop) işlemi uygulanır. Fotolitografinin bu basamağında ışığa maruz kalmış fotorezist kaplı yüzey çeşitli kimyasallardan oluşan bir çözücüye (developer) daldırılır ve bir süre bekletilir. Yıkama işlemi süresi fotorezist türü, developer türü, fotorezist kalınlığı ve aydınlatma süresi gibi parametrelere bağlıdır, dolayısıyla optimize edilmelidir. Optimizasyon işlemleri kusurları en aza indirilmiş bir desen elde edildiğinde son bulur ve optimize edilmiş değerler ile yıkama işlemi yapılır. Yıkama işlemi sonunda Şekil 1.8 (c)'de gösterildiği gibi desenlenmiş fotorezist tabakası elde edilir ve desenlenmesi istenen tabakanın aşındırılması işlemine geçilir.

Aşındırma (etching) işlemi, desenlenmiş fotorezist tabakasının altında bulunan tabaka için uygulanır. Bu basamakta ince film yığını uygun aşındırıcı kimyasallara veya çözücülere daldırılır. Bu işlem sırasında kullanılacak olan aşındırıcı veya çözücünün fotoreziste zarar vermemesi gerektiği göz önünde bulundurularak seçilmelidir. Aşındırıcı kimyasal veya çözücü, bir veya birden çok kimyasalın karışımından oluşturulabilir. İnce film yığını, tercih edilen aşındırıcı içine daldırılır ve desenlenmesi istenen tabaka tamamen yüzeyden kalkana kadar beklenir. Bu işlem sonunda Şekil 1.8 (d)'de gösterildiği gibi desenlenmiş fotorezist altındaki tabaka da desenlenmiş olur.

Son olarak Şekil 1.8 (e)'de şematik olarak gösterildiği gibi yüzeyden fotorezistin tamamının kaldırılması işlemi kalır. Bu işlemin gerçekleştirilmesi amacıyla üretilen fotorezist giderici (fotorezist remover) kimyasallar kullanılır. Yüzeyden fotorezistin kalanı kaldırıldıktan sonra desenlenmesi istenen tabaka tamamen desenlenerek işlem tamamlanır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

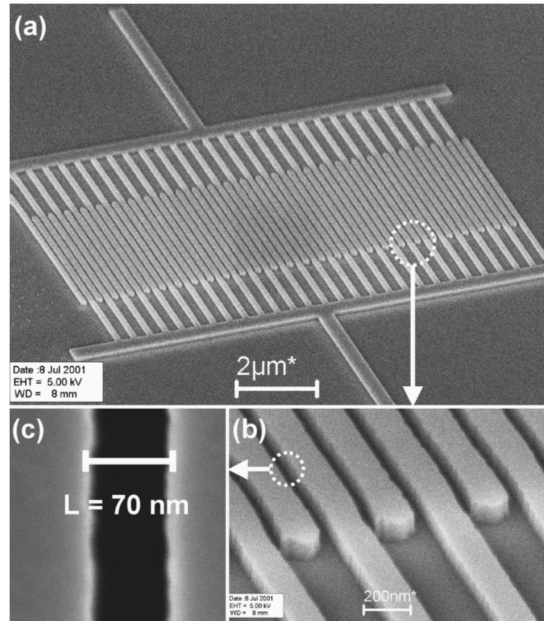
Son yirmi yıl içinde, ışık yayan diyotlar (LED), ince film transistörler (TFT) ve fotovoltaiik hücreler gibi organik elektronik cihazların performanslarında muazzam gelişmeler yaşanmıştır (Mitschke ve Bauerle, 2000; Brabec ve ark., 2001; Horowitz, 2004). Bu kayda değer gelişmeler sayesinde ‘organik elektronikler’ terimi günümüzde yarıiletken, iletken ve yalıtkan malzemeler kullanılan elektronik cihazların tanımı haline gelmiştir (Malliaras ve Friend, 2005). Organik elektroniklerin büyük ölçüde gelişme yaşamasının en büyük sebepleri kolay, ucuz ve esnek üretim süreçlerine, kullanılabilir organik malzeme çeşitliliğine ve geniş uygulama alanına sahip olmalarından kaynaklanmıştır (Peumans ve ark., 2003; Tseng ve ark., 2005; Scott ve Bozano, 2007; Klauk, 2012; Cheng ve ark., 2013). Bir tür organik elektronik cihaz olan OFET’ler de diğerleri gibi düşük maliyet, esnek üretim olanakları ve birçok alanda kullanılabilir olduklarından ilgi çekmiş ve araştırma konusu olmayı başarmışlardır. OFET’lerin aktif matris organik ışık yayan diyot (AMOLED) panellerinin sürücü elementleri haline gelerek entegre devrelerin parçası olmaları beklenmektedir (Sittinghaus ve ark., 1998). Daha önce, yüksek çözünürlüğe sahip aktif matris sıvı kristal ekranlar (AM-LCD) için tarak şeklinde hidrojenlenmiş amorf silikon (a-Si:H) ince film transistörlerin geometrik tasarım ve karakterizasyon çalışmaları yayınlanmıştır (Lee ve ark., 2009). Çatal geometrisine benzetilerek iki farklı transistör üretilmiş ve elektriksel karakterizasyonları çalışılmıştır. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi, bu iki transistör de çubuk şeklinde bir iç elektrota ve “U” şeklinde bir dış elektrota sahip. Fakat Şekil 2.1 (a)’da gösterilen transistörün aktif tabakası ve kapı elektrotu desenlenmemiş ve aktif tabaka tüm transistör alanını kaplıyorken, (b)’de gösterilen transistörün aktif tabakası ve gate elektrotu desenlenmiş ve aktif tabakası sadece kanal alanını kaplamaktadır. Sonuç olarak, eşik değer voltajı iki FET için de aynı kalırken, desenlenmemiş FET’e göre desenlenmiş FET’in parazitik kapasitansı önemli ölçüde düşürülmüştür (Lee ve ark., 2011).



Şekil 2.1. Aktif tabakası (a) desenlenmemiş, (b) desenlenmiş FET (Lee ve ark., 2011).

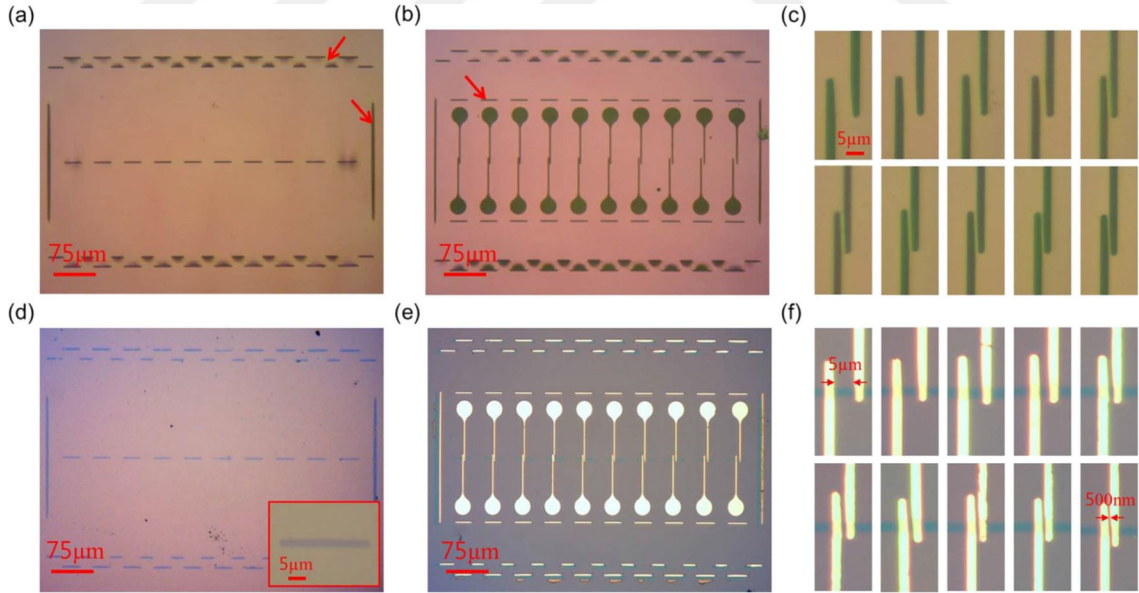
Polimer yarıiletken kullanılan, yüksek yük hareketliliğine sahip alan etkili transistörler üzerinde çokça çalışılmış (Sirringhaus ve ark., 1998) olmasına rağmen, transistör performansı kanal uzunluğunun azaltılması ile artırılabilir. Düşük maliyetli polimerlerin kullanıldığı, kısa kanal uzunluğuna sahip transistörlerin üretilmesi amacıyla, pahalı olmayan, mikron altı desenleme yeteneği olan litografi tekniği kullanılabilir.

Şekil 2.2'de taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntüsü bulunan, tarak geometrisine sahip, organik ince film transistörler (OTFT) litografi tekniği ile üretilmiştir. Üretim sürecinde kaynak ve akaç elektrotları desenlenmiştir. Sonuç olarak üretilen transistörlerin açma/kapama oranı sabit kalırken, akım yoğunluklarının arttığı gözlemlenmiştir (Austin ve Chou, 2002).



Şekil 2.2. 70nm kanal uzunluğuna ve tarak geometrisine sahip OTFT (Austin ve Chou, 2002).

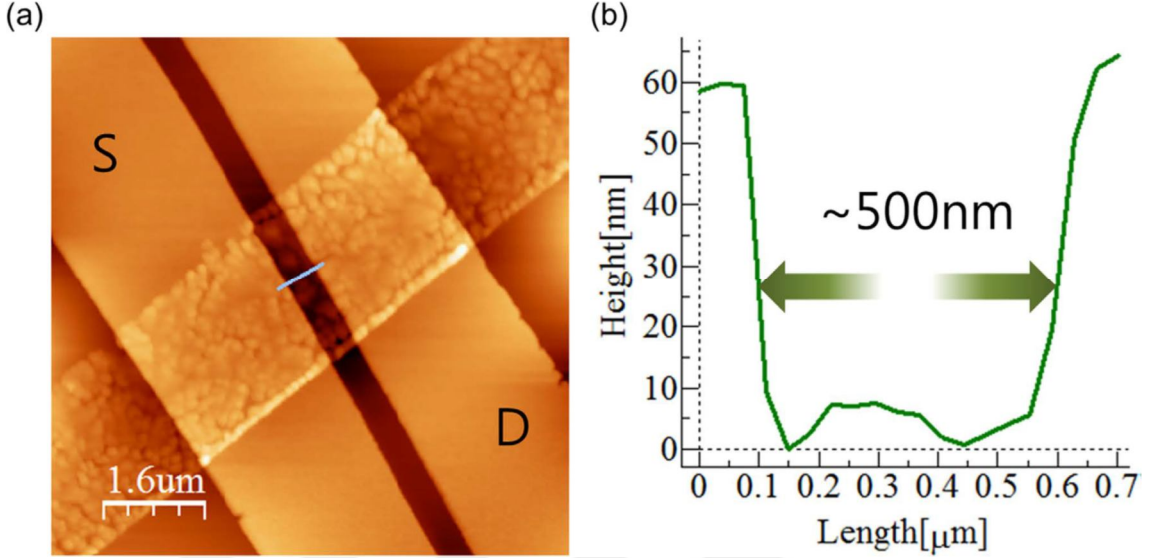
Bir diğer çalışmada ise litografi tekniği ile polimetilmetakrilat (PMMA) ince film tabakası desenlenmiş ve maske olarak kullanılmıştır. Bunun gerçekleştirilmesi amacıyla önce 500nm kalınlığa sahip PMMA, iki ayrı Si/SiO₂ altlık üzerine döngüsel kaplama tekniği ile 4500 RPM hızla kaplanmış ve litografi yöntemi ile desenlenmiştir. Yüzeylerden biri aktif tabaka maskesi, diğeri ise akaç-kaynak elektrotu maskesi olarak desenlenmiştir. PMMA tabakasının daha sağlam ve dayanıklı hale getirilmesi amacıyla 180°C sıcaklıkta bir saat boyunca ısıtılmıştır. Aktif tabaka ve akaç-kaynak elektrot desenlerini açıkta bırakacak şekilde merkezinde delik bulunan ince bir plastik tabaka PMMA üzerine oturtulmuştur. Plastik tutucuya sahip desenlenmiş PMMA tabakası, potasyum hidroksit (KOH) çözeltisine daldırılarak Si/SiO₂ altlığından ayrılmıştır. Yüzey 30 dakika boyunca 50°C sıcaklıkta KOH çözeltisi içinde bekletildikten sonra tamamen Si/SiO₂ altlığından ayrılmış ve saf su ile yıkandıktan sonra kullanıma hazır hale gelmiştir. Bu maskeler kullanılarak pentasen yarıiletken ve altın akaç-kaynak elektrotları fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile kaplanmış ve üretilen alan etkili transistörlerin elektriksel karakterizasyonu yapılmıştır (Yun ve ark., 2015).



Şekil 2.3. Hazırlanan PMMA aktif tabaka (a) ve akaç-kaynak elektrotları (b) maskeleri. Akaç-kaynak elektrotları arasındaki kanalın yakından görüntüsü (c). PMMA maskeler kullanılarak kaplanmış pentasen yarıiletken tabakası (d), altın akaç-kaynak elektrotları (e) ve elektrotlar arasındaki kanalın yakından görünüşü (Yun ve ark., 2015).

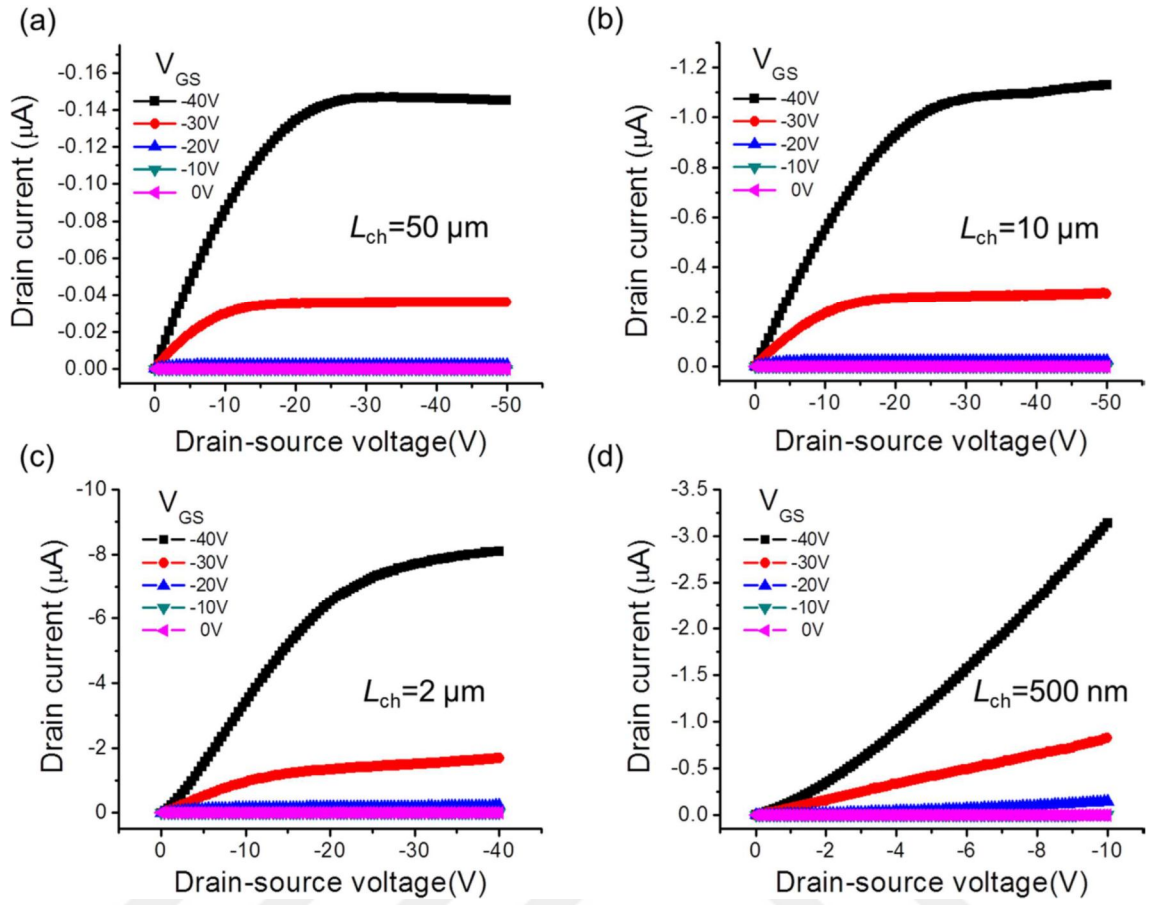
Üretilen 500nm kanal uzunluğuna sahip OFET'in Şekil 2.4'deki atomik kuvvet mikroskop (AFM) görüntüsünde görüldüğü gibi elektrot köşeleri ve bu elektrotlar

arasında kalan kanal boşluğu ve bunu uzunluğu kesin bir şekilde görülmektedir. Üretilen maske ve altlık arasındaki boşluksuz temas kesin ve temiz bir organik madde ve metal kaplamasına olanak sağlamaktadır.



Şekil 2.4. a) 500nm kanal uzunluğuna sahip OFET'in AFM görüntüsü. b) elektrotlar arasında kalan kanalın arakesit profili (Yun ve ark., 2015).

Şekil 2.5 üretilen transistörlerin elektriksel karakterizasyonları sonucu elde edilen $I_{DS}-V_{DS}$ karakteristiklerini, farklı kanal uzunlukları için göstermektedir. Kanal uzunluğu $10\mu m$ üzerinde olan OFET belirgin bir doyum bölgesi ile standart alan etkili transistör davranışları sergilemiştir. Kanal uzunluğunun düşürülmesi ile birlikte lineer bölgede genişleme ve I_{DS} akımının kusursuzca doyuma ulaşmadığı gözlemlenmiştir. Bu durumda $500nm$ kanal uzunluğuna sahip OFET, bozulmadan önce standart OFET doyum performansı göstermemektedir. Kanal uzunluğu $2\mu m$ olan OFET, düşük voltajlarda lineer olmayan $I_{DS}-V_{DS}$ bölgesine sahiptir ve kanal uzunluğu düşürüldükçe bu bölge daha belirgin hale gelmektedir. Özellikle üst kontak geometrisi için I-V karakterizasyonundaki bu lineer olmayan davranış, kontak alanından kanal sınırına yük taşınmasından kaynaklandığı bilinmektedir (Chen ve ark., 2012). OFET'lerin bu durumları, büyük kanal uzunluklarına bağlı olmakla birlikte, kanal direncinin kontak direncinden çok daha büyük olduğu durumlarda gözlemlenmektedir. Kanal direnci, pentasen FET'ler için kanal uzunluğunun $2\mu m$ 'nin altında olduğu durumlarda kontak direnci ile mukayese edilebilecek seviyeye geldiği görülmektedir. Bu yüzden kanal uzunluğu düşükçe kontak direncinin etkisi artarak önem kazanmaktadır (Hoppe ve ark., 2008; Chen ve Shih, 2009; Sohn ve ark., 2010; Fleischli ve ark., 2011).



Şekil 2.5. Farklı kanal uzunluğuna sahip pentasen OFET'lerin I_{DS} - V_{DS} karakteristikleri (Yun ve ark., 2015).

Litografi tekniği ile gerçekleştirilip herhangi bir çözücü kullanılmayan bu üretim tekniği pentasen yarıiletkeninin herhangi kimyasal hasar ya da sıradan maskelerin sebep olduğu mekanik hasarlar görmesinin önüne geçmiştir. Bu yöntem ile üretilen pentasen alan etkili transistörlerin elektriksel karakterizasyonları sağlıklı kontak özellikleri göstermiştir (Yun ve ark., 2015).

Sonuç olarak, yüksek performanslı transistörlerin üretimi teknolojinin gelişmesi adına büyük önem taşımaktadır. Transistör geometrisinin ve üretim tekniklerinin transistör performansı üzerindeki etkisinin büyük olduğu literatürde açıkça görülmektedir. Dolayısıyla bu tez çalışmasında, fotolitografi yöntemi ile farklı geometrilere sahip alan etkili transistörler üretilmiş ve performansları birbirleri karşılaştırılmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. OFET Üretiminde Kullanılan Kimyasal Maddeler

Bu tez çalışması kapsamında üretilen OFET'ler, Ossila marka silikon dioksit (SiO_2) kaplı silikon altlıklar (Si/SiO_2) üzerine üretilmiştir. Altlık temizliği için kullanılan aseton ve izopropanol Sigma-Aldrich'den satın alınmış, ultra saf su ise Milipore marka Direct Q3-UV model cihazı kullanılarak elde edilmiştir. Kaynak-Akaç elektrotları için kullanılan altın Kurt J. Lesker'den satın alınmıştır. Fotolitografik işlemler sırasında Microposit S1805 G2 pozitif fotorezist ve Dow MF-24A developer kullanılmıştır. Aktif tabaka için p-tipi bir yarıiletken olan 2,7-Dioctyl[1]benzothieno[3,2-b][1]benzothiophene (C8-BTBT) Sigma-Aldrich'ten satın alınmış ve herhangi bir saflaştırma işlemine maruz bırakılmadan kullanılmıştır.

3.2. OFET'lerin Karakterizasyonunda Kullanılan Cihaz ve Teknikler

3.2.1. Akım-Voltaj Karakterizasyonu



Şekil 3.1. MBraun M200 glovebox sistemi.

Üretilen OFET'lerin akım-voltaj (I-V) karakterizasyonu için MBraun M200 glovebox sistemine (Şekil 3.1) entegre edilmiş Keithley 2634B potansiyostat (Şekil 3.2) kullanılmış ve tüm ölçümler bilgisayar üzerinden bir yazılım yardımıyla kontrol edilmiştir. Dolayısıyla ölçümler için oksijen ve nemden arındırılmış glovebox ortamı kullanılmıştır. Potansiyostat Şekil 1.3'te gösterildiği gibi, bu çalışma kapsamında üretilmiş olan OFET'lere bağlanmıştır. OFET'in kapı elektrotuna sabit gerilim uygulandıktan sonra, kaynak elektrotu belirli gerilim değerleri arasında taranarak aktif tabakadan geçen akım ölçülmüştür.



Şekil 3.2. Keithley 2634B potansiyostat.

3.2.2. Desenlenmiş Elektrotların Yüzey Karakterizasyonu

OFET üretimi için kullanılan maskesiz fotolitografi yönteminde kaynak-akaç elektrotları desenlendikten sonra arzu edilen elektrot geometrilerinin elde edilip edilmediği ve yüzeydeki kusurların incelenmesi amacıyla Olympus BX53 optik mikroskobu (Şekil 3.3) kullanılmıştır. Çalışma kapsamında bu mikroskop aynı zamanda

fotolitografi cihazının kalibre edilmesi sırasında kalibrasyon desenlerinin incelenmesi ve bir sonraki adımın belirlenmesi amacıyla da kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Olympus BX53 optik mikroskop.

3.3. Deneysel Çalışmalar

3.3.1. Maskesiz Fotolitografi Cihazının Kalibre Edilmesi

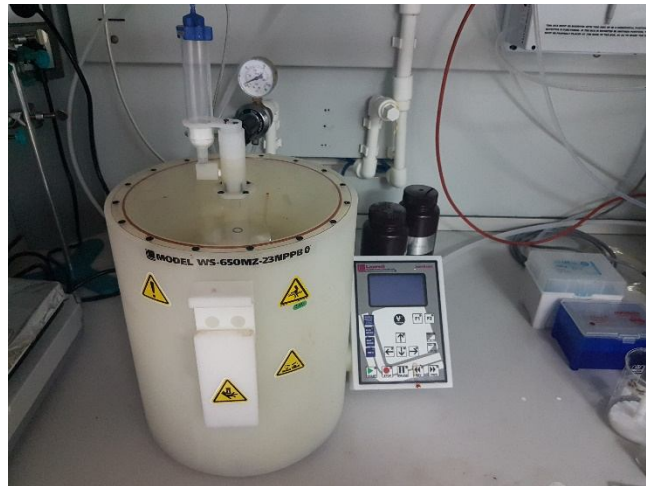
Silikon altlıklar sırasıyla aseton, izopropanol ve ultra saf su içerisinde onar dakika boyunca ultra sonik banyoda bekletildikten sonra azot gazı ile kurutulmuştur.

Temizlenen altlıklar üzerine fiziksel buhar biriktirme tekniği ile MBraun glovebox sistemine entegre Şekil 3.4'te gösterilen termal buharlaştırma cihazı kullanılarak 0.5 \AA/saniye hızla 120nm altın kaplanmıştır.



Şekil 3.4. Glovebox sistemine entegre fiziksel buhar biriktirme cihazı.

Tüm yüzeye kaplanmış olan altın üzerine döngüsel kaplama yöntemi ile Şekil 3.5'te gösterilen Laurell WS-650MZ-23NPPB cihazı kullanılarak, fotorezist 5000 RPM hızla 45 saniye süre ile kaplanmıştır. Fotorezist içerisinde bulunan çözücü kimyasalların uzaklaştırılması amacıyla yüzey 90°C'de 60 saniye süreyle ısıtılmıştır.



Şekil 3.5. Laurell WS-650MZ-23NPPB döngüsel kaplama cihazı

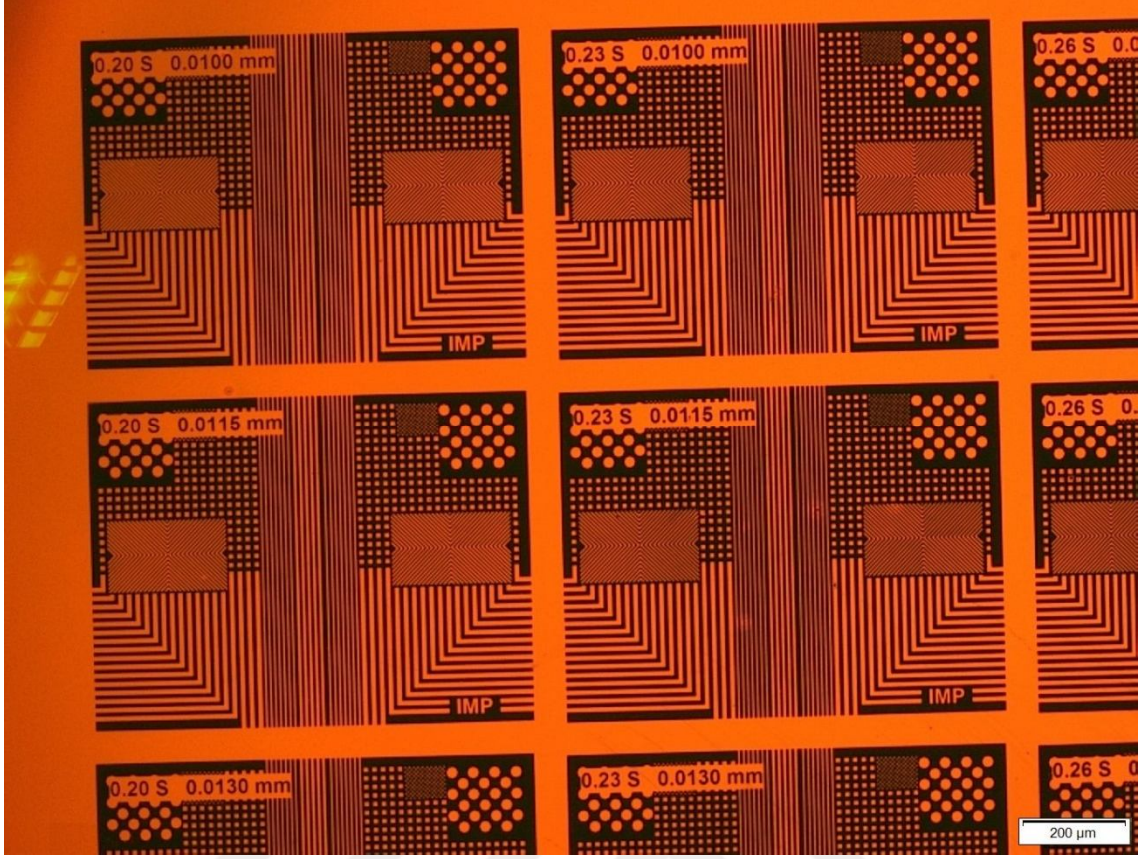
Bir sonraki aşamada altın ve fotorezist kaplı silikon altlık maskesiz fotolitografi cihazının kaynak-akaç elektrotlarının desenlenmesi amacıyla kalibre edilmesi için

kullanılmıştır. Bu çalışmada OFET üretimi sırasında kaynak-akaç elektrotlarının desenlenmesi için Şekil 3.6'da gösterilen Intelligent Micro Patterning şirketi tarafından üretimi gerçekleştirilmiş olan SF-100 XPRESS maskesiz fotolitografi cihazı kullanılmıştır.



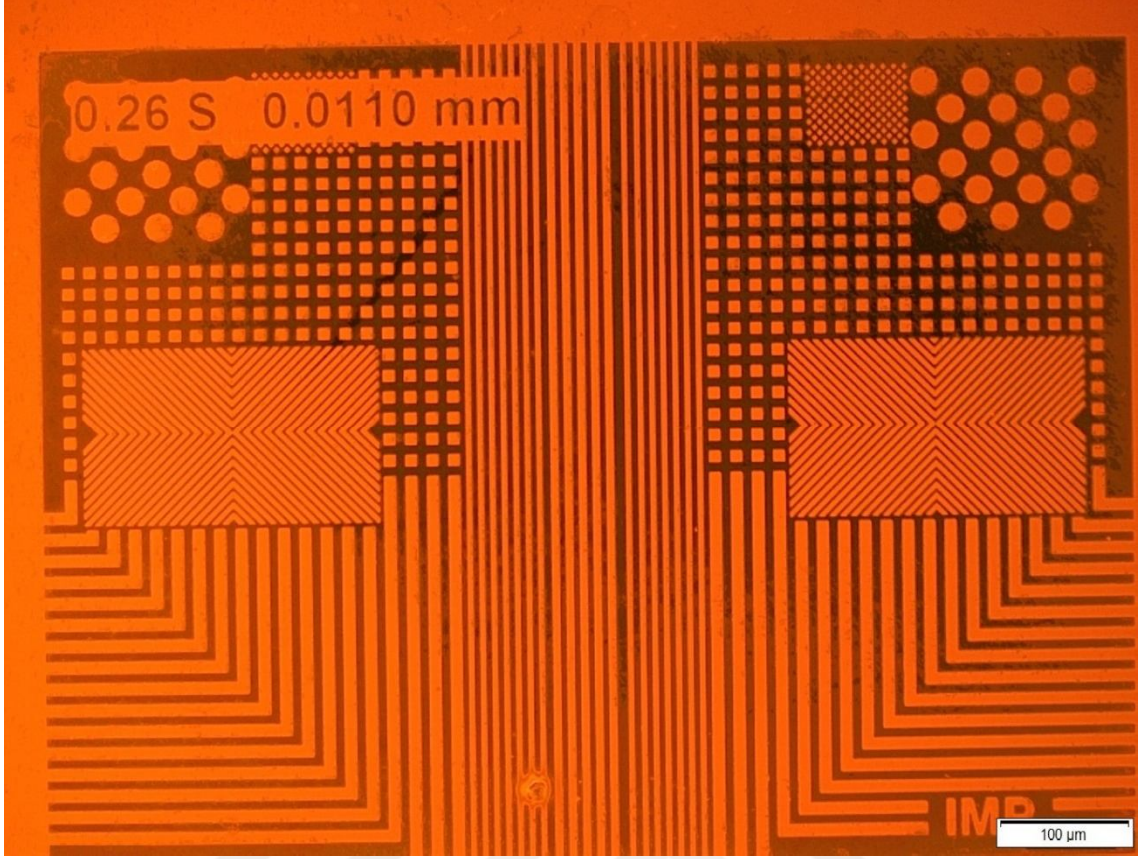
Şekil 3.6. Intelligent Micro Patterning SF-100 XPRESS maskesiz fotolitografi cihazı.

Kaynak-akaç elektrotlarının desenlenmesine geçmeden önce fotolitografi cihazı iki farklı noktada kalibre edilmiştir. Öncelikle cihazın yüzeye deseni işlerken kullandığı “işlem sehпасının yüksekliği (Z)” ve “ışığa maruz bırakma süresi (t)” parametreleri kalibre edilmiştir. Bu amaç doğrultusunda yüzeye yaklaşık 50 adet üretici firma tarafından sağlanan “Focus/Exposure Matrix” deseni işlenmiştir. Her bir desen farklı Z ve t değerine sahiptir. İşlenen yüzey developer çözücü içerisinde 45 saniye süreyle yıkandıktan sonra mikroskop altında incelenmiştir. Şekil 3.7’da gösterilen mikroskop görüntüsü incelenirken desenler arasında neredeyse kusursuz desenlemenin seçilmesi amaçlanmıştır. İnceleme tamamlanıp, kusursuza en yakın desen seçildikten sonra aynı işlemler toplamda üç kez, daha dar bir Z ve t değerleri aralığı belirlenerek tekrarlanmıştır.



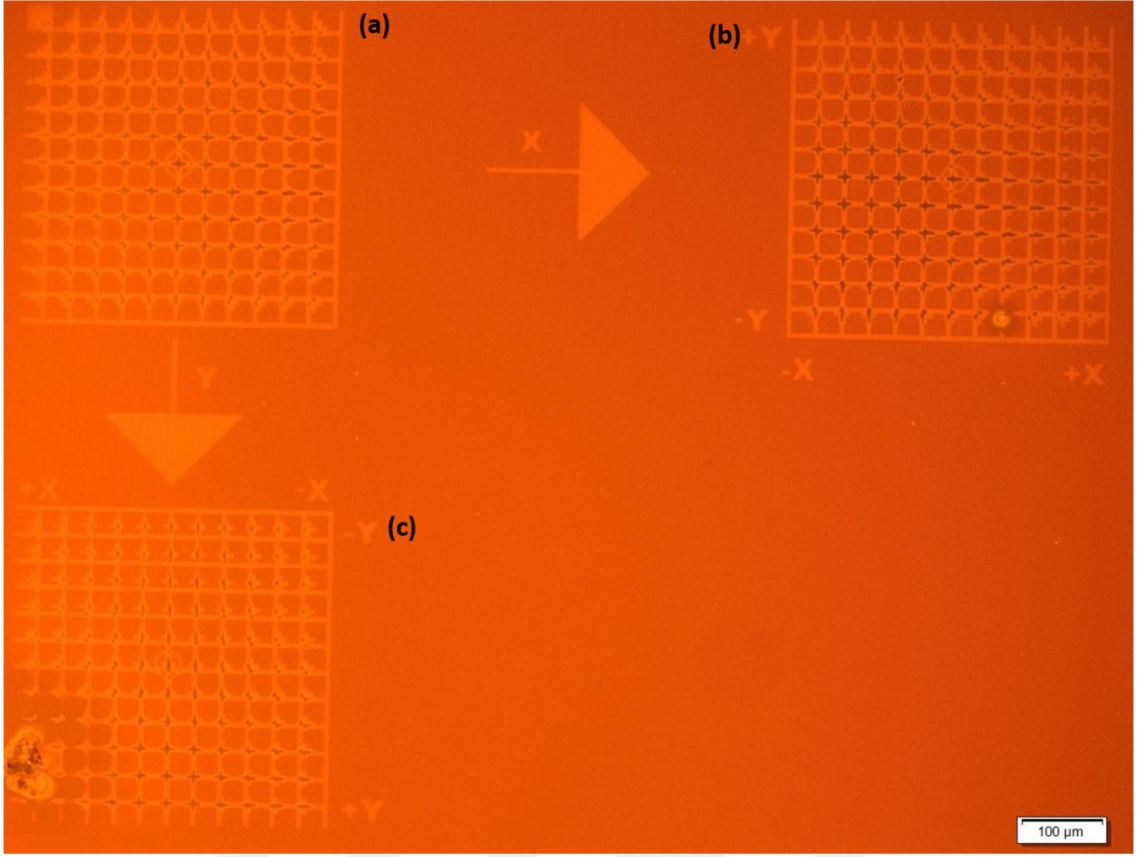
Şekil 3.7. Focus/Exposure Matrix desenlerinin mikroskop görüntüsü.

En son desenlenen ve neredeyse kusursuz desene en yakın Z ve t değerlerini taşıyan kalibrasyon desenleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yapılan inceleme sonucu Şekil 3.8’de gösterilen, 0.26 saniye ışığa maruz bırakma süresi ve 0,0110 milimetre Z değerine sahip olan desen seçilmiş, bu değerler çalışmanın ileri safhalarında yapılan tüm desenleme işlemlerinde kullanılmıştır. Şekilde de görüldüğü gibi desenin sahip olduğu çizgilerde kayma, ince detaylarda kaybolma gözlemlenmemiş, desen duvarlarındaki keskinlik ise duvarların dik ve düz bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.



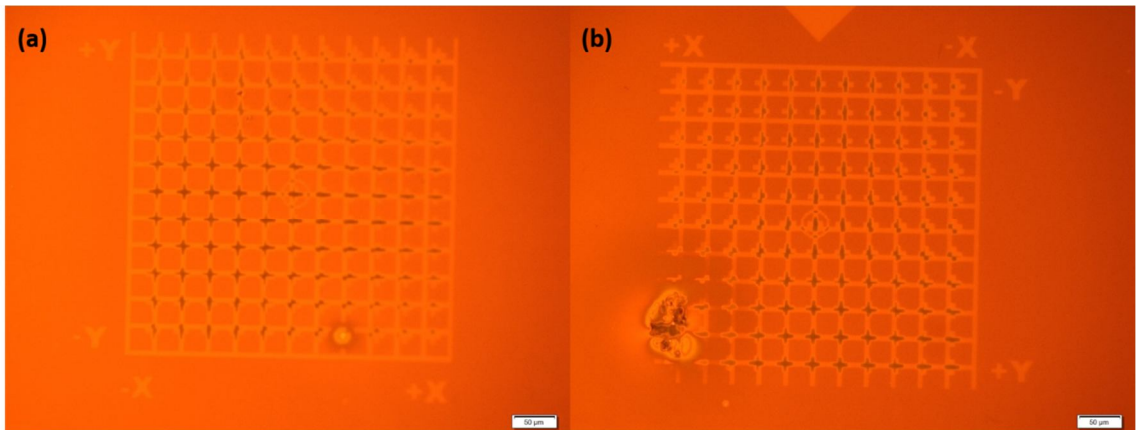
Şekil 3.8. Kullanılmak üzere seçilen kalibrasyon deseninin yakın görüntüsü.

OFET üretimine geçmeden önce son bir kalibrasyon adımı olan cihazın işlem sehпасının X ve Y koordinat düzlemlerinde attığı adımların doğruluğu kalibre edilmiştir. Bu işlemin tamamlanması için fotorezist kaplı yüzeye üretici firma tarafından sağlanan desen işlenmiş ve developer çözücü içerisinde 45 saniye boyunca bekletilerek yıkanmıştır. Şekil 3.9’de gösterilen bu desen cihazın işlem sehпасının hareket etmeden önceki desenini (a) ve X (b) ve Y (c) eksenlerinde ayrı ayrı birer adım attıktan sonra işlediği desenlerin mikroskop görüntüsüdür. X ve Y koordinatlarında bulunan desenler yakından incelenerek ortalarındaki daire etrafında bulunan “+” işaretlerinin en düzgün çıkmış olanı aranmıştır. Belirlenen “+” işaretinin daireye olan uzaklığı X ve Y koordinatları üzerinde belirlenerek bu koordinatlar cihaza girilmiştir. Koordinatların belirlenmesi amacıyla desen üzerinde bulunan her bir karenin kenarları bir birim olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.9. İşlem sehpasının X ve Y koordinat düzlemleri üzerinde attığı adımların kalibre edilmesi amacıyla yüzeye basılan desenin mikroskop görüntüsü.

Şekil 3.10’da X (a) ve Y (b) koordinatlarında basılan desenlerin yakından alınmış mikroskop görüntüleri bulunmaktadır. Cihazın işlem sehpasının X eksenindeki adımları kalibre etmek için Şekil 3.10 (a), Y eksenindeki adımları kalibre etmek için Şekil 3.10 (b) incelenmiştir. X kalibrasyonu için en düzgün “+” işareti (-2,1), Y kalibrasyonu içinse (0,4) koordinatları belirlenmiş ve cihaza kalibrasyon verileri olarak girilmiştir.



Şekil 3.10. X ve Y koordinatları için basılan desenlerin mikroskop görüntüsü.

3.3.2. OFET Üretimi

3.3.2.1. Gerekli çözeltilerin hazırlanması

Yarıiletken çözeltilisinin hazırlanması

Aktif tabakada kullanılan C8-BTBT yarıiletken madde klorobenzen çözücüsü içerisinde %1'lik çözelti oluşturmak amacıyla çözülmüş ve bir gece boyunca karıştırılmıştır.

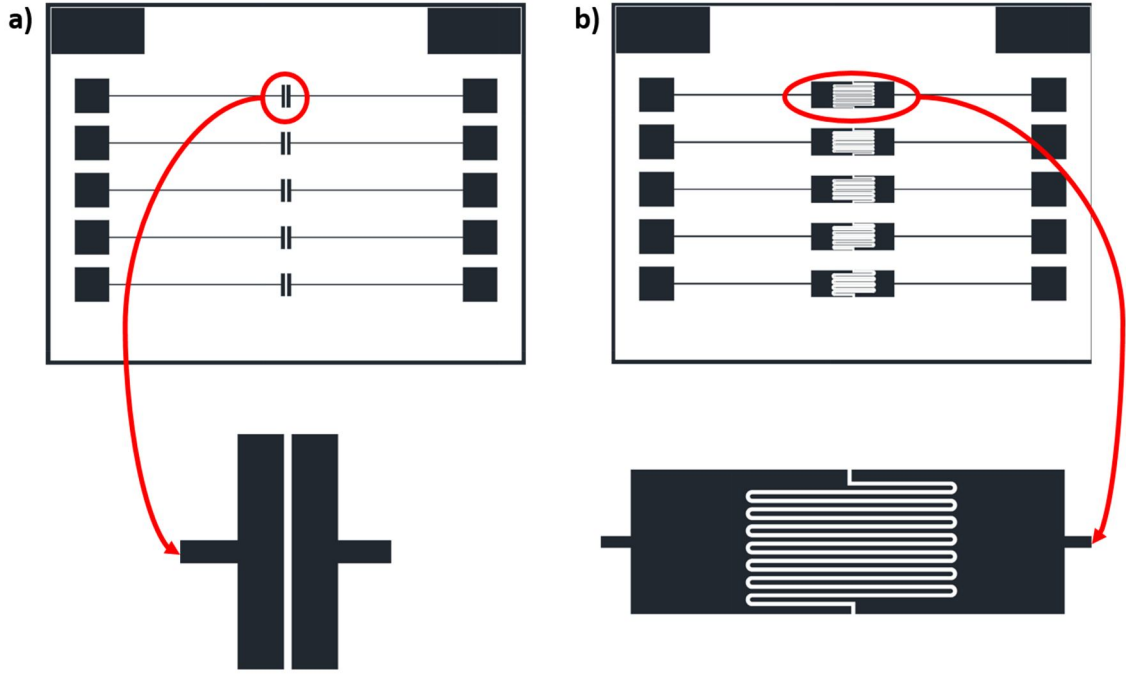
Altın kazıma çözeltilisinin hazırlanması

Altın ve iyot, çözücü ortamında bir araya geldiği zaman altın iyodürü oluşturur. Bu kapsamda $KI : I_2 : H_2O = 4g : 1g : 40ml$ oranları ile hazırlanan çözelti altın kazıma işlemlerinde kullanılmıştır. Karış içerisinde bulunan potasyum iyodür (KI), altın ve iyot reaksiyonu sonucu oluşan altın iyodür molekülünün çözünürlüğünü artırması amacıyla çözeltiliye eklenmiştir.

3.3.2.2. Silikon altlık üzerinde OFET hazırlanması

Silikon altlıklar kullanılmadan önce ultra sonik banyo içerisinde sırasıyla aseton, izopropil alkol ve ultra saf su içine daldırılarak onar dakika boyunca temizlenmiştir.

Bir önceki kalibrasyon adımlarında yapıldığı gibi silikon altlık üzerine altın ve fotorezist kaplanmış ve 90°C'de bir dakika boyunca ısıtılmıştır. 15x20 mm² boyutlarındaki silikon altlık üzerine maskesiz fotolitografi yöntemi kullanılarak akaç-kaynak elektrotları desenlemek amacıyla arzu edilen desenler önceden bir bilgisayar yazılımı yardımıyla çizilmiştir. Altıklardan biri fotolitografi cihazının işlem sehpasına yerleştirildikten sonra Şekil 3.11 (a)'da (düzlemsel OFET) ve (b)'de (iç içe geçmiş OFET) gösterilen desenler cihaza tanımlanmıştır. Desen yüzeye işlendikten sonra yüzey developer çözücü içerisinde 45 saniye boyunca yıkanmış ve fotorezistin kalanının yüzeye iyice yapışması amacıyla 110°C'de bir dakika boyunca ısıtılmıştır. Bir dakika sonunda yüzey ısıtııcıdan kaldırılarak soğuması beklenmiştir.



Şekil 3.11. Lineer (a) ve iç içe geçmiş (b) OFET geometrileri.

Bir sonraki adımda yüzey altın kazıma çözeltilisine daldırılarak 20 saniye süre ile bekletilmiştir. Bu işlem sonucunda desenlenmiş fotorezist dışında kalan altın yüzeyden kalkarak desenlenmiş ve kaynak-akaç elektrotlarının şeklini almıştır. Altın kazıma çözeltilisinden çıkarılan yüzey ultra saf su ile iyice yıkandıktan sonra kurutulmuştur. Yüzeyde kalan fotorezistin kaldırılması amacıyla yüzey, aseton ile yıkanmış ve tekrar kurutulmuştur. Böylece altlık üzerinde kaynak-akaç elektrotlarının desenlenmesi tamamlanmıştır.

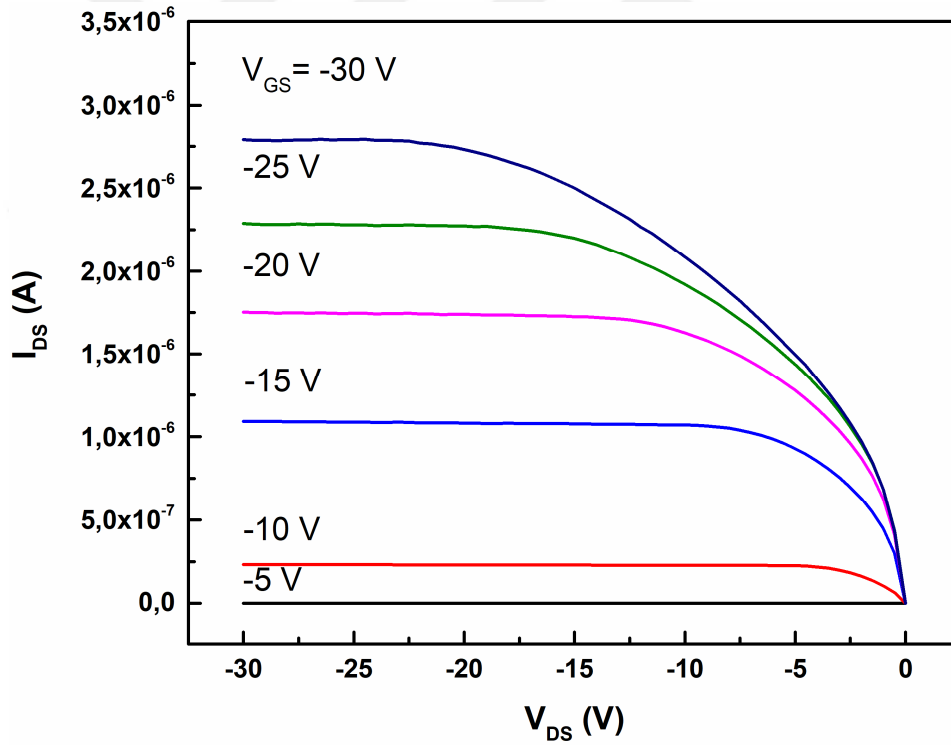
Hazırlanan yüzeyler 10 dakika boyunca UV-ozon temizleme işlemine maruz bırakılmıştır. Önceden hazırlanmış ve yeterince karıştırılmış olan C8-BTBT çözeltisi kullanılarak, döngüsel kaplama yöntemi ile yüzeye aktif tabaka 3000RPM/dakika hızla kaplanmıştır. Aktif tabakanın kaplanması ile tamamlanan üretim işlemleri sonucu elde edilen OFET'ler ölçüm için glovebox sistemi içerisine aktarılmıştır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Çalışma kapsamında düzlemsel ve iç içe geçmiş olmak üzere iki farklı temel geometride OFET'ler üretilmiştir. Aynı zamanda her bir geometri için farklı kanal uzunluğuna ve genişliğine sahip OFET'ler de üretilerek performanslarındaki değişim araştırılmış, sonuçlar aşağıda verilmiştir.

4.1. İki Farklı Temel Geometriye Sahip OFET Performanslarının Karşılaştırılması

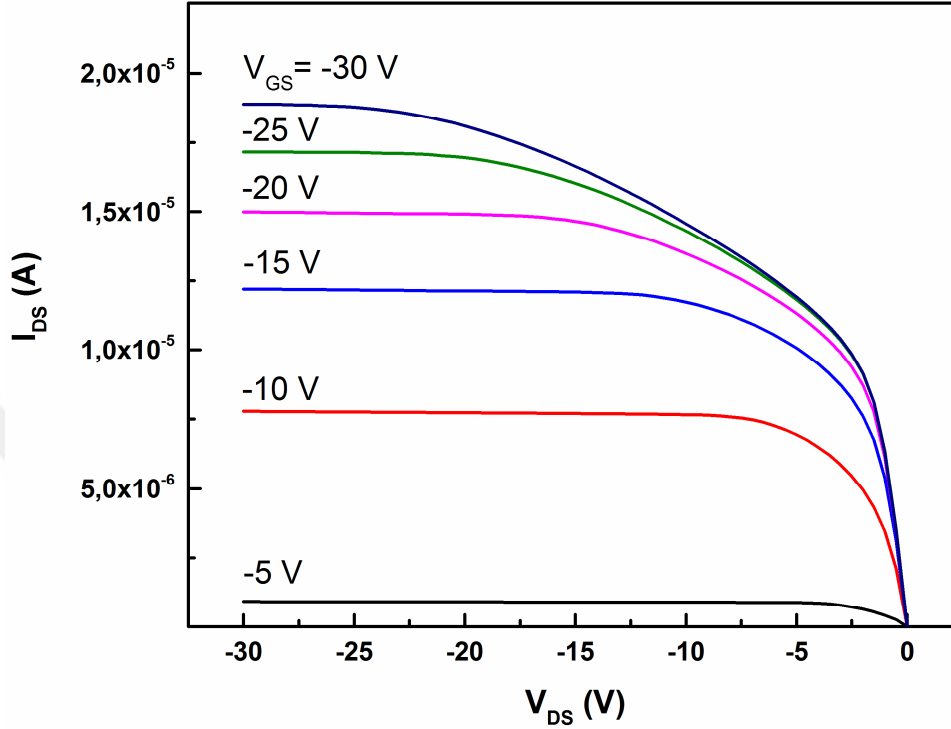
Şekil 3.11 (a)'da gösterilen düzlemsel geometriye sahip OFET, I-V karakterizasyonu yapılması amacıyla Keithley 2634B sistemine bağlanmış ve ölçüm tamamlanmıştır. Şekil 4.1'de düzlemsel geometriye sahip OFET'in çıkış karakteristikleri verilmiştir.



Şekil 4.1. Düzlemsel geometriye sahip OFET'in çıkış karakteristikleri.

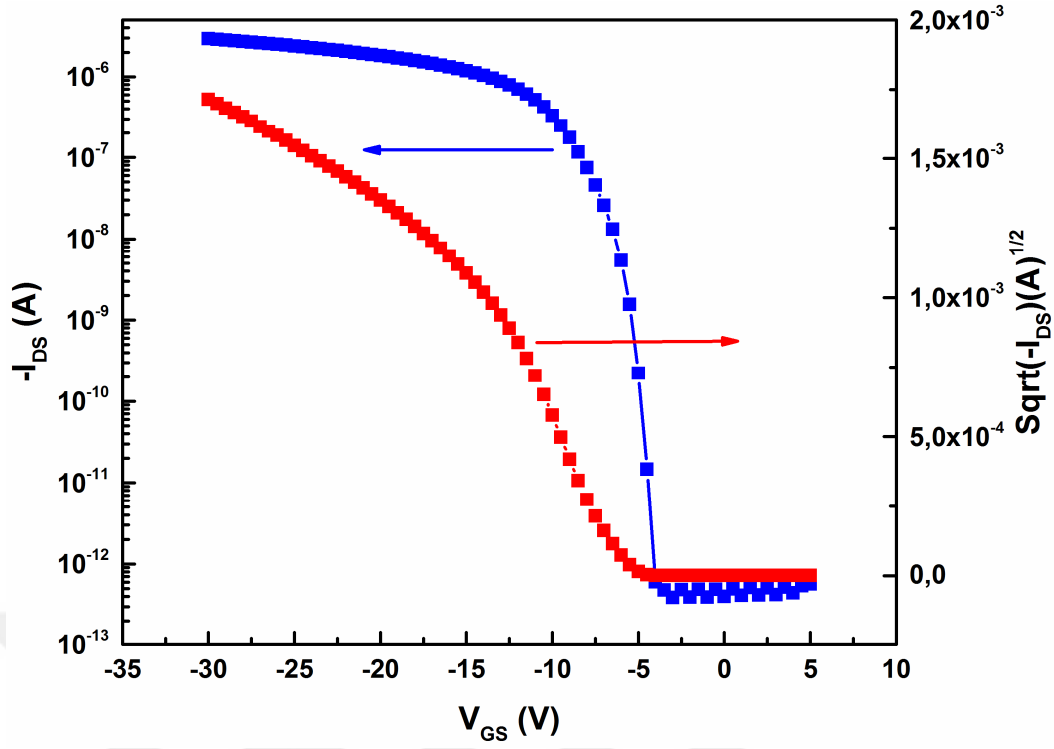
Aynı şekilde elektriksel ölçümleri tamamlanan iç içe geçmiş geometriye sahip olan OFET'in çıkış karakteristikleri Şekil 4.2'de verilmiştir. Grafiklerde görüleceği gibi iki farklı geometriye sahip OFET'lerin çalıştığı kapı elektrotu geriliminde büyük bir değişme gözlemlenmemiştir. İç içe geçmiş OFET -5V'luk kapı geriliminde doyuma ulaşırken düzlemsel OFET henüz doyuma ulaşmamış olmasıdır. Fakat -5,6V'luk eşik

değer gerilimi aşıldıktan sonra uygulanan tüm farklı kapı gerilimi değerlerinde kararlı bir şekilde doyuma ulaştığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda iç içe geçmiş geometriye sahip OFET kanal üzerinde daha yüksek akım değerlerini iletmiştir.

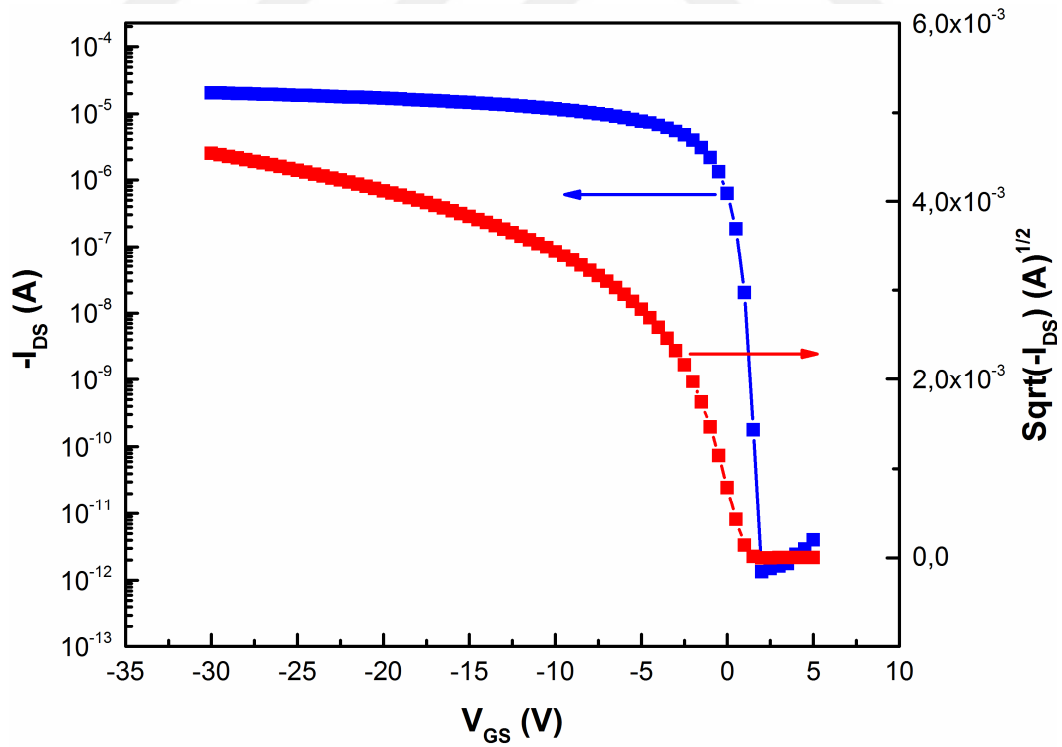


Şekil 4.2. İç içe geçmiş geometriye sahip transistörün çıkış karakteristikleri.

Şekil 4.3'te düzlemsel ve Şekil 4.4'te iç içe geçmiş geometrilere sahip OFET'lerin transfer karakteristikleri ve Tablo 4.1'de her iki OFET için karakteristik verilmiştir. Transfer grafiklerinde ve tablodaki hesaplanan değerler incelendiğinde geometrisinden dolayı W/L oranı büyüyen iç içe geçmiş transistörün daha yüksek mobilite, daha düşük eşik değer gerilimi ve daha yüksek açma/kapama oranı ortaya koyduğu gözlemlenmiştir. 1,3V'luk eşik değer gerilimine sahip olan iç içe geçmiş OFET, uygulanan tüm kapı gerilimi değerlerinde kararlı bir şekilde doyuma ulaşmıştır.



Şekil 4.3. Düzlemsel geometriye sahip OFET'in transfer karakteristikleri.

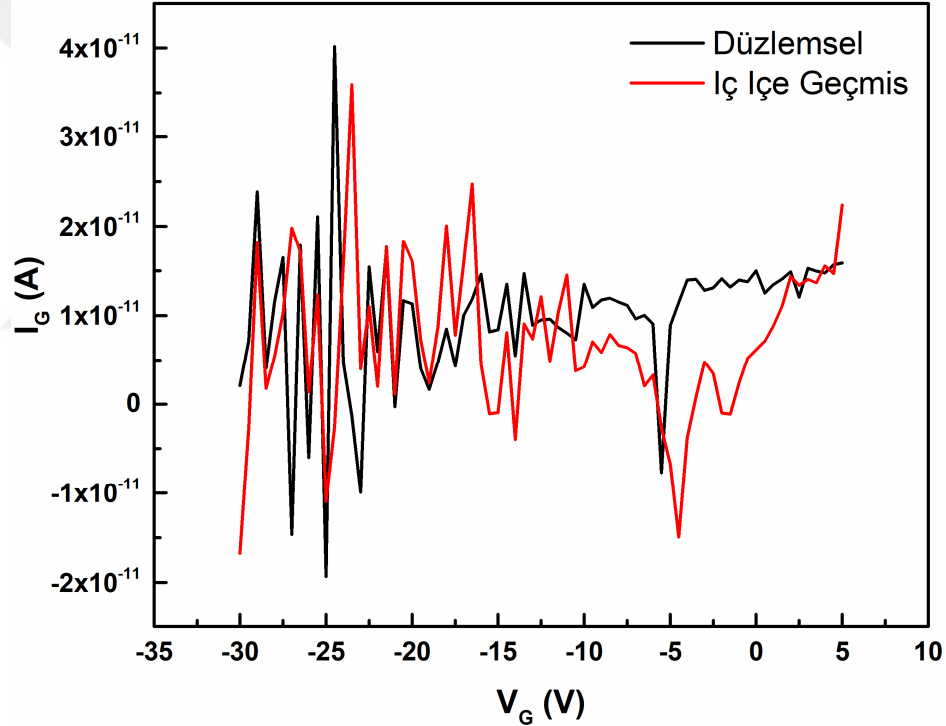


Şekil 4.4. İç içe geçmiş geometriye sahip OFET'in transfer karakteristikleri.

	Düzlemsel Geometri	İç İçe Geçmiş Geometri
Mobilite ($\text{cm}^2\text{v}^{-1}\text{s}^{-1}$)	$8,7 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-1}$
On/Off	$7,53 \times 10^6$	$1,54 \times 10^7$
V_{TH} (V)	-5,66	1,32

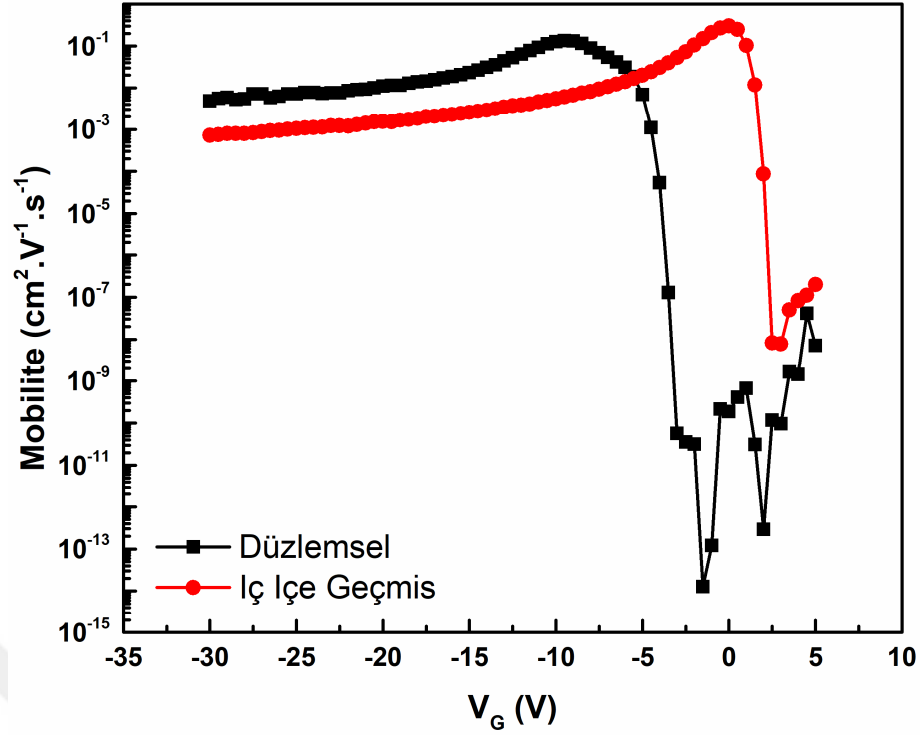
Tablo 4.1. Düzlemsel ve iç içe geçmiş OFET'lerin karakteristik özelliklerinin karşılaştırması.

Şekil 4.5'te düzlemsel ve iç içe geçmiş kaynak-akaç elektrotlarına sahip bu iki OFET'in kapı gerilimlerine karşılık kapı elektrotundan geçen akım (I_G) değerleri gösterilmiştir. I_G değerlerinin her iki transistör için çok düşük ve kararsız olması OFET'lerin kaçak akıma sahip olmadığını ve performanslarının kaçak akım tarafından etkilenmediğini göstermiştir.



Şekil 4.5. Düzlemsel ve iç içe geçmiş elektrotlara sahip OFET'ler için V_G 'ye karşılık I_G kaçak akım grafikleri.

Üretilen düzlemsel ve iç içe geçmiş elektrotlara sahip OFET'lerin değişen kapı gerilimlerine karşılık mobilitelerinin nasıl değiştiğini gösteren grafik Şekil 4.6'da verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi düzlemsel OFET'de daha az olması ile birlikte, değişen kapı gerilimine karşılık mobilite çok az değişmiştir. Bu da üretilen OFET'lerin mobilitelerinin kapı geriliminden oldukça bağımsız olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.6. Düzlemsel ve iç içe geçmiş OFET'ler için kapı gerilimine karşılık mobilitenin değişimi.

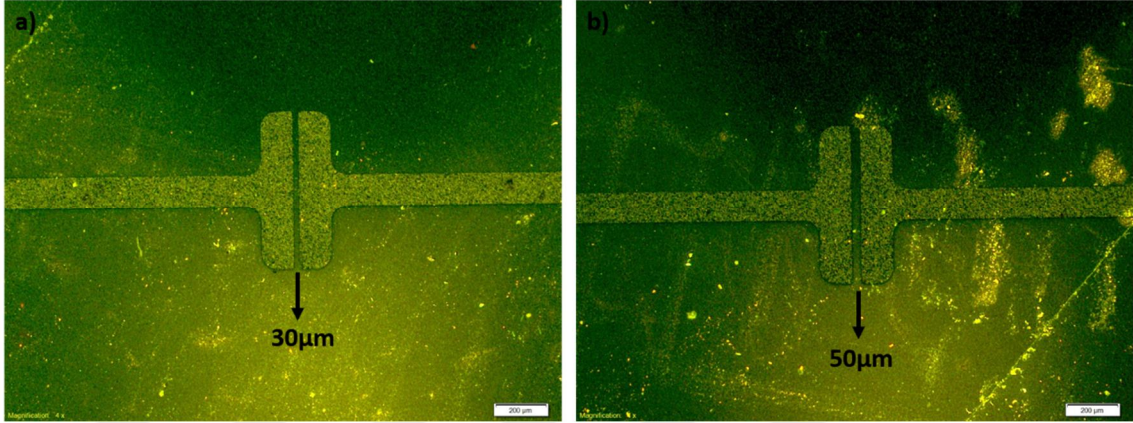
4.2. Temel Geometrileri Aynı Kanal Geometrileri Farklı OFET'lerin Performanslarının Karşılaştırılması

Çalışmanın bir önceki bölümlerinde iki farklı geometrinin OFET performansı üzerindeki etkisi ortaya koyulmuştur. Çalışma kapsamında temel geometrileri farklı transistörlerin performanslarının karşılaştırılması dışında, temel geometrileri aynı fakat kanal uzunlukları ve genişlikleri farklı OFET'lerin performansları da karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmanın yapılması amacıyla her iki geometriden, 30 μ m ve 50 μ m kanal uzunluğuna sahip OFET'ler üretilmiş ve elektriksel karakterizasyonları yapılmıştır.

4.2.1. Düzlemsel Geometriye Sahip OFET'lerin Performanslarının Karşılaştırılması

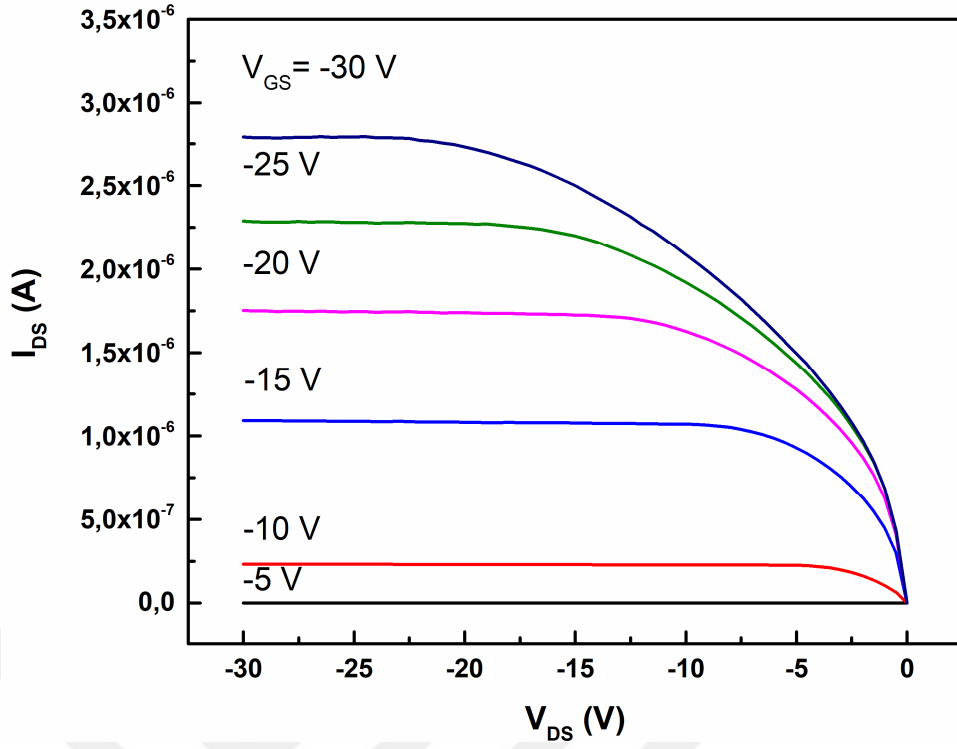
Aynı şartlarda üretilen ve aynı temel geometriye sahip fakat farklı kanal uzunluğu ve genişliği değerlerine sahip OFET'lerin performansları karşılaştırılarak çalışma ilerletilmiştir. Düzlemsel geometriye sahip 30 μ m ve 50 μ m kanal uzunluğuna sahip OFET'ler maskesiz fotolitografi yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen iki OFET aynı silikon altlık üzerinde üretilmiştir. Dolayısıyla fotolitografik işlemlerden, döngüsel kaplama ya da fiziksel buhar biriktirme yönteminden kaynaklanabilecek olan farklılıklar ortadan

kaldırılmıştır. Her iki OFET de ortak kapı elektrotuna sahiptir. Üretilen OFET'lerin aktif tabakaları kaplanmadan önce alınan optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.7'te verilmiştir. Fotolitografi ile üretilen bu elektrotların kanal uzunluk ve genişlik değerleri optik mikroskop ile de ölçülerek teyit edilmiştir.

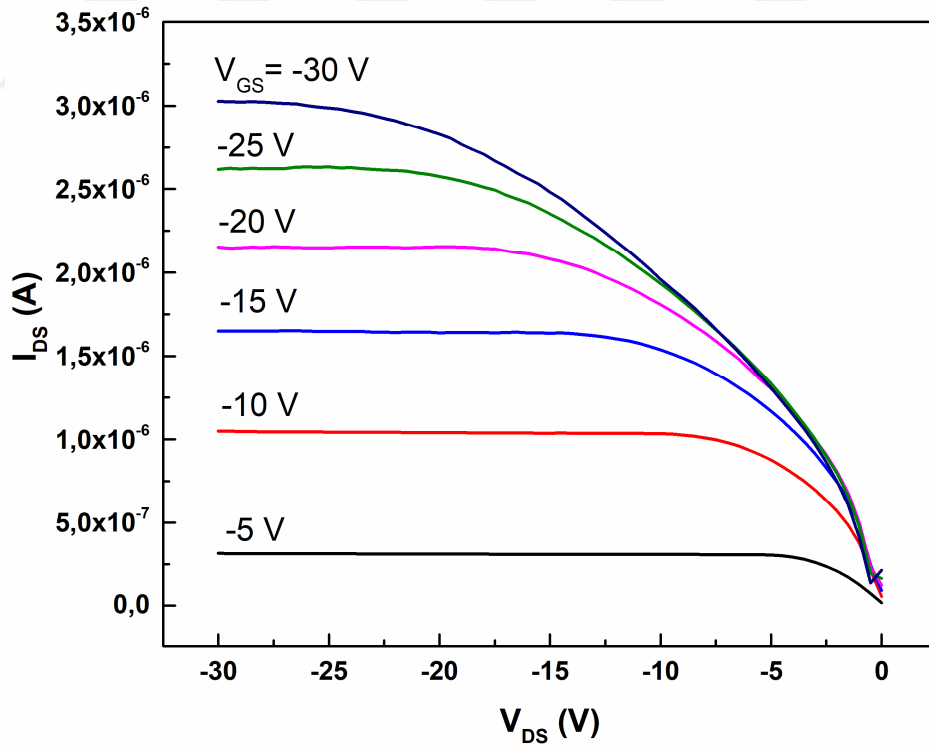


Şekil 4.7. Desenlenen düzlemsel elektrotların optik mikroskop görüntüleri, (a) 30µm, (b) 50µm.

Üretilen OFET'ler glovebox sistemi içerisine alındıktan sonra elektriksel olarak karakterize edilmeleri amacıyla Keithley 2634B cihazına bağlanmıştır. Bu bağlamda elde edilen çıkış karakteristikleri 30µm kanal uzunluğuna sahip OFET için Şekil 4.8'de, 50µm kanal uzunluğuna sahip OFET içinse Şekil 4.9'da verilmiştir. I-V grafiklerinden de görüleceği gibi 30µm kanal uzunluğuna sahip OFET henüz 5V'luk kapı gerilimi değerinde iletme geçmemişken, 50µm kanal uzunluğuna sahip OFET iletme geçmiştir. Aynı zamanda kanal uzunluğu daha fazla olan OFET'in, kanal uzunluğu kısa olan OFET'e göre daha yüksek I_{DS} değerlerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Her iki OFET de kararlı bir şekilde tüm kapı gerilimi değerlerinde doyuma ulaşırken kanal uzunluğu artan OFET'in bir miktar daha yüksek V_{DS} değerlerinde doyuma ulaştığı gözlemlenmiştir.



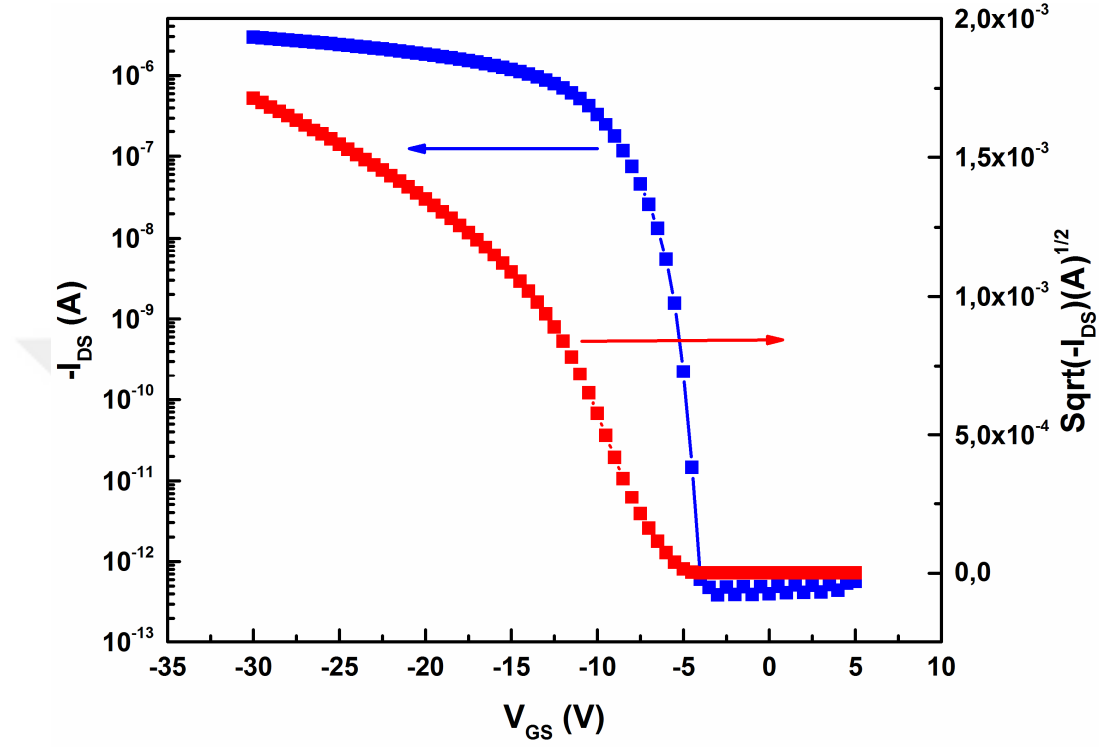
Şekil 4.8. 30µm kanal uzunluğuna sahip düzlemsel OFET'in çıkış karakteristikleri.



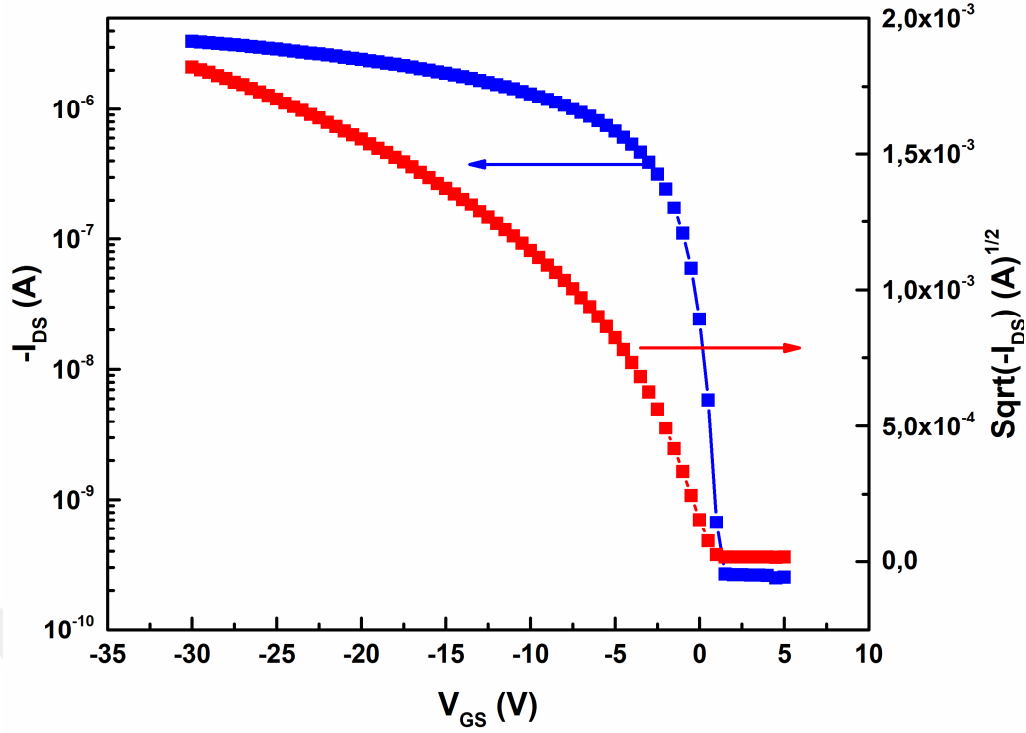
Şekil 4.9. 50µm kanal uzunluğuna sahip düzlemsel OFET'in çıkış karakteristikleri.

Üretilen düzlemsel OFET'lerin transfer karakteristikleri Şekil 4.10 (30µm) ve Şekil 4.11 (50µm)'da verilmiştir. 30µm kanal uzunluğuna sahip OFET'in eşik değeri

gerilimi $-5,6\text{V}$ iken $50\mu\text{m}$ kanal uzunluğuna sahip OFET'in eşik değer gerilimi $1,1\text{V}$ olarak gözlemlenmiştir, dolayısıyla kanal uzunluğunun artmasıyla OFET'in daha erken ilettime geçtiği sonucuna varılmıştır. OFET karakteristiklerinin verildiği Tablo 4.2'de görüldüğü gibi kanal uzunluğunun artması ile mobilite değerinde artış gözlemlenmiştir.



Şekil 4.10. $30\mu\text{m}$ kanal uzunluğuna sahip düzlemsel OFET'in transfer karakteristikleri.

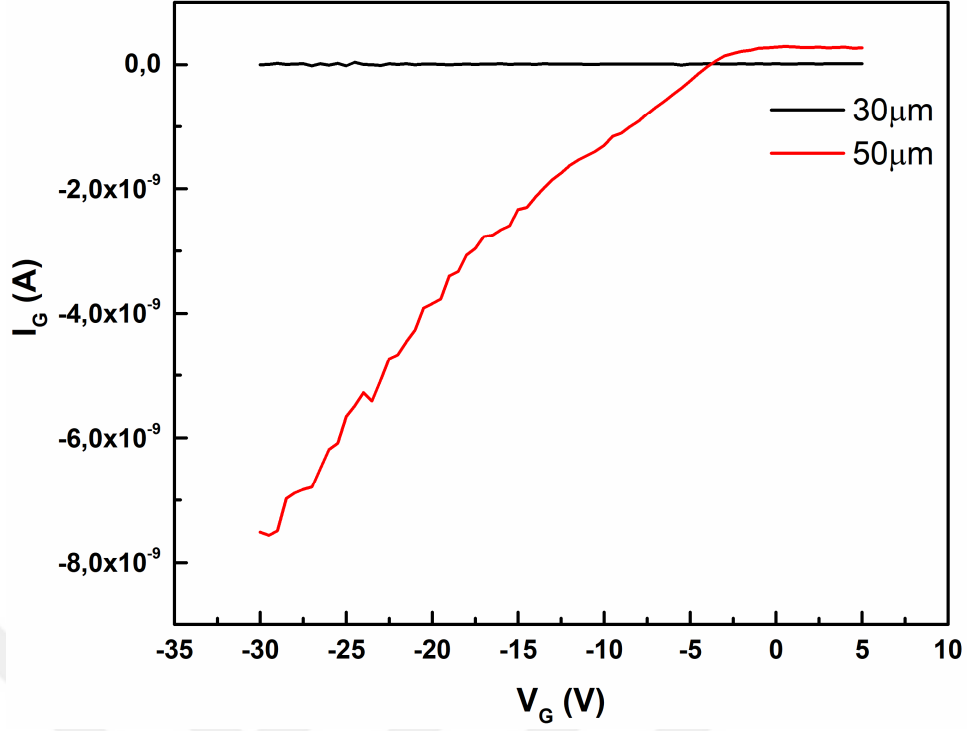


Şekil 4.11. 50µm kanal uzunluğuna sahip düzlemsel OFET'in transfer karakteristikleri.

	OFET (L=30µm)	OFET (L=50µm)
Mobilite ($\text{cm}^2\text{v}^{-1}\text{s}^{-1}$)	$8,7 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-1}$
On/Off	$7,53 \times 10^6$	$1,33 \times 10^4$
V_{TH} (V)	-5,6	1,1

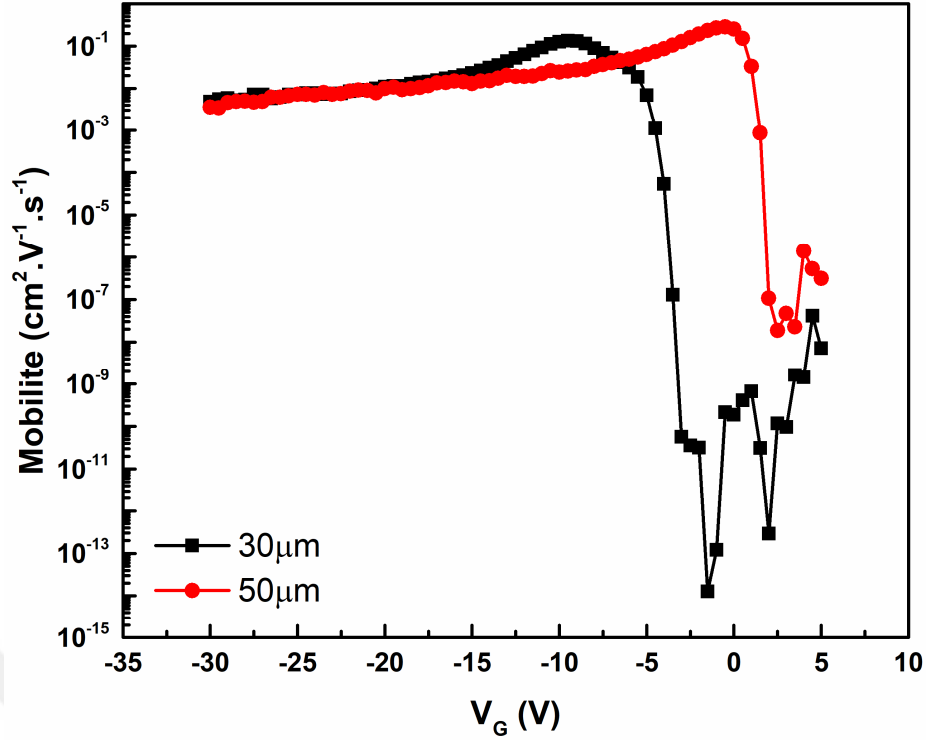
Tablo 4.2. Kanal uzunlukları ve genişlikleri farklı düzlemsel OFET'lerin karakteristik özellikleri.

Şekil 4.12'de 30µm ve 50µm kanal uzunluğuna sahip düzlemsel OFET'ler için kapı gerilimine karşılık kapı elektrotundan geçen akımın karşılaştırma grafiği verilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere 30µm kanal uzunluğuna sahip OFET'de kapı elektrotundan sızan kaçak akım bulunmamaktadır. Kanal uzunluğu 50µm olan OFET'de ise kaçak akım gözlenmiştir.



Şekil 4.12. $30\mu\text{m}$ ve $50\mu\text{m}$ kanal uzunluğuna sahip düzlemsel OFET'ler için V_G 'ye karşılık I_G kaçak akım grafikleri.

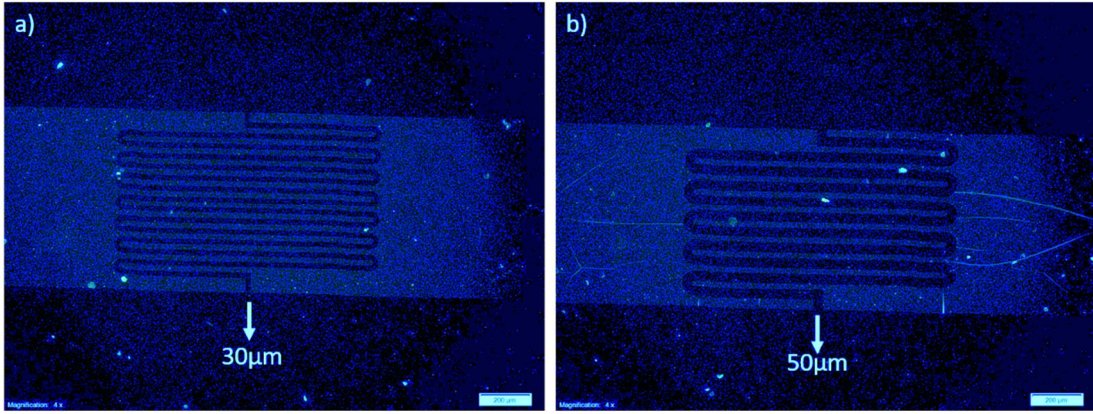
Kapı gerilimine karşılık mobilitenin nasıl değiştiğini gösteren grafik, $30\mu\text{m}$ ve $50\mu\text{m}$ kanal uzunluklarına sahip OFET'ler için Şekil 4.13'te verilmiştir. Her iki OFET için de kapı gerilimine karşılık mobilite değerinde büyük bir düşüş gözlemlenmemektedir. Bu grafik ile hesaplanan mobilite değerinin kapı geriliminden bağımsız olduğu görülmektedir.



Şekil 4.13. 30µm ve 50µm kanal uzunluğuna sahip düzlemsel OFET'ler için kapı gerilimine karşılık mobilitenin değişimi.

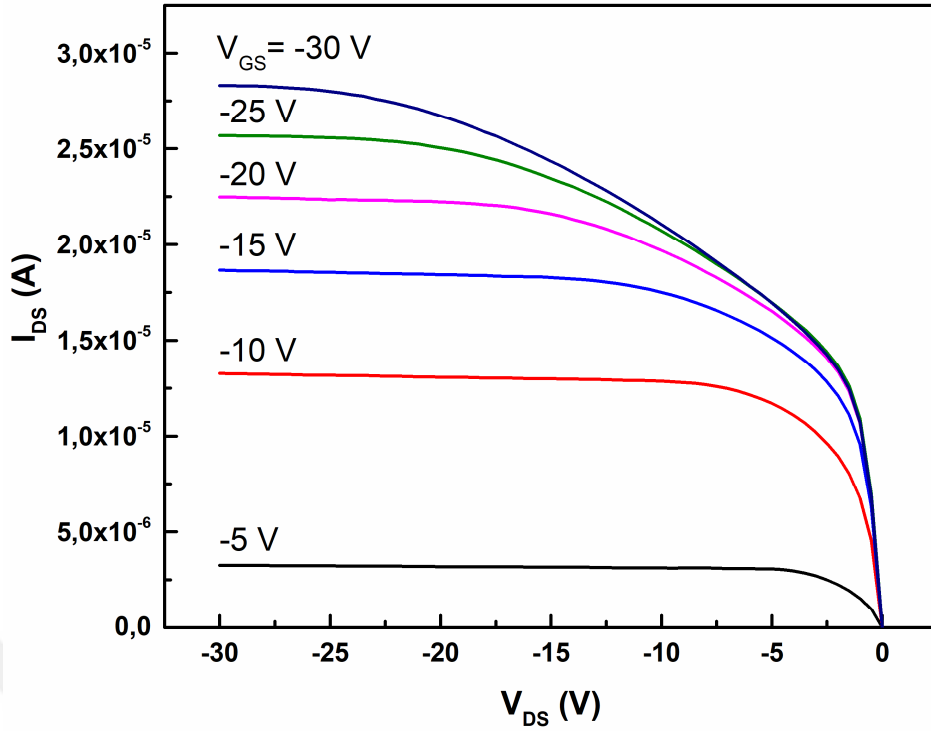
4.2.2. İç İçe Geçmiş Geometriye Sahip OFET'lerin Performanslarının Karşılaştırılması

Düzlemsel geometriye sahip OFET'lerde olduğu gibi 30µm ve 50µm kanal uzunluğuna sahip iç içe geçmiş geometriye sahip OFET'ler üretilmiştir. Üretilen bu OFET'ler yine aynı silikon altık üzerinde desenlenmiş elektrotlara sahip ve aynı kapı elektrotunu paylaşmaktadırlar. Düzlemsel OFET'lerde olduğu gibi bu şekilde üretim sırasında kullanılan tekniklerden ve kapı elektrotundan kaynaklanabilecek farklılıklar ortadan kaldırılmış ve performanstaki değişimler olabildiğince kanal uzunluğuna ve genişliğinden sürececek şekilde ayarlanmıştır. Maskesiz fotolitografi tekniği ile desenlenerek üretilen bu elektrotların optik mikroskop görüntüsü Şekil 4.14'te (30µm (a), 50µm (b)) gösterildiği gibidir. Yapılan inceleme ile maskesiz fotolitografi tekniği ile desenlenen elektrotlar arasında kalan aktif alanın (kanal) uzunluğu ve genişliği doğrulanmıştır.

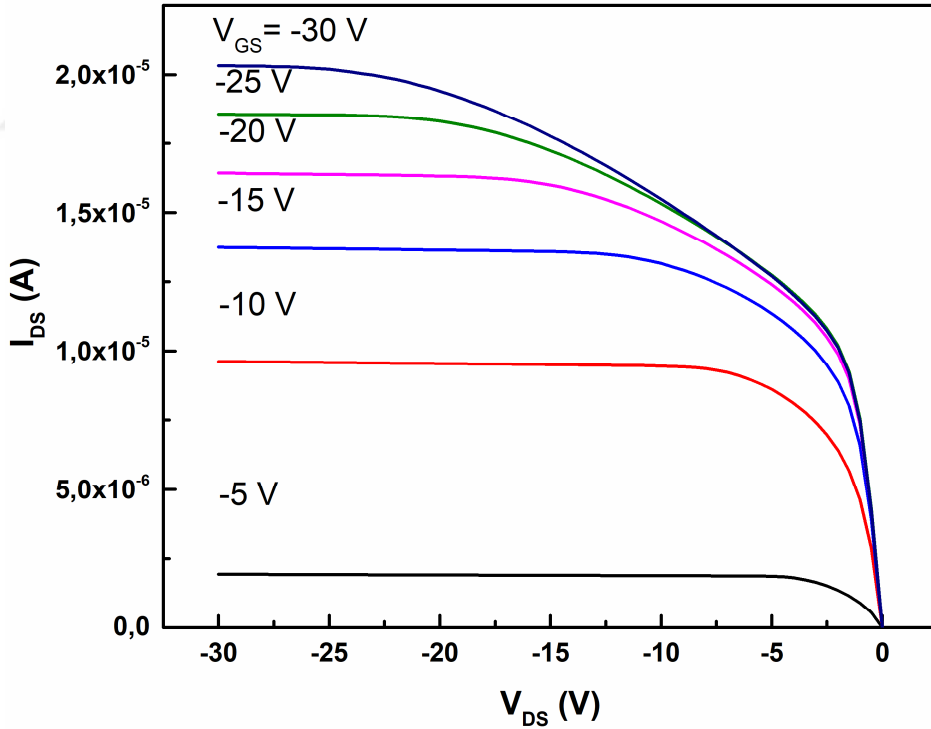


Şekil 4.14. Desenlenen iç içe geçmiş elektrotların optik mikroskop görüntüleri, (a) 30 μ m, (b) 50 μ m.

Üretilen iç içe geçmiş elektrotlara sahip OFET'ler glovebox sistemi içine alınarak elektriksel ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen çıkış karakteristikleri 30 μ m kanal uzunluğuna sahip OFET için Şekil 4.15'te, 50 μ m kanal uzunluğuna sahip OFET içinse Şekil 4.16'da verilmiştir. Düzlemsel geometriye sahip olan OFET'lerde kanal uzunluğuna bağlı değişimin aksine, iç içe geçmiş geometriye sahip olan OFET'lerde kanal uzunluğu arttıkça I_{DS} değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. Farklı kanal uzunluğuna sahip bu iki OFET'in çıkış karakteristiklerinde kararlı bir şekilde doyuma ulaştıkları görülmektedir.



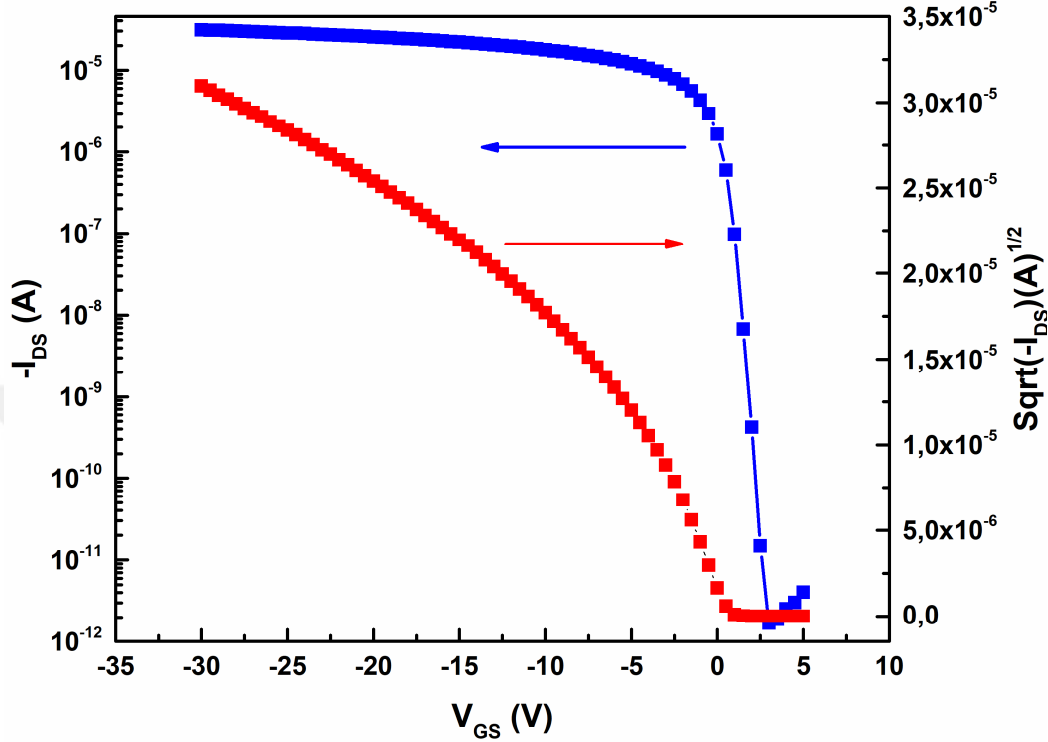
Şekil 4.15. 30µm kanal uzunluğuna sahip iç içe geçmiş OFET'in çıkış karakteristikleri.



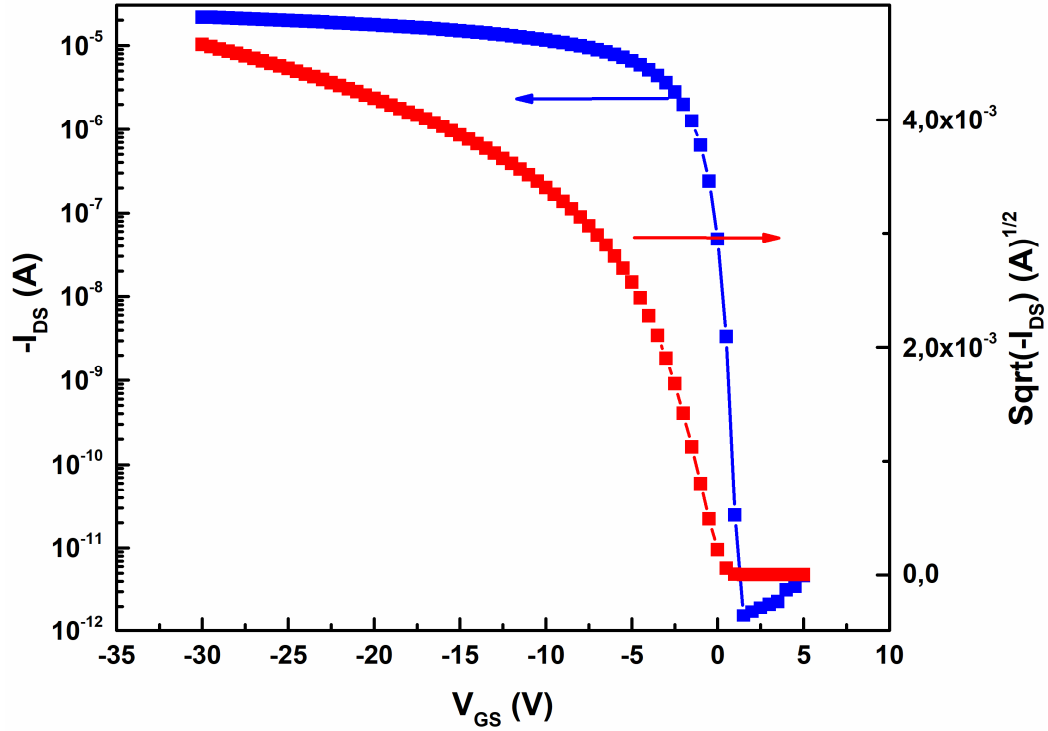
Şekil 4.16. 50µm kanal uzunluğuna sahip iç içe geçmiş OFET'in çıkış karakteristikleri.

Üretilen iç içe geçmiş kaynak-akaç elektrotlarına sahip OFET'lerin transfer karakteristikleri Şekil 4.17 (30µm kanal uzunluğu) ve Şekil 4.18'de (50µm kanal uzunluğu) verilmiştir. 30µm ve 50µm kanal uzunluğuna sahip bu OFET'ler için eşik

değer gerilimleri sırasıyla 1,65V ve 0,5V olarak hesaplanmıştır. İç içe geçmiş elektrot geometrisine sahip OFET'ler için hesaplanan karakteristik özellikler Tablo 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.17. 30µm kanal uzunluğuna sahip iç içe geçmiş OFET'in transfer karakteristikleri.

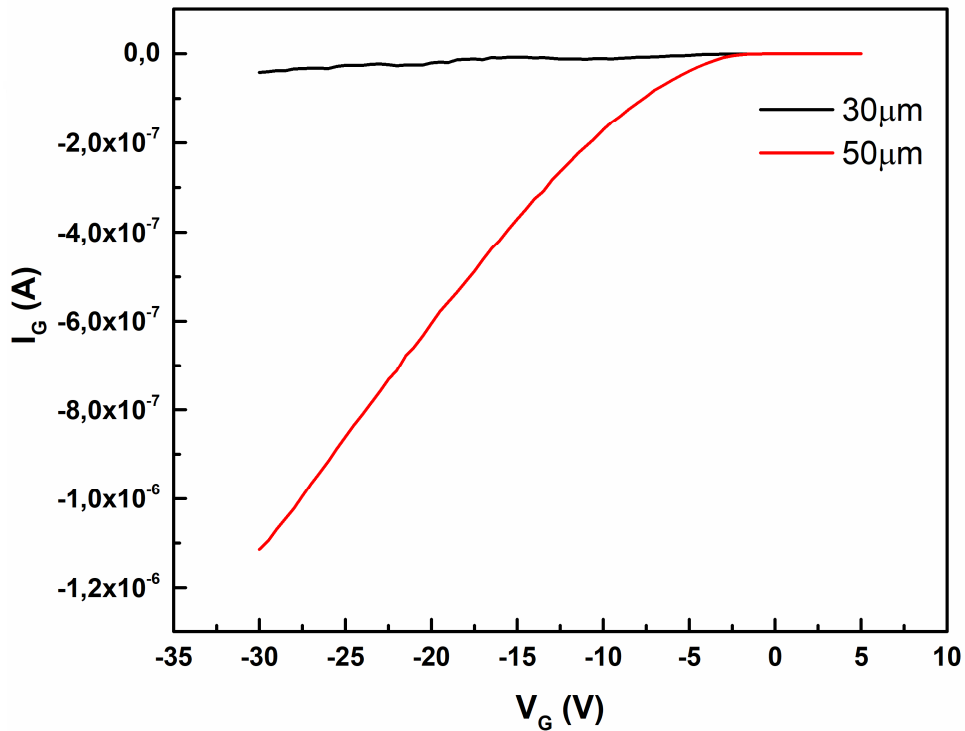


Şekil 4.18. 50µm kanal uzunluğuna sahip iç içe geçmiş OFET'in transfer karakteristikleri.

	OFET (W=30 μ m)	OFET (W=50 μ m)
Mobilite (cm ² v ⁻¹ s ⁻¹)	1,13x10 ⁻¹	1,25x10 ⁻¹
On/Off	1,84x10 ⁷	1,41x10 ⁷
V _{TH} (V)	1,6	0,5

Tablo 4.3. Kanal uzunlukları ve genişlikleri farklı iç içe geçmiş OFET'lerin karakteristik özellikleri.

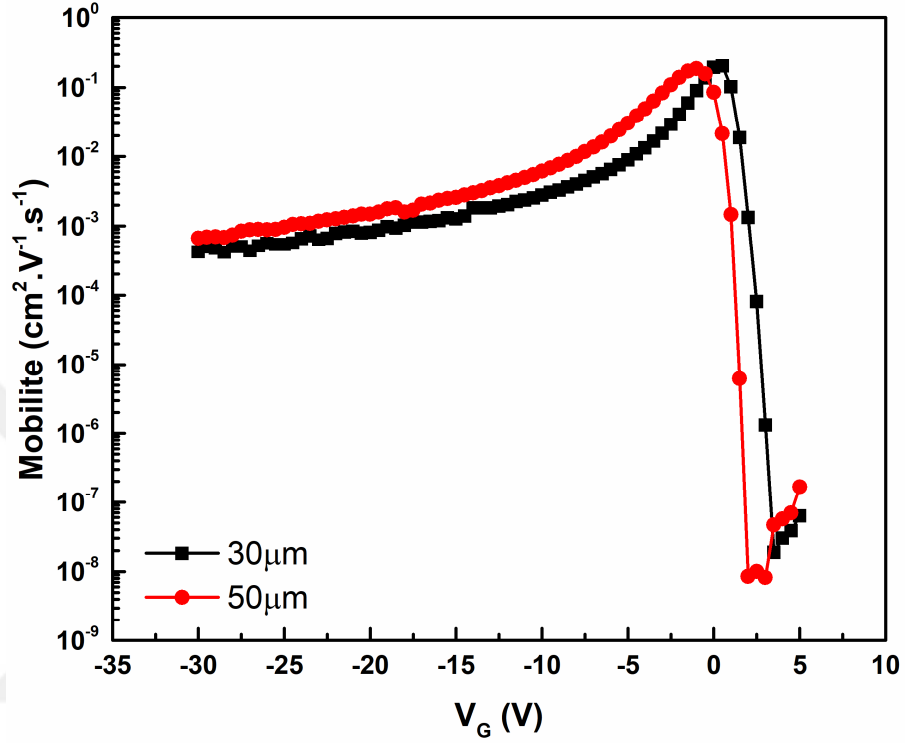
Tablo 4.3'te görüldüğü gibi iç içe geçmiş elektrot geometrilerine sahip OFET'lerde kanal uzunluğunun ve genişliğinin değişmesi çok büyük farklılıklara yol açmamıştır. Şekil 4.19'da 30 μ m ve 50 μ m kanal uzunluğuna sahip iç içe geçmiş OFET'ler için kapı gerilimine karşılık kapı elektrotundan geçen akım grafiği verilmiştir. Görüldüğü gibi 30 μ m kanal uzunluğuna sahip OFET'de kaçak akıma rastlanmamışken kanal uzunluğu 50 μ m'ye çıkarıldığında kaçak akım gözlenmiştir.



Şekil 4.19. 30 μ m ve 50 μ m kanal uzunluğuna sahip iç içe geçmiş OFET'ler için V_G 'ye karşılık I_G kaçak akım grafikleri.

Şekil 4.20'de iç içe geçmiş elektrotlara sahip OFET'ler için kapı gerilimine karşılık mobilitedeki değişimi gösteren grafik verilmiştir. Düzlemsel elektrotlara sahip

OFET'lere göre kapı geriliminin artmasıyla mobilite değerindeki düşüş bir miktar daha fazladır. Bu durum, tez çalışması kapsamında üretilen iç içe geçmiş elektrotlara sahip OFET'lerin mobilite değerinin, düzlemsel OFET'lere kıyasla bir miktar kapı elektrotundan etkilendiği gözlemlenmektedir.



Şekil 4.20. 30µm ve 50µm kanal uzunluğuna sahip iç içe geçmiş OFET'ler için kapı gerilimine karşılık mobilitenin değişimi.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Düzlemsel ve iç içe geçmiş olmak üzere iki farklı temel geometriye ve her bir temel geometri için farklı kanal uzunluğuna ve genişliğine sahip OFET'ler üretilmiştir. Üretim aşamasında oldukça ucuz, kolay ve umut vaat eden sonuçlar elde etmeye olanak sağlayan bir yöntem olan maskesiz fotolitografi yöntemi ile kaynak-akaç elektrotları desenlenerek elde edilmiştir. Farklı OFET geometrilerinin, OFET performansı üzerindeki etkisi ve aynı geometriye sahip fakat farklı kanal uzunluğu ve genişliği ile üretilen OFET'lerin performansları değerlendirilerek karşılaştırılmıştır.

Düzlemsel geometriye sahip OFET'lerin iç içe geçmiş OFET'lere göre daha düşük yük transfer karakteristiklerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu da bu çalışma kapsamında üretilen iç içe geçmiş OFET'lerin, düzlemsel OFET'lere göre daha performanslı çalıştığını göstermiştir. Bu çalışma ile OFET geometrisinin OFET performansı üzerindeki etkisi olduğu ve uygun geometriler tasarlanarak OFET performanslarının arttırılabileceği gösterilmiştir.

Aynı temel geometriye sahip fakat farklı kanal uzunluğuna ve genişliğine sahip olan OFET'ler, birbirleri arasında diğer temel geometriye göre performanslarındaki değişimin kendilerine has olduğu gözlemlenmiştir.

5.2 Öneriler

İnce film transistörler günümüzde birçok önemli alanda kullanılmaktadır. Günümüzün vazgeçilmez teknolojilerinden olan işlemciler, ekran teknolojileri ve bunun gibi birçok elektronik cihazların olmazsa olmazı haline gelmiş olan transistörler, ülkemizin hem araştırma hem de üretim alanında üzerine eğilmesi gereken konulardan biri haline gelmiştir. Ülkemizin kendi ekran ve işlemci gibi önemli teknolojilerini üretebilmesi için ülkemiz sınırları içerisinde bu alanda daha çok araştırma yapılması gerekmektedir.

Bu alanda yapılacak olan araştırmalar sırasında, üretim tekniği olarak maskesiz fotolitografi yöntemi kullanılabilir. Bu teknik ile herhangi bir maskeye ihtiyaç duymadan arzu edilen tüm geometrilere ince film transistör üretilebilmektedir. Ayrıca yine bu teknik kullanılarak, ileride yapılacak olan çalışmalarda ince film transistörler, ışık yayan

diyotlar ile entegre edilerek ülkemizin ihtiyaç duyduğu ekran teknolojilerine yönelik çalışmalar yapılabilir. Aynı zamanda entegre devre üretimine de olanak sağlayan bu yöntem, entegre devre üretimini bir hayli kolaylaştırdığı gibi, maliyeti de oldukça düşürmektedir. Dolayısıyla yapılacak çalışmalarda entegre devre üretimi için maskesiz fotolitografi tekniği kullanılabilir. Bu teknik ile daha önce çalışılmamış ve OFET performansını olumlu yönde etkileyeceği öngörülen geometrilere sahip kaynak-akaç elektrotları üretilerek OFET performansları geliştirilebilir.

Maskesiz fotolitografi yöntemi ile OFET üretimi sırasında organik yarıiletken, bu teknikte kullanılan çözücüler tarafından zarar gördüğünden sadece alt kapı-alt kontak yapıdaki ince film transistörler üretilmektedir. Organik yarıiletkenin kaynak-akaç elektrotları altında olduğu yapıya sahip ince film transistörlerin genelde daha iyi çalıştığı bilinmektedir. Yapılacak çalışmalarda maskesiz fotolitografi yöntemi ile organik yarıiletkenin kaynak-akaç elektrotlarının altında olduğu yapıdaki ince film transistörlerin üretilmesi adına yöntemler geliştirilebilir. Böylece fotolitografi yöntemi ile desenlenen elektrotlar, yarıiletkeni tamamen kapsamış ve performans artırılmış olur.

KAYNAKLAR

- Austin, M. D. ve Chou, S. Y., 2002, Fabrication of 70 nm channel length polymer organic thin-film transistors using nanoimprint lithography, *Applied Physics Letters*, 81 (23), 4431-4433.
- Brabec, C. J., Sariciftci, N. S. ve Hummelen, J. C., 2001, Plastic solar cells, *Advanced Functional Materials*, 11 (1), 15-26.
- Chen, S. Y., Ho, P. H., Shiue, R. J., Chen, C. W. ve Wang, W. H., 2012, Transport/Magnetotransport of High-Performance Graphene Transistors on Organic Molecule-Functionalized Substrates, *Nano Letters*, 12 (2), 964-969.
- Chen, Y. ve Shih, I. A., 2009, Scaling down of organic thin film transistors: short channel effects and channel length-dependent field effect mobility, *Journal of Materials Science*, 44 (1), 280-284.
- Cheng, W. D., Wu, Z. H., Wen, S. P., Xu, B., Li, H., Zhu, F. R. ve Tian, W. J., 2013, Donor-acceptor copolymers incorporating polybenzo [1,2-b:4,5-b'] dithiophene and tetrazine for high open circuit voltage polymer solar cells, *Organic Electronics*, 14 (9), 2124-2131.
- Facchetti, A., Yoon, M. H. ve Marks, T. J., 2005, Gate dielectrics for organic field-effect transistors: New opportunities for organic electronics, *Advanced Materials*, 17 (14), 1705-1725.
- Fleischli, F. D., Sidler, K., Schaer, M., Savu, V., Brugger, J. ve Zuppiroli, L., 2011, The effects of channel length and film microstructure on the performance of pentacene transistors, *Organic Electronics*, 12 (2), 336-340.
- Gök, H., 2015, Organik Alan Etkili Transistörlerin Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans, *Yıldız Teknik Üniversitesi*, 43.
- Hasegawa, T. ve Takeya, J., 2009, Organic field-effect transistors using single crystals, *Science and Technology of Advanced Materials*, 10 (2).
- Hoppe, A., Balster, T., Muck, T. ve Wagner, V., 2008, Scaling limits and MHz operation in thiophene-based field-effect transistors, *Physica Status Solidi a-Applications and Materials Science*, 205 (3), 612-625.
- Horowitz, G., 2004, Organic thin film transistors: From theory to real devices, *Journal of Materials Research*, 19 (7), 1946-1962.
- Kara, K., 2012, Yeni Makromoleküller ile Katkılanmış p-Tipi Organik Alan Etkili Transistörlerin Elektriksel Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi*, İzmir, 10-11.
- Kawase, T., Shimoda, T., Newsome, C., Siringhaus, H. ve Friend, R. H., 2003, Inkjet printing of polymer thin film transistors, *Thin Solid Films*, 438, 279-287.
- Klauk, H., 2012, Organic Electronics II: More Materials and Applications, Wiley, p. 90-91.
- Lee, H., Yoo, G., Yoo, J. S. ve Kanicki, J., 2009, Asymmetric electrical properties of fork a-Si:H thin-film transistor and its application to flat panel displays, *Journal of Applied Physics*, 105 (12).
- Lee, H., Liu, C. H. ve Kanicki, J., 2011, Asymmetric Electrical Properties of Half Corbino Hydrogenated Amorphous Silicon Thin-Film Transistor and Its Applications to Flat Panel Displays, *Japanese Journal of Applied Physics*, 50 (7).
- Lilienfeld, J. E., 1930, Method and Apparatus For Controlling Electric Currents. Office, U. S. P.
- Malliaras, G. ve Friend, R., 2005, An organic electronics primer, *Physics Today*, 58 (5), 53-58.

- Mitschke, U. ve Bauerle, P., 2000, The electroluminescence of organic materials, *Journal of Materials Chemistry*, 10 (7), 1471-1507.
- Newman, C. R., Frisbie, C. D., da Silva, D. A., Bredas, J. L., Ewbank, P. C. ve Mann, K. R., 2004, Introduction to organic thin film transistors and design of n-channel organic semiconductors, *Chemistry of Materials*, 16 (23), 4436-4451.
- Peumans, P., Uchida, S. ve Forrest, S. R., 2003, Efficient bulk heterojunction photovoltaic cells using small-molecular-weight organic thin films, *Nature*, 425 (6954), 158-162.
- Riordan, M., Hoddeson, L. ve Herring, C., 1999, The invention of the transistor, *Reviews of Modern Physics*, 71 (2), S336-S345.
- Scott, J. C. ve Bozano, L. D., 2007, Nonvolatile memory elements based on organic materials, *Advanced Materials*, 19 (11), 1452-1463.
- Shekar, B. C., Lee, J. Y. ve Rhee, S. W., 2004, Organic thin film transistors: Materials, process and devices, *Korean Journal of Chemical Engineering*, 21 (1), 267-285.
- Singh, T. B. ve Sariciftci, N. S., 2006, Progress in plastic electronics devices, *Annual Review of Materials Research*, 36, 199-230.
- Sirringhaus, H., Tessler, N. ve Friend, R. H., 1998, Integrated optoelectronic devices based on conjugated polymers, *Science*, 280 (5370), 1741-1744.
- Sohn, C. W., Rim, T. U., Choi, G. B. ve Jeong, Y. H., 2010, Analysis of Contact Effects in Inverted-Staggered Organic Thin-Film Transistors Based on Anisotropic Conduction, *Ieee Transactions on Electron Devices*, 57 (5), 986-994.
- Sze, S. M., 1998, Physics of Semiconductor Devices, *Newyork*, Wiley, p. 190-191.
- Tozlu, C., 2010, Yeni Perilen ve Naftalen Türevi Organik Yarıiletkenlerin Alan Etkili Transistör Uygulamalarında Karakteristik Özelliklerinin Analizi, Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi*, İzmir, 10-11.
- Tseng, R. J., Huang, J. X., Ouyang, J., Kaner, R. B. ve Yang, Y., 2005, Polyaniline nanofiber/gold nanoparticle nonvolatile memory, *Nano Letters*, 5 (6), 1077-1080.
- Wikipedia, 2017, Lithography, <https://en.wikipedia.org/wiki/Lithography>: [15.02.2017].
- Yun, H., Kim, S., Kim, H., Lee, J., McAllister, K., Kim, J., Pyo, S., Kim, J. S., Campbell, E. E. B., Lee, W. H. ve Lee, S. W., 2015, Stencil Nano Lithography Based on a Nanoscale Polymer Shadow Mask: Towards Organic Nanoelectronics, *Scientific Reports*, 5.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Bilal İstanbullu
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Kadıköy / 26.07.1992
Telefon : +905369118408
Faks :
e-mail : bilalistanbullu@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Mehmet Rauf Lisesi, Ataşehir, İstanbul	2010
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi, Fen Fak. Kimya Bölümü, Konya	2014
Yüksek Lisans	: Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Nanoteknoloji ve İleri Malzemeler ABD.	2017
Doktora	: -	-

UZMANLIK ALANI: İnce film transistörler, Fotolitografi, Güneş Enerjisi, Yenilenebilir Enerji

YABANCI DİLLER: İngilizce

YAYINLAR

Uluslararası Dergilerde Basılan Yayınlar

Faruk Ozel, Emre Aslan, Bilal İstanbullu, Ozge Akay, Imren Hatay Patir, “Photocatalytic hydrogen evolution based on Cu₂ZnSnS₄, Cu₂NiSnS₄ and Cu₂CoSnS₄ nanocrystals”, Applied Catalysis B:Environmental, 2016, 198, 67-73, DOI: 10.1016/j.apcatb.2016.05.053

Faruk Ozel, Adem Sarılmaz, Bilal İstanbullu, Abdalaziz Aljabour, Mahmut Kus, Savas Sonmezoglu, “Penternary chalcogenides nanocrystals as catalytic materials for efficient counter electrodes in dye-synthesized solar cells”, Sci. Rep., 2016, 6, 29207, DOI: 10.1038/srep29207

Uluslararası Kongrelerde Sunulan Bildiriler

Bilal İstanbullu, Mamatimin Abbas, Mahmut Kus, “Comparative Study On Patterned Electrode Organic Field Effect Transistors”, Poster, E-MRS 2017 Spring Meeting, Strasbourg-France, May 2017 (Tez Çalışmasından).

Bilal Istanbulu, Tugbahan Yılmaz Alic, Mahmut Kus, “Comparative Study On The Fabrication Of Organic Field Effect Transistors”, Poster, COST Action MP1407: Electrochemical processing methodologies and corrosion protection for device and systems miniaturization, Stockholm-Sweden, April 2016.

Adem Sarilmaz, Bilal Istanbulu, Erdi Akman, Mahir Gülen, Mahmut Kus, Faruk Ozel, Savas Sonmezoglu, “Synthesis of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ and $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ Nanorods by Colloidal Method and Applications as Counter Electrodes in Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC)”, Poster, E-MRS 2015 Spring Meeting, Lille-France, May 12-14.

Faruk Ozel, Bilal Istanbulu, Abdalaziz Aljabour, Savas Sonmezoglu, Mahmut Kus, “Solution Processable Chalcositibite (CuSbS_2) Nanocrystals for Inkjet Printed Devices”, Poster, E-MRS 2015 Spring Meeting, Lille-France, May 12-14.

