



T.C.  
EGE ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü



# TRANSPARAN İNCE FİLM TRANSİSTÖRLERDE KULLANILAN KANAL YARIİLETKENİNİN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Doktora Tezi

Özkan KURAN

Fizik Anabilim Dalı

İzmir  
2022

T.C.  
EGE ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü

**TRANSPARAN İNCE FİLM TRANSİSTÖRLERDE  
KULLANILAN KANAL YARIİLETKENİNİN  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Özkan KURAN

Danışman: Doç. Dr. İlbeyi AVCI

Fizik Anabilim Dalı  
Matematiksel Fizik Doktora Programı

İzmir  
2022



Özkan Kuran tarafından doktora tezi olarak sunulan “**Transparan İnce Film Transistörlerde Kullanılan Kanal Yarıiletkeninin Özelliklerinin İncelenmesi**” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve **26.12.2022** tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği ile başarılı bulunmuştur.

**Jüri Üyeleri:**

**İmza**

<b>Jüri Başkanı</b>	<b>: Doç. Dr. İlbeyi AVCI</b>	.....
<b>Raportör Üye</b>	<b>: Doç. Dr. Metin BİLGE</b>	.....
<b>Üye</b>	<b>: Prof. Dr. Canan Varlıklı</b>	.....
<b>Üye</b>	<b>: Doç. Dr. Mustafa ŞEN</b>	.....
<b>Üye</b>	<b>: Doç. Dr. Gökhan UTLU</b>	.....



**EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ****ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum “**Transparan İnce Film Transistörlerde Kullanılan Kanal Yarıiletkeninin Özelliklerinin İncelenmesi**” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

26 / 12 / 2022

Özkan KURAN



**ÖZET****TRANSPARAN İNCE FİLM TRANSİSTÖRLERDE KULLANILAN  
KANAL YARIİLETKENİNİN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

KURAN, Özkur

Doktora Tezi, Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. İlbeyi AVCI

Aralık 2022, 105 sayfa

Bu tez çalışması kapsamında transparan ince film transistörlerde (TFT) kullanılan yeni nesil yarıiletken malzemelerden İndiyum Galyum Çinko Oksit (IGZO) ince filmlerin elektriksel ve optik özelliklerinin RF magnetron püskürtme parametrelerine (RF güç, Ar basıncı) bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Filmlerin elektronik parametrelerinden elektron Hall mobilitesi, yük taşıyıcı konsantrasyonu ve özdirencinin TFT performansına olan etkisine bakılmıştır. Ayrıca cam üzerine kaplanan bu filmlerin optik geçirgenlikleri incelenmiştir. Bu amaçla RF magnetron sputter ile bir dizi IGZO ince film üretilmiş ve ardından bu filmlerle ince film transistörler yapılmış ve test edilmiştir.

Bu çalışmalar süresince ince filmlerin üretim parametrelerinin optimizasyonu, çok katmanlı yapıya sahip TFT'lerin üretim süreçlerinin geliştirilmesi, test amaçlı transistörlerin tasarımı ve litografik süreçlerin optimize edilmesi işlemleri yapılmıştır. Bu çalışmalar neticesinde standart cam altlıklar üzerine tümüyle transparan yapıda, ITO/SiO<sub>x</sub>/ITO/IGZO ince film katmanlarından oluşan ve tümüyle oda sıcaklığında yapılan TFT'ler geliştirilmiş ve sonuçlar tartışılmıştır.

**Anahtar sözcükler:** İnce Film Transistör, Yarıiletken, Mikrofabrikasyon



**ABSTRACT****INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF CHANNEL SEMICONDUCTOR USED IN THE TRANSPARENT THIN FILM TRANSISTORS**

KURAN, Özkur

PhD in Physics Department

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İlbeyi AVCI

December 2022, 105 pages

In this PhD thesis, electrical and optical properties of next generation amorphous oxide semiconductor used in transparent thin film transistors (TFT) such as Indium Gallium Zinc Oxide (IGZO) thin film produced with RF magnetron sputtering were investigated depending on the sputtering parameters such as RF power and Ar Pressure. The effect of electrical parameters such as electron Hall mobility, charge carrier concentration and resistivity on TFT performance was analyzed. The optical transmittance analyses were also done on the films deposited onto the ordinary glass substrates. For this reason, a series of thin films samples was produced by the RF magnetron sputter and tested.

During the whole research, the parameter optimization for thin film deposition, multilayer device processing including microlithography for TFT fabrication and establishment of the test setup for electronic measurements were carried out. As a result, a full transparent and high performance IGZO TFT containing ITO/SiO<sub>x</sub>/ITO/IGZO structure was fabricated at room temperature, and the findings conducted with the device were discussed throughout the thesis inside.

**Keywords:** Thin Film Transistor, Semiconductor, Microfabrication.



## ÖNSÖZ

Yarıiletken malzemeler ve bu malzemelerle yapılan elektronik aygıtların özellikleri ve aygıt performansları ile ilgili araştırmalar fizik, malzeme bilimi ve elektronik mühendisliği alanlarının en kapsamlı güncel konularının başında gelmektedir. Özellikle son yıllarda geliştirilmekte olan yeni nesil ekranlar ve bu ekranlarda kullanılan ince film transistör teknolojisi üzerine yapılan araştırmalar hem katı hal fiziğinin hem de bu alandaki endüstrinin gelişmesine yön vermektedir. Yakın zamana kadar kullanılan Si tabanlı TFT teknolojisi yeni nesil ekranların ihtiyaç duyduğu yüksek çözünürlük, hızlı ekran yenileme ve bunların gerektirdiği elektronik parametre değerlerini karşılayamaz duruma gelmiştir. Buna alternatif olarak yeni nesil yarıiletken malzemelerin kullanımı bir zorunluluk olarak ortaya çıkmış ve bu araştırmalar neticesinde amorf oksit yarıiletken malzemelerin kullanımına geçilmiştir. Bu malzemeler içerisinde hem performans hem de üretim stabilitesi bakımından IGZO öne çıkmış ve bu malzeme üzerine araştırmalar yoğunlaşmıştır. Bu tez çalışması kapsamında da IGZO yarıiletken ince filmler ve bu filmlerle tamamen transparan yapıda TFT aygıtların üretimi ve testleri ile ilişkili çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların tamamı (RF/DC magnetron sputter ile ince film üretimi, mikrofabrikasyon, litografi vb. ile aygıtların elektronik ve optik testleri ve AFM ile morfolojik analizler) Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümünde bulunan Kuantum Aygıt Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların yürütülebilmesi için gerekli olan yapı ve olanaklar 112T075, 114F165 ve 121F139 nolu TÜBİTAK proje destekleri ile sağlanmıştır.

İZMİR

26.12.2022

Özkur KURAN



**İÇİNDEKİLER**

	<u>Sayfa</u>
İÇ KAPAK .....	(ii)
KABUL ONAY SAYFASI .....	(iii)
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI.....	(v)
ÖZET .....	(vii)
ABSTRACT .....	(ix)
ÖNSÖZ.....	(xi)
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	(xiii)
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	(xvi)
TABLolar DİZİNİ.....	(xvii)
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	(xxvi)
1. GİRİŞ.....	1
2. İNCE FİLM TRANSİSTÖR.....	3
2.1 TFT'lerin Çalışma Prensibi .....	5
2.2 İnce Film Transistörlerin Çalışma Bölgeleri .....	7
2.2.1 Lineer bölge .....	7
2.2.2 Saturasyon bölgesi .....	8
2.3 İnce Film Transistörlerin Parametreleri.....	9
2.3.1 Eşik voltajı.....	9
2.3.2 Mobilite.....	11

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<u>Sayfa</u>
2.3.3 Transconductance .....	13
2.3.4 On/Off oranı.....	14
2.3.5 Sızıntı akımları.....	14
3. KARAKTERİZASYON .....	17
3.1 Elektriksel Karakterizasyon.....	21
3.1.1 Kelvin (4-Wire, 4-Point) ölçüm metodu.....	21
3.1.2 Van der Pauw ölçümü.....	25
3.1.3 TFT ölçümü .....	27
3.2 Optik Karakterizasyon .....	30
3.3 Yapısal Karakterizasyon.....	32
3.3.1 Yüzey yapısının optik mikroskop ile incelenmesi.....	32
3.3.2 Yüzey yapısının atomik kuvvet mikroskobu ile incelenmesi .....	33
4. MİKROFABRİKASYON.....	34
4.1 İnce Film Kaplama .....	34
4.2 Litografi .....	35
4.3 Aşındırma ve Kaldırma.....	40
5. DENEY TARTIŞMA .....	44
5.1 Yazılımın Geliştirilmesi.....	44
5.2 İnce Filmlerin Üretilmesi.....	51
5.2.1 IGZO kanal yarıiletkeninin üretilmesi.....	54

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<u>Sayfa</u>
5.2.2 Drain-Source ve Gate elektrodu'nun üretilmesi .....	62
5.2.3 Gate yalıtkanının üretilmesi.....	69
5.3 Çok Katmanlı Yapının Üretilmesi .....	72
5.3.1 Kimyasal aşındırma .....	79
5.3.2 Kuru aşındırma .....	82
5.4 İnce Film Transistörlerin Üretilmesi .....	83
5.5 Test ve Analizlerin Yapılması .....	88
6. SONUÇ.....	99
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	100
TEŞEKKÜR .....	103
ÖZGEÇMİŞ.....	105

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. İnce Film Transistörlerin Yapısı (a) MOSFET (b) TFT.....	3
Şekil 2.2. Yaygın olarak kullanılan 4 farklı TFT yapısı (a) staggerd bottom gate (b) coplanar bottom-gate (c) staggered top-gate ve (d) coplanar top-gate.....	4
Şekil 2.3. MOS yapısının potansiyel fark altındaki enerji bant durumu (a) MOS yapısının yandan kesiti, (b) denge durumundayken, (c) biriktirme durumundayken ( $V_{GS} > 0$ V), ve (d) boşaltım durumundayken ( $V_{GS} < 0$ V).....	6
Şekil 2.4. n-kanal transistörün biriktirme durumundayken bağlantı şeması (a) eşik durumu öncesi (b) eşik durumu sonrası.....	6
Şekil 2.5. Lineer bölge ( $V_{GS} < V_T$ ).....	7
Şekil 2.6. Saturasyon bölgesi $V_{gs} > V_t$ .....	9
Şekil 2.7. Lineer iz düşüm metodunun grafik üzerindeki gösterimi ( a. Ortiz-Conde et al. 2002).....	10
Şekil 2.8. gm-Vgs grafiğine göre $V_t$ değerinin bulunması (A. Ortiz-Conde et al. 2013).....	11
Şekil 2.9. Etkin mobilitenin daha yüksek olduğu durumlarda $V_{gs}$ voltajına bağlıdır (Kagan and Andry, 2003).....	13
Şekil 2.10. $V_{gs}$ voltajının $I_d$ akımına etkisini gösteren grafik(Wong et al., 1987)	13
Şekil 2.11 On/Off Oranının $I_{ds} - V_{gs}$ grafiği üzerinden belirlenmesi.....	14
Şekil 2.12 $V_{gs} < V_t$ durumunda enerji bant durumu ve kapasitans.....	15
Şekil 2.13 $V_{ds}=0$ iken $\log(I_d(V_{gs}))$ grafiği.....	15
Şekil 3.1 Yüksek tekrarlanabilirlik, düşük doğruluk.....	17

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.3 Ölçüm çözünürlüğü(Ni. com, 2022).....	19
Şekil 3.4 Hz'lik bir sinyalin farklı örnekleme sayıları ile gösterimi (Ni.com, 2022) .....	20
Şekil 3.5 Çözünürlük ve örnekleme arasındaki ilişki (Ni.com, 2022).....	20
Şekil 3.6 2-Nokta ve 4-Nokta metodu ile direnç ölçümü (Schroder, 2006).....	21
Şekil 3.7 4-Nokta probe gösterimi (Schroder 2006).....	22
Şekil 3.8. Köşelerden ve yanlardan kontak alınan örnekler için C düzeltme faktörü farkı (Versnel, 1978).....	23
Şekil 3.9. Rastgele yerlerden alınmış 4 nokta kontak (Schroder 2006).....	24
Şekil 3.10. Simetrik örneklerde 4-Nokta metot gösterimi (Schroder 2006).....	24
Şekil 3.11 Van der Pauw ölçümü için bir tasarım .....	25
Şekil 3.12 Hall etkisi ölçümü gösterimi .....	26
Şekil 3.13 TFT Bağlantı Şeması.....	28
Şekil 3.14 Tez çalışmasında üretilen bir TFT'nin farklı gate gerilimleri altındaki $V_{DS}$ - $I_{DS}$ grafiği .....	29
Şekil 3.15 $V_{DS}= 12$ V gerilim altında Logaritmik $V_{GS}$ - $I_{DS}$ grafiği .....	29
Şekil 3.16 Tarama sırasında pulse uygulanan ve uygulanmayan transistörün $I_D$ - $V_{DS}$ grafiği (Keysight, 2018).....	30
Şekil 3.17 Üzerine ışık düşen bir örnekte gerçekleşebilecek optik olaylar .....	31
Şekil 3.18 Optik karakterizasyon diyagramı .....	32

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.2. İyon ile yüzey arasındaki etkileşimler (Colligon, 1984) .....	35
Şekil 4.3 Spin coater (döndürerek kaplama) işlemi ile fotorezist kaplama .....	37
Şekil 4.4 İnce film üzerine fotorezist kaplanması sonrası durum.....	37
Şekil 4.5 Fotorezistin üreticinin belirttiği sıcaklıkta ısıtılarak sertleştirilmesi .....	37
Şekil 4.6 İstenilen desene ait maske fotorezist üzerine yerleştirilir.....	38
Şekil 4.7 Fotorezistin duyarlı olduğu dalga boyunda UV ışığa maskeye dik olarak verilir.....	38
Şekil 4.8 UV gören ve görmeyen kısımların birbirinden ayrılmasını kolaylaştıran pozlama sonrası ısıtma.....	38
Şekil 4.9 UV ışığa görmüş fotorezistin "developer" isimli çözüme daldırılarak yok edilmesi işlemi .....	39
Şekil 4.10 Fotorezistin aşındırma işlemi sırasında kalkmaması için son bir ısıtma işlemi uygulanır .....	39
Şekil 4.11 AZ6600 serisinin fiziksel ve kimyasal özellikleri. Bu veriler MicroChemicals firmasından alınmıştır.(Microchemicals, 2022).....	39
Şekil 4.12 AZ6600 serisinin döndürerek kaplama yöntemiyle elde edilen kalınlıkları verilmiştir. Bu veriler MicroChemicals firmasından alınmıştır(Microchemicals, 2022).....	39
Şekil 4.13 Pozlama, ısıtma ve "developer" uygulama prosedürü. Bu veriler MicroChemicals firmasından alınmıştır.(Microchemicals, 2022).....	40
Şekil 4.14 Fotolitografi işlemi sonrası film üzerine işlenmek istenen fotorezist deseni .....	40

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.15 Film yüzeyinin belirli bir kısmı fotorezist tarafından korunurken, geri kalan kısmı asit içerisinde çözünür.....	41
Şekil 4.16 Fotorezistin film yüzeyinden kaldırılması.....	41
Şekil 4.17 Fotorezist üzerine ince film kaplaması.....	42
Şekil 4.18. Stripper ile fotorezistin kaldırılması işlemi .....	42
Şekil 4.19 İyon tabancası ile biriktirme, aşındırma ve implantasyon işlemlerinin nasıl gerçekleştiğini gösteren diyagram.....	43
Şekil 5.1 Özdirenç ölçüm algoritması (Kuran, 2015).....	45
Şekil 5.2 Keithley 2614B Çift Kanallı 200V, 10A KaynakMetre kullanılarak yapılan TFT ölçümlerinin bağlantı şeması .....	46
Şekil 5.3 Ölçüm algoritması (Kuran, 2015) .....	46
Şekil 5.4 Özdirenç, yük taşıyıcı yoğunluğu ve mobilite hesaplama programı .....	47
Şekil 5.5 Keithley 26XX için hazırlanan Labview yazılımından bir kesit .....	48
Şekil 5.6 Ticari bir mosfet'in akım-voltaj grafiği ve program arayüzü .....	48
Şekil 5.7 Optik ölçümlerin yapıldığı sistemin diyagramı.....	50
Şekil 5.8 Ocean Optics USB 2000 ve 4000 Serisi ile uyumlu Spektrum Yazılımı .....	50
Şekil 5.9 Kurt J. Lesker firmasından alınan ConFlat® (CF) UHV 6-Way Cross 'un taslak çizimi.....	51
Şekil 5.10 RF/DC Magnetron Sputtering sisteminin son tasarımına ait kesit .....	52
Şekil 5.11 Birçok ince film kaplamasının ardından sputter sistemi içerisindeki ince filmlerin yarattığı görsel .....	53

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.12 RF gücüne bağımlı olarak biriktirme hızlarına bağlı manyetik alan çizgileri .....	54
Şekil 5.13 IGZO ince filmlerin RF biriktirme gücüne bağlı olarak biriktirme hızı .....	55
Şekil 5.14 ITO ve IGZO için gölgeleme maskeleri (üst üste bindirilmiş) ve üretim sonrası oluşan desen .....	56
Şekil 5.15. 20 W ile 80 W aralığında, 1 mTorr, 1,5 mTorr ve 2,5 mTorr Ar gazı basıncı altında üretilen IGZO ince filmlerin mobilite & RF gücü grafikleri.....	57
Şekil 5.16. 5mTorr ve 7,5 mTorr Ar gazı basıncı altında üretilen IGZO ince filmlerin mobilite & RF gücü grafikleri .....	58
Şekil 5.17 20 W ile 100 W aralığında farklı Ar gazı basıncında üretilen IGZO ince filmlerin özdirenç grafikleri.....	59
Şekil 5.18. 20 W ile 100 W aralığında farklı gaz basınçlarında üretilen IGZO filmlerin taşıyıcı yoğunlukları .....	59
Şekil 5.19 Farklı RF biriktirme güçleri altında üretilen 200 nm'lik IGZO ince filmlerin optik geçirgenlik grafikleri .....	60
Şekil 5.20. IGZO ince filmlerin 260 nm ile 320 nm aralığındaki optik geçirgenlikleri .....	61
Şekil 5.21 20W 1 mTorr Ar basıncı altında üretilen IGZO ince film (Resim 42 µm x 42 µm alana ait) .....	61
Şekil 5.22 IGZO ince filmin litografi ve aşındırma sonrası kalınlığını gösteren grafik (Şekil 5.21'deki resme ait kalınlık görüntüsüdür) .....	62
Şekil 5.23 Drain-Source elektrotlarına ait maskenin tasarımı (Üstteki büyütme Drain-Source'a ait, alttaki büyütme ise "interdigit" tasarıma ait) .....	63

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.24 - ITO DC Magnetron püskürtme tekniği ile yapılan güce bağlı biriktirme hızı grafiği.....	65
Şekil 5.25 RF magnetron püskürtme ile biriktirme hızının püskürtme gücüne bağlı grafiği.....	65
Şekil 5.26 ITO ince filme ait AFM görüntüsü.....	66
Şekil 5.27 Kalınlığı belirlemek için interdigit deseninden alınan kesit.....	67
Şekil 5.28 Kalınlık ölçümleri 3 ayrı konumdan incelenmiştir.....	68
Şekil 5.29 40 W, 1 mTorr'da üretilen ~400 nm'lik ITO ince filmin optik geçirgenliği.....	69
Şekil 5.30 2 inç'lik Silikon Wafer üzerine yapılan SiO <sub>2</sub> kaplaması.....	70
Şekil 5.31 Silikon wafer üzerine yapılan farklı kalınlıklardaki SiO <sub>2</sub> ince filmlerin fotoğrafı .....	70
Şekil 5.32 Film kalınlığı ve ışık şiddetine göre SiO <sub>2</sub> 'nin aldığı renkler (Silicon Dioxide/Nitride Color vs. Film Thickness and Viewing Angle Calculator (byu.edu)) .....	71
Şekil 5.33 SiO <sub>x</sub> ince filmi kaplandığı kalınlığa göre farklı renklere görünmektedir. ....	71
Şekil 5.34 100W 20 mTorr Ar 5 mTorr O <sub>2</sub> ve 60 dakikada üretilen SiO <sub>2</sub> ince filmin kalınlığı.....	72
Şekil 5.35 10 µm x 10 µm'lik bir alandan alınan AFM görüntüsü, yüzey pürüzlülüğünün ortalama 4 nm olduğu ölçülmüştür.....	72
Şekil 15.36 – Maske 1 ve Maske 2 üst üste görüntülenmiştir. ....	73

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.37 Gölgeleme metodu ile üretilen ITO ince film (maskesiyle birlikte çekilmiş) .....	74
Şekil 5.38 Gölgeleme maskesi ile Si wafer üzerine üretilen transistör yapıları ....	74
Şekil 5.39 Gölgeleme maskesi ile üretim sonucunda elde edilen transistör yapısı	75
Şekil 15.40 - Gölgeleme maskesi ile oluşturulan transparan TFT yapısı, bu resim TFT'nin üretildiği camın değil, camdan beyaz zemine yansıyan gölgesinin resmidir. Sağ alt köşedeki cımbız gölgesinden de anlaşılmaktadır. ....	75
Şekil 5.41 ITO ince film üzerinde kaplanan fotorezistin fotolitografi sonrası görüntüsü. ....	76
Şekil 5.42 SiO <sub>2</sub> üzerine yapılan bu fotorezist denemesinde sarmal yapı başarılı bir şekilde oluşturulmuştur. ....	76
Şekil 5.43 5.34'te verilen görselin 10x'te yakınlaştırılmış fotoğrafı .....	77
Şekil 5.44 ITO ince film üzerine kaplanan fotorezist ile 2 um'lik desenin başarılı bir şekilde çıktığı görülmüştür. ....	77
Şekil 5.45 Kaplama yapılan cam üzerindeki kirlilikler dolayısıyla ince filmlerde meydana gelen deformasyonun gösterildiği bir AFM görüntüsü .....	78
Şekil 5.46 ITO (30W, 1.5mTorr, 15dk) + ITO (30W, 1.5mTorr, 15dk) iki katlı filmin X eksenine göre yüksekliği (Grafik ilk ITO katmanına göre düzeltilmiştir.) .....	79
Şekil 5.47 AFM ile alınan ITO IBE aşındırma görüntüsü .....	82
Şekil 5.48 IBE Test sırasında hem ITO ince filmin aşındırılması hem de üzerine kaplı olduğu camın aşındırıldığı görülmektedir. ....	83

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.49 TFT yapısının görünümü. Üstteki şekil yapının üstten görünümüdür. Altteki şekil ise siyah çizgi ile gösterilen yerden alınan yanal kesit görünümüdür .....	84
Şekil 5.50 Üstteki resim üstten görünüm, alttaki resim ise yanal kesitidi. 1. Aşama: ITO Gate elektrodu .....	85
Şekil 5.51 Soldaki resim mikroskop görüntüsü, sağdaki resim ise tasarım görüntüsü, Gate elektrodunun üretilmesi.....	85
Şekil 5.52 Üstteki resim üstten görünüm, alttaki resim ise yanal kesitidi. 2. Aşama: ITO Gate Elektrodu + SiO <sub>x</sub> Gate Yalıtkanı .....	86
Şekil 5.53 Üstteki resim üstten görünüm, alttaki resim ise yanal kesitidi. 3. Aşama: ITO Gate Elektrodu + SiO <sub>x</sub> Gate Yalıtkanı + ITO Drain-Source Elektrodu.....	87
Şekil 5.54 - Soldaki resim mikroskop görüntüsü, sağdaki resim ise tasarım görüntüsü Gate elektrodu ve Gate dielektriği üzerine yapılan Drain-Source elektrodu .....	87
Şekil 5.55 Üstteki resim üstten görünüm, alttaki resim ise yanal kesitidi. 4. aşama: ITO Gate Elektrodu + SiO <sub>x</sub> Gate Yalıtkanı + ITO Drain-Source Elektrodu + IGZO Kanal Yarıiletkeni.....	88
Şekil 5.56 Soldaki resim mikroskop görüntüsü, sağdaki resim ise tasarım görüntüsü, tüm aşamaları tamamlanmış, ince film transistörün 50x büyütme altındaki fotoğrafı .....	88
Şekil 5.57 - ITO katmanları altında sızıntı varken alınan I-V grafiği .....	89
Şekil 5.58 - Gate yalıtkanı olarak alitaşın kullanıldığı ince film transistörün akım-voltaj grafiği.....	90
Şekil 5.59 - Elektriksel testler sırasında termal kamera ile incelemesi yapılan ince film transistor.....	90

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.60. 0 - 3 V Drain-Source voltajı aralığında, 0-4V Gate-Source Voltajı altında yapılan TFT ölçümü (W/L oranı 10/5) .....	91
Şekil 5.61 Tez kapsamında üretilen 10/4 W/L oranına sahip ince film transistöre ait elektriksel ölçümler .....	92
Şekil 5.62 Şekil 5.57'de verilen $V_{GS}-I_{DS}$ grafiğinin parametrelerinin analizini gösteren diyagram.....	93
Şekil 5.63 W/L oranı 10/3 olan TFT'nin $V_{DS}-I_{DS}$ ve $V_{GS}-I_{DS}$ grafiği .....	93
Şekil 5.64 W/L oranı 10/4 olan TFT'nin $V_{DS}-I_{DS}$ ve $V_{GS}-I_{DS}$ grafiği .....	94
Şekil 5.65 W/L oranı 10/5 olan TFT'nin $V_{DS}-I_{DS}$ ve $V_{GS}-I_{DS}$ grafiği .....	95
Şekil 5.66 Tüm aşamaları tamamlanmış ve üzerine 5. katman olarak IGZO yarıiletkeni korumak için $SiO_x$ kaplaması yapılmış tamamen transparan ince film transistör .....	96
Şekil 5.67 Şekil 5.66'te resmi verilen transistör dizisinin mikroskop altında büyütülmüş hali .....	97
Şekil 5.68 IGZO tabanlı TFT'nin tamamlanmış hali. Şekil 5.67'de kırmızı halka ile çizilen kısmın büyütülmüş halidir .....	98

**TABLolar DİZİNİ**

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 5-1 Sistemde kullanılan 2 inçlik sputtering başlığı ile 1 inç x 1 inç boyutlarında alttaş üzerine yapılan ince filmlerin basit direnç ölçüm sonuçları ...	64
Tablo 5-2 RF ve DC magnetron sputtering tekniği ile 200 nm'lik yüzey direnci	66
Tablo 5-3. - Üretim parametrelerine göre biriktirme hızı ve kalınlık farkları (Ölçümler 1 saatlik biriktirme sonunda yapılmıştır). .....	67

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$\mu$	mobilité ( $cm^2V^{-1}s^{-1}$ )
$\rho$	Özdirenç ( $\Omega cm$ )
$R_s$	Yüzey Direnci ( $\frac{\Omega}{\square}$ )
$\sigma$	İletkinlik ( $\Omega^{-1}cm^{-1}$ )
$n_s$	Taşıyıcı Konsantrasyonu $cm^{-2}$
$t$	Filmin kalınlığı (cm)
I	Akım (Amper)
V	Volltaj (Volt)
$R_{ij,kl}$	Direnç ( $\Omega$ )
$C_{OX}$	Dielektrik malzemenin kapasitansı
$V_G$	Gate voltajı
$V_T$	Eşik voltajı
$V_{DS}$	Drain-Source Voltajı
$I_{DS}$	Drain-Source Akımı
$V_{GS}$	Gate-Source Voltajı
W	Kanal Genişliği
L	Kanal Uzunluğu

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (DEVAM)**Kısaltmalar

IGZO İndiyum Galyum Çinko Oksit

UV Ultraviyole

a-IGZO Amorf IGZO

a-Si Amorf Silikon

ITO İndiyum Tin Oksit

PVD Fiziksel Buhar Biriktirme

TFT İnce Filmler Transistörü

ZnO Çinko Oksit

TFT İnce Filmler Transistörü

In İndiyum

Ga Galyum

Zn Çinko

O Oksijen

DC Doğru Akım

RF Radyo Frekansı

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda özellikle yeni nesil ekranların (transparan, esnek, geniş alanlı vb) geliştirilmesi ve kullanım alanlarının artması bu ekranların üretiminde kullanılan ince film transistör (TFT) teknolojisinin de gelişmesini zorunlu kılmaktadır. Silisyum tabanlı TFT'lerin elektronik ve optik özellikleri yanında özellikle de üretim maliyetleri günümüzün mevcut ihtiyacını karşılamaktan uzak olduğundan, son yıllarda özellikle İndiyum Galyum Çinko Oksit (IGZO) tabanlı TFT'lerin geliştirilmesi hız kazanmıştır. (Yeon Kwon and Kyeong Jeong, 2015; Zhu et al., 2021)

Silikon teknolojisi günümüzde hala en yaygın teknolojilerden birisi olarak kullanılmaya devam etmektedir. Ancak silikon teknolojisi günümüzde kullanılan yüksek çözünürlüklü, geniş ekranlı cihazlar için avantajını kaybetmiştir. Tek kristal silikon teknolojisi ile yüksek mobiliteler yakalanabilirken, amorf silikon (a-Si) tabanlı ekranlarda ekranların yenileme hızları, çözünürlükleri ve genişlikleri karşısında yetersiz kalmıştır. a-Si tabanlı TFT'lerde etkin mobilite  $1 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  mertebesinde kalmaktadır. Bu da ekranların yenileme hızını düşürmekte, kullanıcının hareketli görüntüleri kesikli olarak görmesine sebep olmaktadır. Kristal veya poli-kristal tabanlı üretilen TFT'lerde etkin mobilite yeterlidir ancak bu da yüksek sıcaklık gerektirmesi ve yüksek sıcaklıkta kullanılabilecek malzemeleri gerektirmesi dolayısıyla maliyetleri büyük oranda artırmaktadır. ((Nomura et al., 2006; Yabuta et al., 2006; Park et al., 2012)

Amorf oksit yarıiletkenler (AOS) son yıllarda çok araştırılan malzemelerden olup, yüksek mobiliteleri, düşük sıcaklıklarda üretilibilmeleri, geniş alanlarda homojen kaplamalar yapılabilmesiyle birçok panel (ekran) üreticisinin dikkatini çekmiş ve bu yönde araştırmaların hızlanmasını sağlamıştır. Bu AOS materyallerden IGZO ise yüksek mobilitesi, yüksek optik geçirgenliği, esnek malzemelere kaplanabilmesi, ZnO'ya göre daha stabil olması dolayısıyla şu an birçok ticari üründe yaygın olarak kullanılmaktadır.(Fortunato et al., 2005; Barquinha et al., 2009; Fortunato et al., 2012)

Bu tez çalışmasında IGZO yarıiletken ince filmlerin üretim parametrelerine bağlı olarak özellikleri incelenmiş, bu özelliklerin transistör performansına etkisini gözlemlemek amacıyla tamamen transparan yapıda ince film transistör (TFT)

aygıtları üretilmiş ve test edilmiştir. Bu TFT'lerin elektronik ve optik özellikleri, fabrikasyon aşamaları ve üretim parametrelerinin aygıt performansına olan etkileri tezin ilgili bölümlerinde detaylarıyla tartışılmıştır.

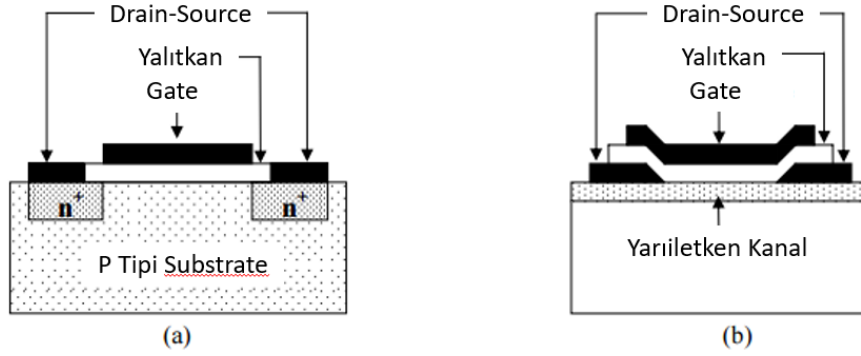
İnce film transistörlerin yapısı, elektronik özellikleri ve performans parametreleri teorik olarak ikinci bölümde anlatılmıştır. TFT yapısındaki bir aygıtın elektronik parametrelerinin karakterize edilebilmesi için gerekli düzenek ve ölçüm teknikleri ile ilgili bilgiler üçüncü bölümde verilmiştir. İnce filmlerin ve TFT aygıtların üretim aşamalarını ve bu yönde yapılan deneysel çalışmaları içeren detaylar dördüncü bölümde verilmiştir. Üretilen aygıtların ölçüm sonuçları ve bu sonuçlara ilişkin yorumlar beşinci bölümde verilmiştir.



## 2. İNCE FİLM TRANSİSTÖR

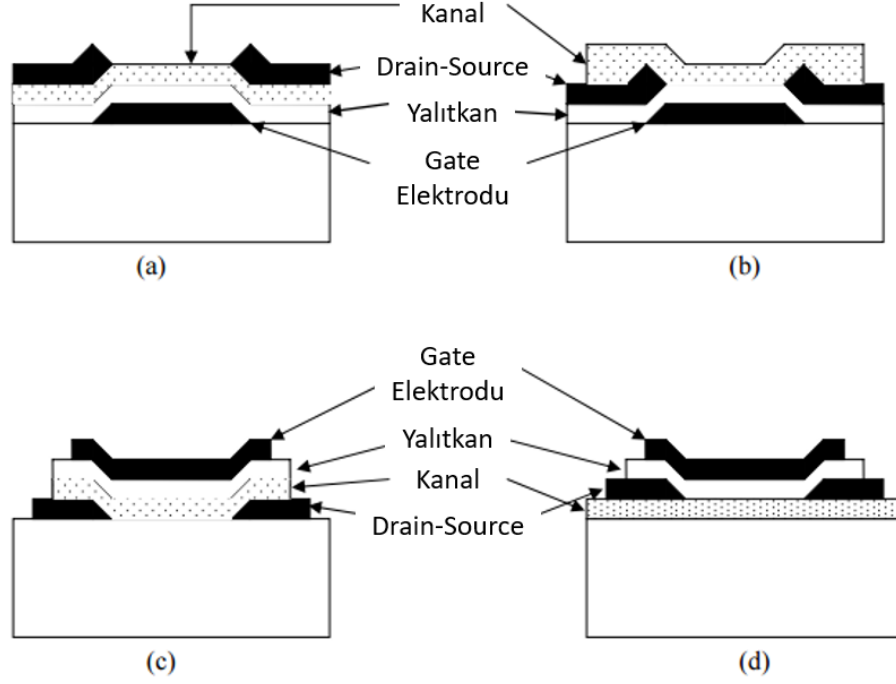
Alan etkili transistörler (FET), drain-source arasındaki akımın gate elektroduna uygulanan potansiyel fark ile kontrol edilebildiği devre elemanlarıdır. Buradaki diğer önemli durum ise saturasyon adımı verdiğimiz bölgede drain-source arasındaki potansiyel değişiminin yapı tarafından tolere edilip akım değerini korumasıdır. Yani saturasyon bölgesindeyken drain-source voltajındaki dalgalanmalar sistemi ya hiç etkilememekte ya da ihmal edilebilecek düzeyde etkilemektedir.

İnce film transistörler (TFT) bir çeşit alan etkili transistör olup, metal oksit yarıiletken alan etkili transistörler (MOSFET) aynı çalışma prensibine sahiptirler fakat yapısal olarak farklılıklar bulunmaktadır. Şekil 2.1’de MOSFET ile TFT’nin kesitleri gösterilmektedir.



Şekil 2.1. İnce Film Transistörlerin Yapısı (a) MOSFET (b) TFT

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi TFT yalıtkan bir alttaş üzerine yapılmış ve tek tip yarıiletken içeriyor. MOSFET’te ise p-tipi yarıiletken içerisine n-tipi drain-source implant edilmiştir (p-kanal MOSFET için ise n-tipi yarıiletken içerisine p-tipi drain-source implant edilir). TFT’de source-drain kontakları doğrudan kanal materyali ile temas halindedir. Bu da MOSFET’teki pn eklemlerine göre daha omik bir kontak sağlamaktadır.



Şekil 2.2. Yaygın olarak kullanılan 4 farklı TFT yapısı (a) staggerd bottom gate (b) coplanar bottom-gate (c) staggered top-gate ve (d) coplanar top-gate

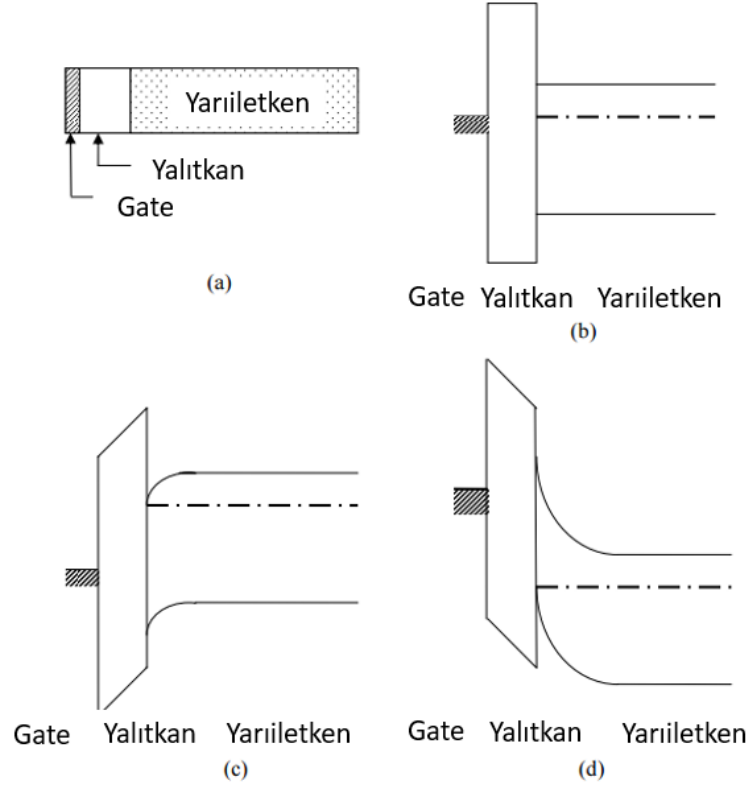
Yaygın olarak kullanılan (Fortunato et al., 2005) 4 farklı ince film transistör yapısı vardır (şekil 2.2). Drain-Source elektrodu ile gate elektrodu yarıiletken materyallere göre aynı taraftaysa coplanar, farklı yöndelerse staggered yapı olarak isimlendirilmektedirler. Bu iki yapı da gate elektrodunun bulunduğu yere göre “top-gate” ve “bottom-gate” olmak üzere gate elektrodunun yukarıda ve aşağıda olmasına göre ikiye ayrılmaktadır. Kullanılan materyal ve üretim metoduna göre her bir yapının bazı avantaj ve dezavantajları vardır. Örneğin, kolay üretim ve artırılabilir elektriksel özellikleri dolayısıyla “staggered bottom-gate” yapı genellikle amorf silikon ince film transistörler için kullanılmaktadır. Bu yapıdaki gate elektrodu, ışığa karşı duyarlı olan a-Si:H yarıiletkeni LCD ekran arkaplan ışığından korumaktadır. Diğer bir taraftan “coplanar top-gate” yapı genellikle poly-Si TFT’lerde kullanılmaktadır. Amorf silikon yapısının polikristal silikon yapısına dönüştürmek için yüksek ısı gerektirmesi dolayısıyla diğer katmanları korumak için önce yarıiletken katman oluşturuluyor. Yine tüm bunlara ek olarak “bottom-gate” yapıda (hem “stagered” hem de “coplanar” yapı için) yarıiletken malzemenin dışarıda kalması materyalin ışıkla, atmosferle ve diğer fiziksel etkenlerle etkileşmesine sebep olmaktadır. Bu durum bazı sensör uygulamalarında hassasiyeti artırırken bazı optoelektronik uygulamalarında da verimi düşürdüğü gözlenmiştir (Fortunato et al., 2005; Fortunato et al., 2007; Lee et al., 2009). Üretim, materyal

ve uygulama alanı etmenleri göz önünde bulundurulduğunda doğru transistör yapısının seçilmesi bir tercih değil gerekliliktir.

Şekil 2.2’de gösterilen yapılar yalnızca temel katmanları göstermektedir. Enerji tüketimini düşürmek için bazı uygulamalarda yarıiletken ile drain-source elektrotları arasına yüksek katkılı bir katman daha kaplanır. Bu katman omik geçişi sağlayarak tetikleme voltajını ve güç tüketimini düşürür. Bu yapı yüksek performans gerektiren mikroişlemci, bellek gibi uygulama alanlarında kullanılan mosfetlere benziyor olsa da gerek alttaş farklılığı (silikon wafer, cam alttaş vs) gerekse de mosfetlerdeki pn eklemi gerekliliği gibi etkenlerle birbirinden ayrılmaktadır. Bunlara ek olarak yarıiletken malzeme ya da diğer reaktif malzemeleri atmosferden korumak için inert bir malzeme ile de en üst katman kapatılabiliyor. Bu da yapının daha uzun süre stabil çalışmasını sağlamaktadır.

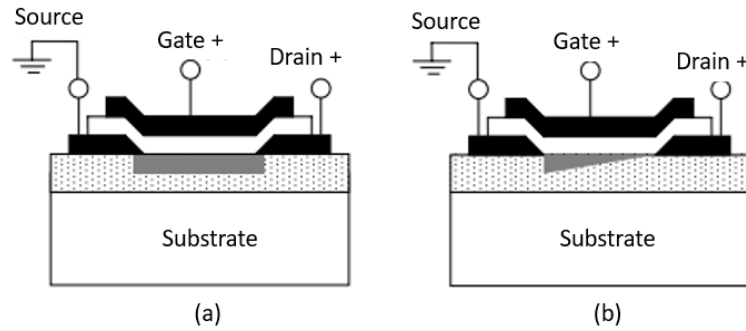
## 2.1 TFT’lerin Çalışma Prensibi

Şekil 2.3 (a)’da verilen Metal-Yalıtkan-Yarıiletken yapısı b, c, ve d’de farklı gate voltajları altında incelenmiştir. Sisteme herhangi bir gate voltajı uygulanmadığı durumda sistem dengededir ve yapı düz enerji bant yapısına sahiptir (Şekil 2.3 (b)). Ancak gate elektroduna pozitif bir potansiyel uygulandığında yarıiletkenin enerji bant yapısında bir bükülme meydana gelmektedir. Potansiyelin daha düşük olduğu metal elektroda doğru bir bükülme gerçekleşmektedir (Şekil 2.3 (c)). Burada yalıtkan yapı elektronların metale geçişini engellemektedir. Yarıiletken ile dielektrik malzemenin kesişim bölgesinde elektronların yoğunluklu olduğu bir bölge oluşmaktadır. Bu bölgeye kanal ismi verilmektedir. Kanal bölgesindeki yük taşıyıcıların sayısının artması akım taşıma kapasitesini artırmaktadır. Eğer gate elektroduna negatif bir voltaj uygulanırsa kanal bölgesindeki yük taşıyıcılarının sayısı azalacak ve kanalın akım taşıma kapasitesi düşecektir. N kanal TFT için yük taşıyıcıları elektronlardır, negatif gate voltajı altında kanaldaki boşluk konsantrasyonu artmış olacaktır (Şekil 2.3 (d)).



Şekil 2.3. MOS yapısının potansiyel fark altındaki enerji bant durumu (a) MOS yapısının yandan kesiti, (b) denge durumundayken, (c) biriktirme durumundayken ( $V_{GS} > 0 V$ ), ve (d) boşaltım durumundayken ( $V_{GS} < 0 V$ ).

Eğer drain elektrodu source elektroduna göre pozitif olursa çoğunluk yük taşıyıcıları olan elektronlar draine yönlenecektir. Bu da drainden source'a bir akım oluşturacaktır (akımın elektronların hareketine ters yönde olması durumu). Gate tarafından oluşturulan kanal bölgesinin genişliği gate'e uygulanan potansiyelin büyüklüğü (oluşturulan elektrik alanın şiddeti) ile değiştirilebilmektedir. Aynı zamanda diğer alan etkili transistörlerde bu prensibe göre çalışmaktadırlar.

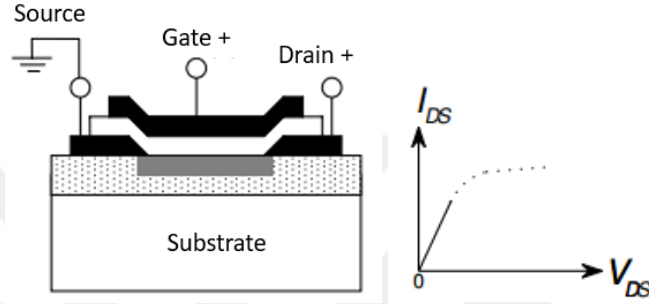


Şekil 2.4. n-kanal transistörün biriktirme durumundayken bağlantı şeması (a) eşik durumu öncesi (b) eşik durumu sonrası

## 2.2 İnce Film Transistörlerin Çalışma Bölgeleri

Alan etkili transistörlerin (Field-Effect Transistor, FET) bipolar eklem transistörlerden farkı (BJT) drain-source arasındaki akımın kontrolünü gate'e uygulanan potansiyel fark ile sağlamasıdır. Akımla voltaj arasındaki ilişki  $V_{DS}$  ile  $V_G - V_T$  arasındaki ilişkiye bağlıdır. Burada  $V_T$  eşik gerilimidir (threshold voltage).  $V_{DS}$ 'nin  $V_G - V_T$ 'ten küçük olduğu bölgeye lineer bölge, büyük olduğu bölgeye ise saturasyon bölgesi denir.

### 2.2.1 Lineer bölge



Şekil 2.5. Lineer bölge ( $V_{GS} < V_T$ )

Şekil 2.5'te n-kanal TFT'nin bağlantı diyagramı gösterilmiştir. Gate ve drain'in source'a göre daha pozitif olacak şekilde bağlanması biriktirme durumu/modu olarak adlandırılmaktadır. Gate'e pozitif potansiyel uygulandığında elektronlar dielektrik-yarıiletken arayüzünde birikmeye başlayacaktır. Drain source'a göre pozitif olduğu için elektronların akış yönü source'tan drain'e doğru olacaktır. Drain voltajını artırdıkça drain akımı da voltaj ile orantılı bir şekilde artacaktır. Bu çalışma modunda TFT bir direnç gibi hareket edecektir. Bu durum kanalın akım taşıma kapasitesine yani saturasyon akımı değerine ulaşana kadar devam edecektir.

Gate potansiyeli  $V_T$ 'den büyükse kanal içerisindeki çoğunluk yük taşıyıcılarını şu şekilde tanımlayabiliriz.

$$Q_{linear} = -C_{ox}(V_g - V_t) \quad (2.1)$$

Burada  $C_{ox}$  kullanılan dielektrik malzemenin birim alan başına düşen kapasitansını göstermektedir. Ancak bu kabul için kanala uygulanan potansiyel 0 V

olmalıdır. Kanala uygulanan bir potansiyel varsa bu denkliği şu şekilde değiştirebiliriz;

$$Q_{linear} = -C_{ox}(V_g - V_t - V) \quad (2.2)$$

Kanal içerisindeki çoğunluk yük taşıyıcılarının oluşturduğu akım;

$$I_D = W\mu_n Q_t E_y \quad (2.3)$$

Burada W kanalın genişliği,  $\mu_n$  elektron mobilitesi,  $E_y$  y yönündeki elektrik alanıdır. Bu denkliği akım yoğunluğu biçiminde tekrardan düzenleyecek olursak (akım yoğunluğundaki difüzyonu ihmal edecek olursak)

$$J_n = \frac{I_n}{A} = q \left( \mu_n n E + D_n \frac{dn}{dx} \right) \quad (2.4)$$

$E_y = -dV/dy$ 'yi yerine koyduğumuzda şu denkliği elde ederiz.

$$I_D dy = W\mu_n C_{ox} (V_G - V_{TH} - V) dV \quad (2.5)$$

Bu durumda akım artışı  $y=0$ 'dan  $L$ 'ye kadar;  $V=0$ 'dan  $V_d$ 'ye kadar şu şekilde elde edilir

$$I_D = C_{ox}\mu_n \frac{W}{L} \left[ (V_G - V_{TH})V_D - \frac{1}{2}V_D^2 \right] \quad (2.6)$$

Öyleyse linear bölgede drain akımını;

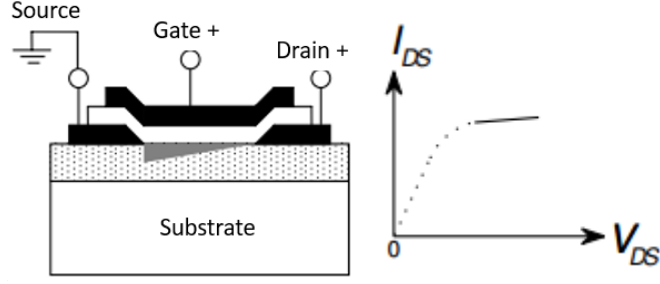
$$I_D = C_{ox}\mu_n \frac{W}{L} (V_G - V_{TH})V_D \quad (2.7)$$

Şeklinde ifade edilebilir. Linear bölgedeki mobilite değeri de aynı denklemden  $\mu_n$  değeri çekilerek bulunabilir.

### 2.2.2 Saturasyon bölgesi

$V_d$  potansiyeli  $V_g - V_t$  potansiyeline yaklaştıkça  $I_d$  akımındaki artış da azalır ve artık denklik (2.6) geçerliliğini yitirmeye başlar. Bu bölge saturasyon öncesi bölge olarak isimlendirilir. Bu bölgedeki  $I_d$  değeri;

$$I_{DS} = \frac{W\mu_n C_G}{L} \left[ (V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad (V_{DS} < V_{DSsat}) \quad (2.8)$$



Şekil 2.6. Saturasyon bölgesi  $V_{gs} > V_t$

$V_d = V_g - V_t$  olduğunda ise kanal maksimum sayıda yük taşıyıcısı sayısına ulaşmıştır ve  $I_d$  akımı sabit devam eder. Bu durumdaki  $I_d$  akımını denklik 2.9'daki gibi olur.

$$I_D = \frac{C_{ox}\mu_n W}{2L} (V_G - V_{TH})^2 \quad (2.9)$$

$$I_{DS\ sat} = \frac{W\mu C_G}{2L} (V_{GS} - V_T)^2 \quad (V_{DS} \geq V_{DSsat}) \quad (2.10)$$

Burada akım artık  $V_d$  potansiyelinden bağımsızdır ve  $V_t$ , mobilite ve diğer parametreler sabit olduğu için  $I_d$  sadece gate voltajına bağlıdır.

### 2.3 İnce Film Transistörlerin Parametreleri

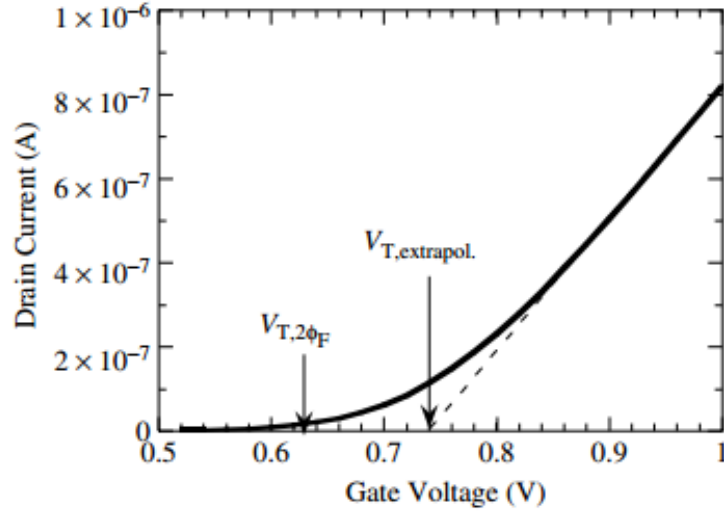
Transistörün karakteristik özellikleri eşik voltajı, alan etki mobilitesi, on/off oranı (on/off ratio), transconductance gibi parametrelerle belirlenir. Bu parametrelerin çıkarılışı ve bağlı olduğu etkenlerin anlaşılması transistörün tasarlanmasında önemli rol oynamaktadır.

#### 2.3.1 Eşik voltajı

İnce film transistörlerin en önemli parametrelerinden birisi olan eşik voltajı transistörün çalışmaya başlama voltajını belirtmektedir. Birden fazla transistör içeren elektronik yapılarda gerekli olan minimum güç, potansiyel dağılımı gibi planlamalar bu parametre baz alınarak yapılmaktadır. Eşik voltajı çeşitli ölçüm cihazlarıyla herhangi bir analiz ya da hesaplama yapmaksızın basitçe bulunabilmektedir (Ortiz-Conde et al., 2002). Ancak bu cihazlardan bağımsız olarak çeşitli hesaplamalar ve metotlarla eşik voltaj değeri hesaplanabilmektedir.

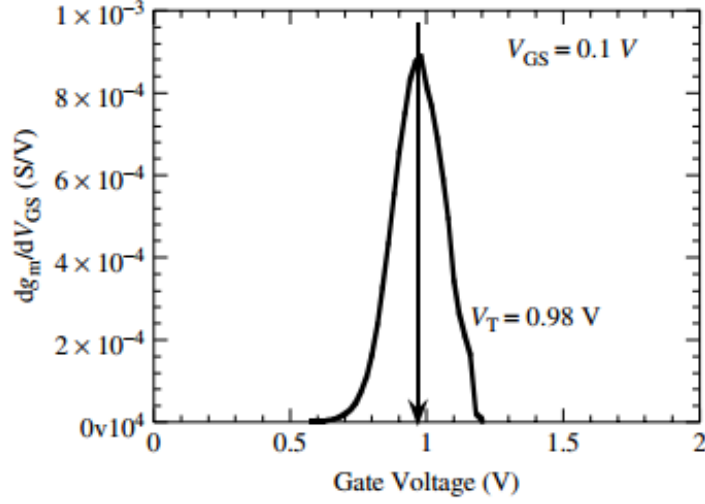
En çok kullanılan metotlardan birisi olan lineer izdüşümü metodudur (Ortiz-Conde et al., 2013). Gate voltajı  $I_d$  akımının bir fonksiyonu olarak çizildiği grafikte grafiğin birinci türevinin maksimum olduğu noktadan gate voltajı eksenine doğru lineer bir iz düşümü alınır. Eğer ölçüm belirli bir  $V_{ds}$  voltajı altında alındıysa ve bu  $V_{ds}$  voltajı  $V_t$  voltajı üzerinde bir voltaj ise iz düşümünün gate voltajı eksenini kestiği değere  $V_{ds}/2$  kadar eklenir.

$$V_T = V_{GS} - V_{DS}/2 \quad (2.11)$$



Şekil 2.7. Lineer iz düşüm metodunun grafik üzerindeki gösterimi ( a. Ortiz-Conde et al. 2002)

Kullanılan metotlardan bir diğeri de transconductance metodudur. Eğer seri direnç ve mobilite azalımı ihmal edilebiliyorsa; metoda göre  $V_{gs}$ 'nin transconductance'ın fonksiyonu olduğu eğrinin birinci türevinin maksimum noktasının x bileşeni  $V_t$  değerini vermektedir.



Şekil 2.8.  $g_m$ - $V_{GS}$  grafiğine göre  $V_T$  değerinin bulunması (A. Ortiz-Conde et al. 2013)

### 2.3.2 Mobilite

Taşıyıcı mobilitesi aygıt performansını belirlemede etkin rol oynayan önemli parametrelerdendir. Özellikle aygıt çalışma frekansını, gecikmesini belirlemede sınırlayıcı bir etkindir. Aktif matris sıvı kristal ekranların (AMLCD) alan etki mobiliteleri  $1 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ 'den daha küçüktür. Buna karşın amorf oksit yarıiletkenlerin (AOS) pratikte sergiledikleri alan etki mobilitesi ise  $5 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ 'den daha yüksektir. Şu an kullanılan ultra yüksek çözünürlüklü geniş ekranların minimum gereksinimlerini a-Si TFT'lerin karşılayamaması dolayısıyla alternatifleri (AOS) kullanılmaktadır (Park et al., 2012).

Mobilitiyi etkileyen faktörler örgü noktası titreşimleri, kristal sınırlarındaki coulomb etkileşimleri, yapısal kusurlar ve taşıyıcı-taşıyıcı saçılmalarıdır. Yapısal kusurlar, safsızlık atomları gibi etkenlerin yarattıkları olumsuz etkileri üretim sırasında en aza indirgenebiliyorken, elektron-elektron saçılmaları, elektron-örgü noktası saçılmaları, kristal sınır bölgesi etkileşimleri ise malzemenin elektriksel özelliklerini değiştirmeden engellenememektedir.

Etkin mobilite daha çok lineer bölgede etkindir. Alt-eşik bölgesindeki akımların büyüklüğü ve kontrolü etkin mobilite ile yapılabilir.

$$I_D = \frac{W\mu_{eff}Q_nV_{DS}}{L} - W\mu_{eff}\frac{kT}{q}\frac{dQ_n}{dx} \quad (2.12)$$

$$Q_n = C_{ox}(V_{GS} - V_T) \quad (2.13)$$

Burada  $Q_n$  kanal yük taşıyıcı yoğunluğu,  $\mu_{eff}$  etkin mobilitedir. Etkin mobilite genel olarak  $V_{ds}$ 'nin düşük değerlerinde ölçülür. Düşük değerlerin ölçüm için uygun olmasının sebebi saçılmaların daha az etkin olması ve yük dağılımının daha homojen olmasıdır. Denklem 2.14'ten etkin mobilitayı şu şekile bulabiliriz.

$$\mu_{eff} = \frac{g_m L}{W Q_n} \quad (2.14)$$

Buradaki  $g_m$  transconductance (drain iletkenliği) olarak adlandırılmaktadır ve şu şekilde ifade edilir,

$$g_m = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right|_{V_{GS}} = \text{sabit} \quad (2.15)$$

Kanal yük taşıyıcı yoğunluğu kullanılan dielektriğe bağlıdır. Bağımlılığı basitçe aşağıdaki denklemdeki gibi ifade edilebilir. Frekansa dayalı ölçümlerle bu değer daha hassas belirlenebilir.

Çalışma bölgesindeki mobilite alan etkili mobilite olarak adlandırılır ve transistörün performansındaki etkin parametrelerden birisidir. Alan etkili mobilitenin etkin mobiliteden daha düşük olduğu durumlarda yaklaşık değeri veren aşağıdaki gibidir.

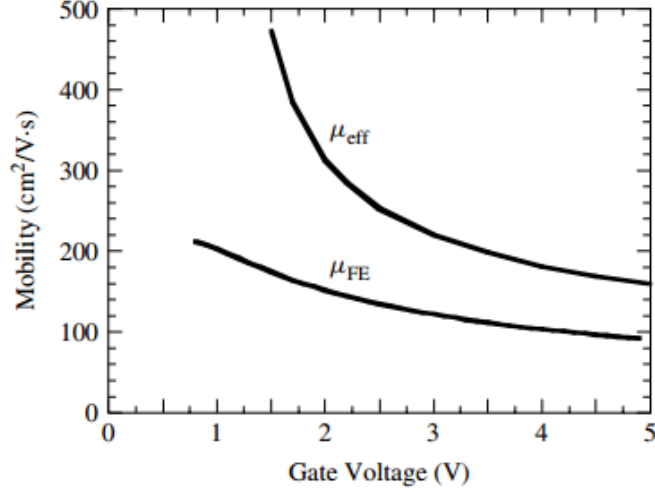
$$I_D = \frac{W}{L} \mu_{eff} C_{ox} (V_{GS} - V_T) V_{DS} \quad (2.16)$$

$$g_m = \frac{W}{L} \mu_{eff} C_{ox} V_{DS} \quad (2.17)$$

$$\mu_{FE} = \frac{L g_m}{W C_{ox} V_{DS}} \quad (2.18)$$

Buradaki  $g_m$  transconductance'tır. Etkin mobilitenin  $V_{gs}$  voltajına göre değişiminin negatif olduğu durumlarda etkin mobilite şu şekilde ifade edilir.

$$\mu_{FE} = \frac{L g_m}{W C_{ox} V_{DS} \left( 1 + \frac{(V_{GS} - V_T) d\mu_{eff}}{\mu_{eff} dV_{GS}} \right)} \quad (2.19)$$

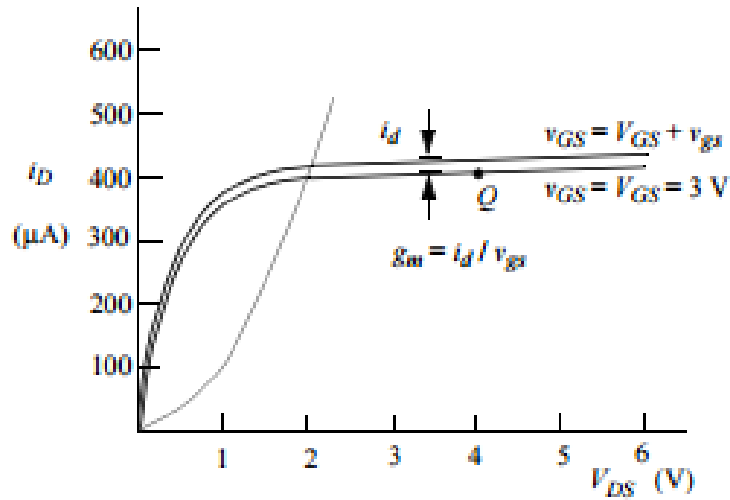


Şekil 2.9. Etkin mobilitenin daha yüksek olduğu durumlarda  $V_{gs}$  voltajına bağlıdır (Kagan and Andry, 2003)

### 2.3.3 Transconductance

Transconductance transistörün verimliliğini etkileyen parametrelerden birisidir.  $V_{gs}$  voltajına bağlı olarak  $I_{ds}$  akımının değişimi bize transconductance değerini verir. Bu da transistörün  $V_{gs}$ 'ye olan bağımlılığını yani hassasiyetini gösterir. Transconductance'ın etkisi küçük sinyallerde daha fazla belli olmaktadır.

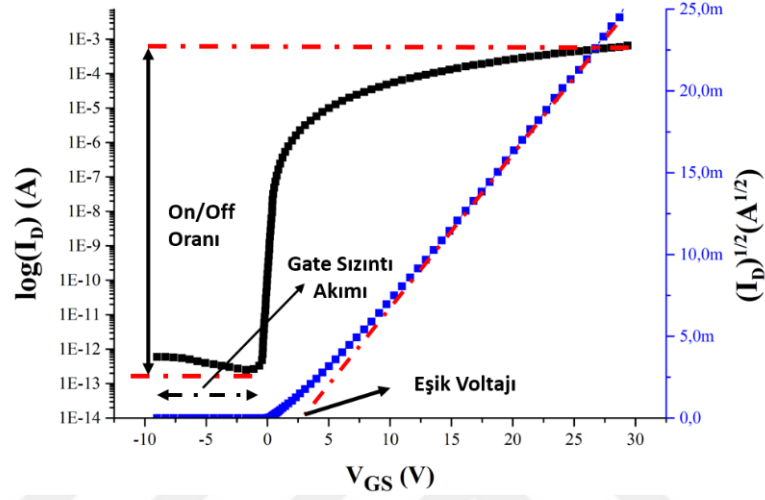
$$g_m = \sqrt{2\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} I_D} = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_{Tn}} \quad (2.20)$$



Şekil 2.10.  $V_{gs}$  voltajının  $I_d$  akımına etkisini gösteren grafik (Wong et al., 1987)

### 2.3.4 On/Off oranı

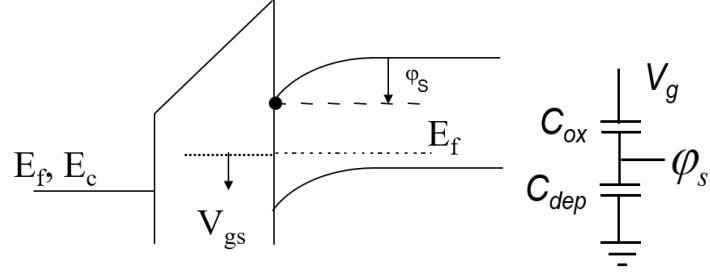
Elektronik cihazların açılış-kapanış hızını belirleyen on/off oranı maksimum  $I_{ds}$  akımı bile minimum  $I_{ds}$  akımının oranı şeklinde ifade edilir. Minimum  $I_{ds}$  akımı sızıntı akımına ya da ölçümün gürültü seviyesine bağlıdır. Maksimum  $I_{ds}$  akımı ise yarıiletkenin karakteristik özelliklerine bağlıdır. Ayrıca kullanılan dielektrik materyalin kanal üzerinde oluşturabildiği elektrik alan ile de doğrudan ilgilidir.



Şekil 2.11 On/Off Oranının  $I_{ds}$  -  $V_{gs}$  grafiği üzerinden belirlenmesi

### 2.3.5 Sızıntı akımları

Eşik voltajının altında yani  $V_{gs} < V_t$  iken transistör kapalı durumdadır (off-state) ancak drain-source arasında istenmeyen bir akım söz konusudur. Bu akıma "Subthreshold current" da denir. Kapalı durum akımı  $V_{gs}=0$  durumundayken ölçülür. Bu değer küçük olması oldukça önemlidir çünkü böyle bir durumda elektronik cihazlar kullanılmıyorken bile güç tüketen anlamına gelmektedir. Bir cep telefonu işlemcisi 100 milyondan fazla transistör içermektedir ve her bir transistör için  $I_{off}$  akımının 100 nA olduğu kabul edilirse bekleme modundaki bu işlemcinin 10 A akım çekmesi anlamına gelmektedir. Bu da bataryanın dakikalar içerisinde tükenmesine sebep olur. Bu durum aynı zamanda ısınmaya sebep olacağı için de beraberinde başka problemleri getirecektir.



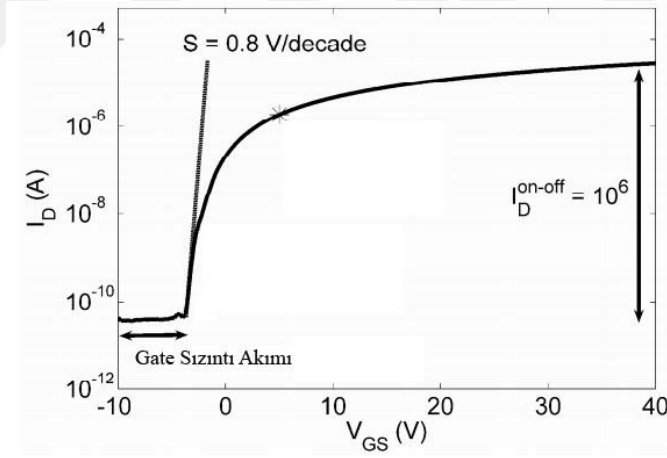
Şekil 2.12  $V_{gs} < V_t$  durumunda enerji bant durumu ve kapasitans

$$\frac{d\phi_s}{dV_g} = \frac{C_{ox}}{C_{ox} + C_{dep}} = \frac{1}{\eta} \quad (2.20)$$

$\eta$  transistörün verimini göstermektedir. Eşik voltajından daha düşük durumlarda;

$$\phi_s = \text{sabit} + V_g/\eta \quad (2.21)$$

$$I_{ds} \propto n_s \propto e^{q\phi_s/kT} \propto e^{q(\text{sabit} + V_g/\eta)/kT} \propto e^{qV_g/\eta kT} \quad (2.22)$$



Şekil 2.13  $V_{ds}=0$  iken  $\log(I_d(V_{gs}))$  grafiği

“Subthreshold Swing” (S) akımın açılma kapanma oranını vermektedir. Bu değer ne kadar düşük olursa transistörün güç tüketimi düşer ve hızı artar. S değeri  $\log(I_d(V_{gs}))$  grafiğinin eğiminin maksimum olduğu noktaya göre alınır.

$$S = \left. \frac{\partial V_{GS}}{\partial \log(I_D)} \right|_{\min} \quad (2.23)$$

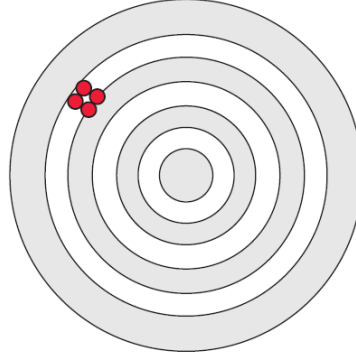
Bu deęerin dūřuk olması elektronik cihazlar için iyidir. Tipik deęeri 0.10-0.30 V.dec<sup>-1</sup> arasındadır.



### 3. KARAKTERİZASYON

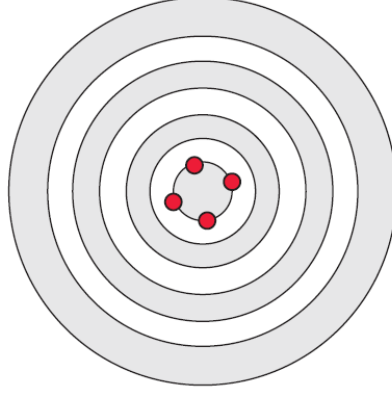
Karakterizasyon işlemi yalnızca multimetre, fotospektrometre gibi test & analiz cihazları ile elde edilen ölçüm sonuçlarının sunulması işlemi değildir. Verilerin toplanma şekli, tekrarlanabilirliği, doğruluğu ve çözünürlüğü de önemlidir. Ve tüm bu işlemlerin bir standarda göre yapılması gerekmektedir. Amerika'da Ulusal Standart ve Teknoloji Enstitüsü, Japonya'da Ulusal Metroloji Enstitüsü olduğu gibi Türkiye'de de Türkiye Standartları Enstitüsü bulunmaktadır. Bununla birlikte TÜBİTAK'a bağlı olarak Ulusal Metroloji Enstitüsü de çeşitli elektriksel, optik, manyetik ve yapısal ölçümler de yapmaktadır. Bu doktora tezi kapsamında Amerikan ve Japon standartları göz önünde bulundurularak testler yapılmıştır.

Tekrarlanabilirlik (repeatability) ve doğruluk (accuracy) birbiriyle ilişkili iki kavram olsa da birbirinden oldukça farklıdır. Tekrarlanabilirlik, yapılan bir sıra ölçümün birbirine yakın değerler vermesidir (Şekil 3.1). Bu sonuçların gerçek değere yakın olması beklenmektedir fakat gerçek değerden uzak olması tekrarlanabilir olmadığı anlamına gelmez.



Şekil 3.1 Yüksek tekrarlanabilirlik, düşük doğruluk

Doğruluk ise tekrarlanabilirlikten farklı olarak gerçek değere yakın sonuçların elde edilmesidir. Burada ise gerçek değere yakın sonuçların tutarlı bir şekilde elde edilmesi beklenmektedir (Şekil 3.2).

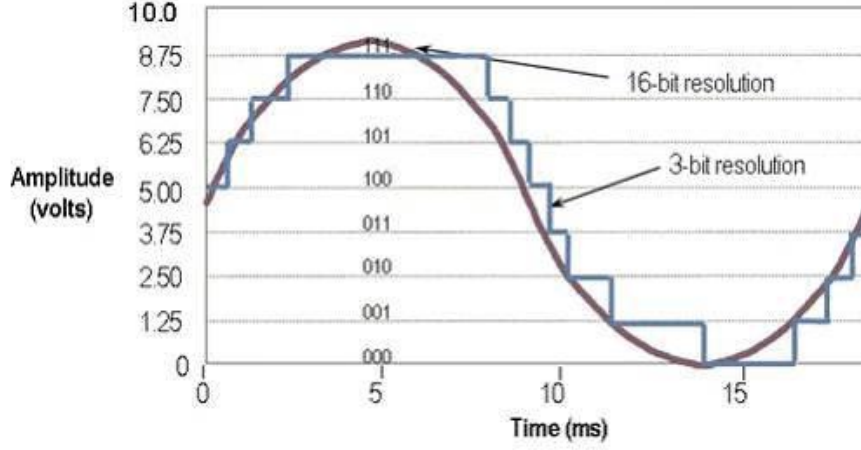


Şekil 3.2 Düşük tekrarlanabilirlik, yüksek doğruluk

Örneğin gerçek değeri 100 ohm olan bir direnç için yapılan ölçümlerde peş peşe 120 ohm sonuç elde edilmesi bu sonucun tekrarlanabilir olduğunu göstermektedir fakat gerçek değerden ise %20 daha uzaktadır. Bununla birlikte peş peşe yapılan 3 ölçümün 101, 102, 98 ohm elde edilmesi ise düşük tekrarlanabilirlikle yüksek doğrulukla bir ölçüm olduğunu göstermektedir.

Yüksek doğrulukla veri elde etmek önemli olsa da sistematik bir hata yüzünden yüksek tekrarlanabilirlikli doğruluktan uzak sonuç elde etmek çoğu zaman daha önemlidir. Çünkü kalibrasyon hatası, yanlış test metodu gibi problemler giderildiğinde tekrarlanabilir doğru sonuçlar elde etmek kaçınılmazdır. Bu durum aynı zamanda test standartlarının korunması için de önemlidir. Şöyle ki, bir referans örneği ile yapılan bir ölçüm ile doğruluktan uzak tekrarlanabilir sonuçları düzeltmek mümkünken, tekrarlanabilir olmayan sonuçları kalibre etmek mümkün olmayacaktır.

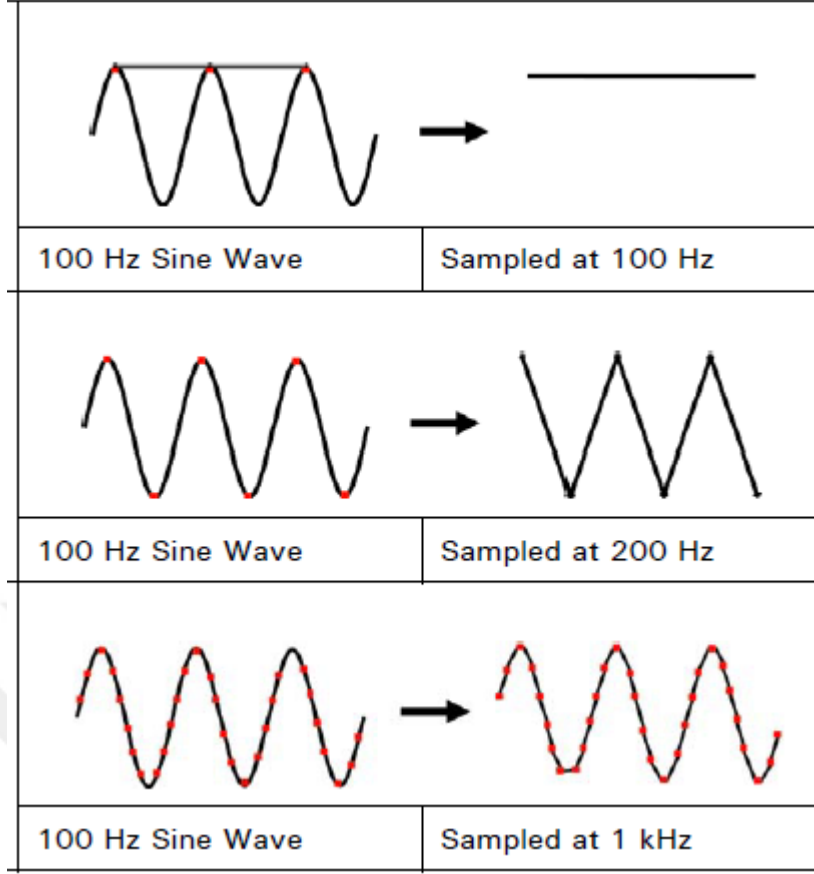
Diğer önemli etkenler ise ölçüm çözünürlüğü ve örnekleme sayısıdır. Çünkü ölçümlerin doğruluğunu ve tekrarlanabilirliğini bu iki etken ile sağlayabiliriz. Çözünürlük elde edilen minimum değişken değer olarak tanımlanabilir. Örnekleme sayısı ise belirli bir zaman aralığı içinde toplanabilen veriye ise örnekleme sayısı denmektedir.



Şekil 3.3 Ölçüm çözünürlüğü(Ni.com, 2022)

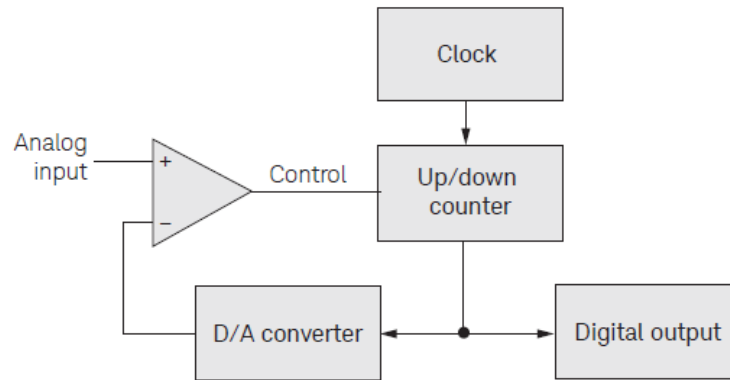
Ölçüm Aralığı 0-10V olan 3 bitlik bir multimetre ile 9 voltluk bir ölçüm yapıldığında Şekil 3.3'teki gibi bir sonuç elde edilir. Burada 6.15V, 0.5V gibi ara değerleri okumak mümkün değildir. Çünkü  $2^3$  yani 8 farklı veri okunabilmektedir.

Örnekleme sayısı zamanla değeri değişmeyen sistemlerde önemli değildir. Sıcaklık, ışık, basınç vb çevresel etkenlerin ölçümü yapılan aygıtı ya da malzemeyi etkilemesi durumunda önem kazanmaktadır. Özellikle alternatif akım ile çalışıldığında örnekleme sayısı daha da önemli olmaktadır. Şekil 3.4'te verildiği gibi 100 Hz'lik bir sinyali eğer 100 örnekleme saniyelik sistem ile ölçersek düz bir doğru görürüz. Ancak örnekleme sayısı arttıkça gerçeğe yakın bir grafiğin elde edildiği görülmektedir.



Şekil 3.4 Hz'lik bir sinyalin farklı örnekleme sayıları ile gösterimi (Ni.com, 2022)

Çözünürlük ile örnekleme sayısındaki ilişki şekil 3.5'teki diyagram ile gösterilebilir. Analog olarak giren veri analog-dijital çevirici yardımıyla okunur. Ancak burada okuma sıklığı çeviricinin örnekleme/çözünürlük oranına göre değişmektedir. Bazı sistemlerde örnekleme sıklığı arttıkça doğruluk ve Tekrarlanabilirlik düşmektedir. Bu yüzden ihtiyaç olan veri sayısı ve sıklığı ölçüm öncesinde belirlenmelidir.



Şekil 3.5 Çözünürlük ve örnekleme arasındaki ilişki (Ni.com, 2022)

Özetleyecek olursak, doğru bir analiz için veri sayısı, doğruluk, tekrarlanabilirlik, çözünürlük gibi limitlerden ihtiyacımız olanı belirlemeli ve test sistemini buna uygun şekilde kurmalıyız.

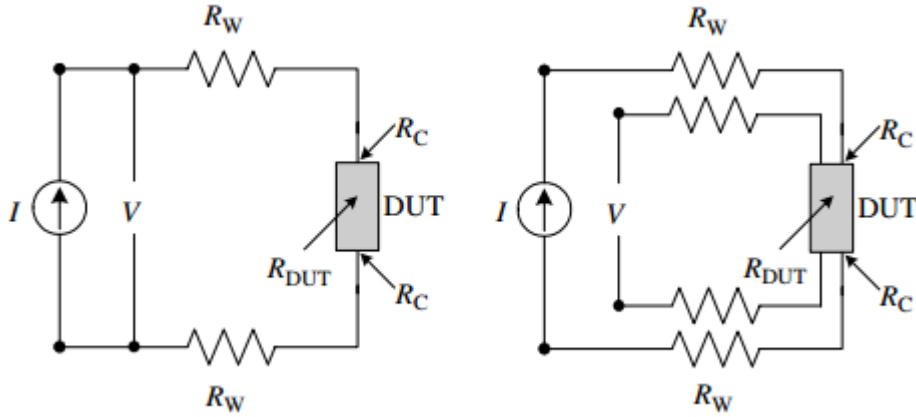
Bu tezde üretilen ince film transistörlerin elektriksel, optik ve yapısal karakterizasyonları yapılmıştır.

### 3.1 Elektriksel Karakterizasyon

#### 3.1.1 Kelvin (4-Wire, 4-Point) ölçüm metodu

Yarıiletkenin temel elektriksel özelliklerinden birisi özdirençtir. Özdirenç farklı noktalardan yapıldığında, ölçümler filmin homojenliği hakkında da bilgi verir. Daha sonra bahsedilecek olan Van der Pauw metodu bir filmin sahip olduğu tüm elektriksel özellikleri belirlemeye yetiyor olsa da gerekli düzeneklerin olmadığı ya da bazı karakteristik özelliklerin bilinmesine ihtiyaç olmadığı durumlarda yalnızca direnç ölçümü ile temel özellikler belirlenebilir.

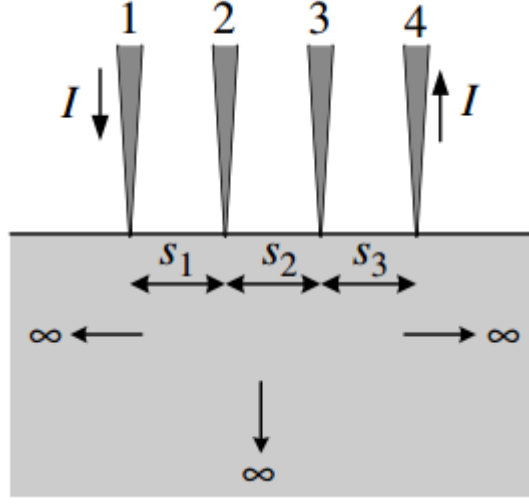
Malzemelerin özdirençini belirlemede 4 nokta metodu kullanılıyor olsa da 2 nokta metodu daha pratiktir ve kalibre edilmiş bir sistemle ölçüldüğünde doğru sonucu vermeye yeterlidir. Ancak 2 nokta metodunun dezavantajı ise tellerin ve kontak noktalarının direnci de ölçüme dâhildir (şekil 3.6).



Şekil 3.6 2-Nokta ve 4-Nokta metodu ile direnç ölçümü (Schroder, 2006)

$$R_T = \frac{V}{I} = 2R_W + 2R_C + R_{DUT} \quad (3.1)$$

Şekil 3.7'deki örnekte 4-nokta metoduyla öz direnci bulmak için öncelikle 2 ve 3 numaralı probelerin probe 1 ve probe 4'e göre voltajları bulunmalı.



Şekil 3.7 4-Nokta probe gösterimi (Schroder 2006)

$$V_2 = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_2+s_3} \right) \quad (3.2)$$

$$V_3 = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{s_1+s_2} - \frac{1}{s_3} \right) \quad (3.3)$$

Ölçülen toplam voltaj  $V = V_{23} = V_2 - V_3$  olacaktır.

Denklem 3.3'ü toplam voltaja göre düzenlersek;

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_2+s_3} - \frac{1}{s_1+s_2} + \frac{1}{s_3} \right) \quad (3.3)$$

Buradan  $\rho$  öz direnci denklem 3.4'te olduğu gibi gösterilir.

$$\rho = \frac{2\pi}{\left( \frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_2+s_3} - \frac{1}{s_1+s_2} + \frac{1}{s_3} \right) I} V \quad (3.4)$$

Eğer  $s=s_1=s_2=s_3$  ise denklem 3.5'i şu şekilde düzenleyebiliriz.

$$\rho = 2\pi s \frac{V}{I} \quad (3.5)$$

Ancak denklem 3.6'nın sınırlı boyutlardaki örnekler için de geçerli olması gereklidir. O yüzden bir düzeltme faktörü eklenmelidir.

$$\rho = 2\pi sF \frac{V}{l} \quad (3.6)$$

F düzeltme faktörü örneğin kalınlığına, homojenliğine, sıcaklığına ve probelara yerlerine bağlıdır. Eğer örneğin kalınlığı probelara arası boşluktan daha büyükse düzeltme faktörüne gerek kalmaz. Ancak ince filmlerin kalınlıklarının çok ince olması dolayısıyla düzeltme faktörü hesaplanmalıdır (Perloff, 1977; Algahtani et al., 2013).

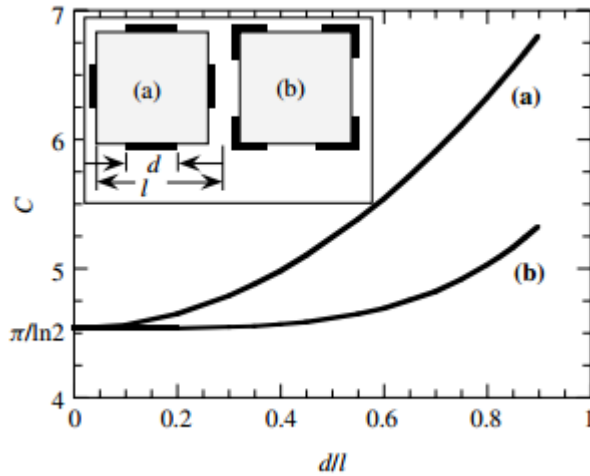
$$F = F_1 F_2 F_3 \quad (3.7)$$

$F_1$  örneğin kalınlığı için düzeltme faktürüdür,  $F_2$  eni ve boyu için düzeltme faktürüdür ve  $F_3$  ise probelara örneğin kenarlarına göre bulunduğu konumun düzeltme faktürüdür.

$$F_{11} = \frac{t/s}{2 \ln \{ [\sinh(t/s)] / [\sinh(t/2s)] \}} \quad (3.8)$$

$F_1$  için düzeltme faktörü denklem 3.8'de verildiği gibidir. Burada  $t$  örneğin kalınlığı  $s$  ise probelara arası mesafedir. İnce film örnekler için kontak noktaları köşelere yakın bölgelerden alındığında  $F_2$  ve  $F_3$  ihmal edilebilir ( $C$  düzeltme faktörü  $d/l$  için şekil 11). Denklem 3.8 ise denklem 3.9'a indirgenbilir (Webster, 2003).

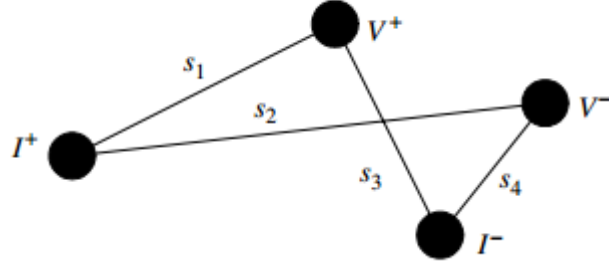
$$F_{11} = \frac{t/s}{2 \ln(2)} \quad (3.9)$$



Şekil 3.8. Köşelerden ve yanlardan kontak alınan örnekler için  $C$  düzeltme faktörü farkı (Versnel,

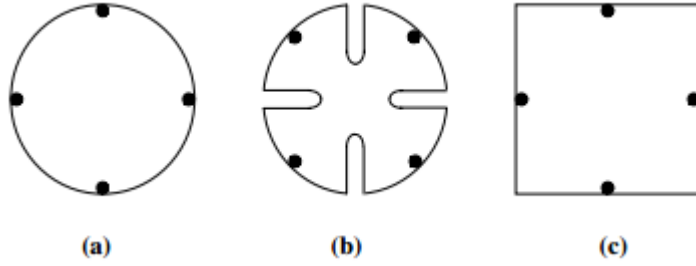
1978).

Kontak noktalarının simetrik alınmadığı örneklerde (şekil 3.9) denklem 3.10 kullanılabilir.



Şekil 3.9. Rastgele yerlerden alınmış 4 nokta kontak (Schroder 2006)

$$V = V_{12} - V_{34} = \frac{I\rho}{2\pi t} \ln \left( \frac{s_2 s_3}{s_1 s_4} \right) \quad (3.10)$$



Şekil 3.10. Simetrik örneklerde 4-Nokta metot gösterimi (Schroder 2006)

Simetrik şekle sahip örnekler için denklem 3.11 için yaklaşık çözüm yapılarak denklem 3.12 uygulanabilir.

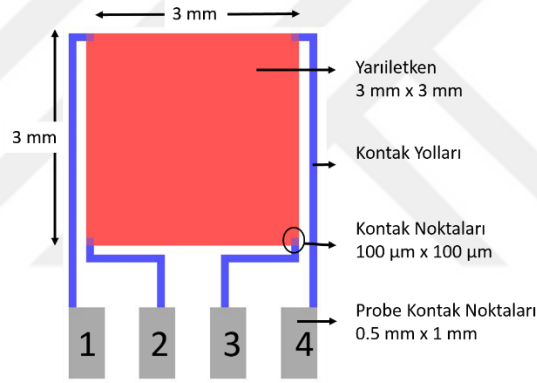
$$\rho = \frac{\pi}{\ln(2)} t \frac{V}{I} = 4.532 t \frac{V}{I} \quad (3.11)$$

$$R_{sh} = \frac{\pi R_{12,34}}{\ln(2)} = 4.532 R_{12,34} \quad (3.12)$$

### 3.1.2 Van der Pauw ölçümü

Van der Pauw metodu ile örneğin öz direnci, yarıiletken tipi, yüzey direnci, yük taşıyıcı yoğunluğu ve mobilitesi belirlenebilmektedir. Bu ölçümün doğruluk oranı filmin homojenliğine, kontak noktalarının yeri ve büyüklüğüne, ölçüm sırasındaki sıcaklık değişimlerine ve manyetik alanın düzgün dağılımlı olmasına bağlıdır.

Yaygın olarak kullanılan örnek şekilleri şekil 3.10'de verilmiştir. Sonuçlar kullanılan şekle bağlı olarak F düzeltme faktörü ile çarpılmaktadır. F düzeltme faktörü örneğin kalınlığına, en-boy oranına ve kontak noktalarının büyüklüğü ve konumuna bağlıdır. 3.10 (a) ve (b) için düzeltme faktörü 1'e yakındır ve işlemlere dâhil edilmez. Bu yüzden çoğu zaman herhangi bir aşındırma işlemi gerektirmeyen 3.10 (a) daha yaygın kullanılmaktadır.



Şekil 3.11 Van der Pauw ölçümü için bir tasarım

Şekil 3.11'de 3 mm x 3 mm yüzey alanına sahip yarıiletken üzerinde 100 µm x 100 µm'lik kontak noktaları vardır. Ölçümlerin yüksek doğruluk oranına sahip olması için kontak noktaları köşelerden alınmıştır ve küçük yüzey alanına sahiptirler.

Yüzey direnci ve öz direnç için 8 ölçüm gerçekleştirilmektedir ve aşağıdaki gibidir.

$$\begin{array}{cccc}
 R_{21,34} = V_{34}/I_{21} & R_{32,41} = V_{41}/I_{32} & R_{43,12} = V_{12}/I_{43} & R_{14,23} = V_{23}/I_{14} \\
 R_{12,43} = V_{43}/I_{12} & R_{23,14} = V_{14}/I_{23} & R_{34,21} = V_{21}/I_{34} & R_{41,32} = V_{32}/I_{41}
 \end{array}$$

Karşılıklılık teoremine göre

$$R_{32,41} + R_{23,14} = R_{14,23} + R_{41,32} \quad (3.12)$$

$$R_{21,34} + R_{12,43} = R_{43,12} + R_{34,21} \quad (3.13)$$

olmalıdır.

$$R_A = (R_{21,34} + R_{12,43} + R_{43,12} + R_{34,21})/4 \quad (3.14)$$

$$R_B = (R_{32,41} + R_{23,14} + R_{14,23} + R_{41,32})/4 \quad (3.15)$$

şeklinde tanımlanmışlardır.

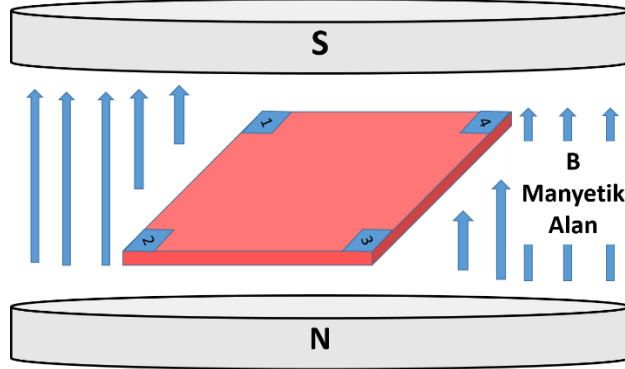
Bu eşitlikler denklem 3.5'te verilen yüzey direnci denkleminde yerine konularak  $R_S$  bulunur.

$$\exp\left(-\pi \frac{R_A}{R_S}\right) + \exp\left(-\pi \frac{R_B}{R_S}\right) = 1 \quad (3.16)$$

$$\rho = R_S d \quad (3.17)$$

$\rho$  burada öz direnç,  $d$  kalınlık ve  $R_S$  yüzey direncidir.

Mobilite ve yük taşıyıcı yoğunluğunu belirlemek için Hall etkisi ölçümü yapılmaktadır. Ölçümde manyetik alan örneğe iki farklı doğrultuda (aşağıdan yukarıya (pozitif), yukarıdan aşağıya (negatif)) uygulanmaktadır ve toplamda 8 ölçüm alınmaktadır.



Şekil 3.12 Hall etkisi ölçümü gösterimi

Hall etkisi ölçümünde pozitif manyetik alan için  $I_{13P}$ ,  $I_{31P}$ ,  $I_{42P}$  ve  $I_{24P}$  alınır ve buna karşılık gelen  $V_{24P}$ ,  $V_{42P}$ ,  $V_{13P}$ , and  $V_{31P}$  voltajları okunur. Aynı işlem negatif manyetik alan için de gerçekleştirilir.

$$V_C = V_{24P} - V_{24N}$$

$$V_D = V_{42P} - V_{42N},$$

$$V_E = V_{13P} - V_{13N} \quad V_F = V_{31P} - V_{31N}$$

$$V_C + V_D + V_E + V_F < 0 \text{ ise n-tipi yarıiletken}$$

$$V_C + V_D + V_E + V_F > 0 \text{ ise p-tipi yarıiletken}$$

Denklem 3.7’de,  $n_s$  yüzey yük taşıyıcı yoğunluğu,  $n$  yük taşıyıcı yoğunluğu,  $d$  kalınlık,  $I$  uygulanan akım,  $B$  ise uygulanan manyetik alandır.

$$n_s = \left| \frac{8 \times 10^{-8} \times I \times B}{q[V_C + V_D + V_E + V_F]} \right| \quad (3.18)$$

$$n = \frac{n_s}{d} \quad (3.19)$$

Elde edilen  $n_s$  ve  $R_s$  değerleri kullanılarak mobilite ( $\mu$ ) bulunur.

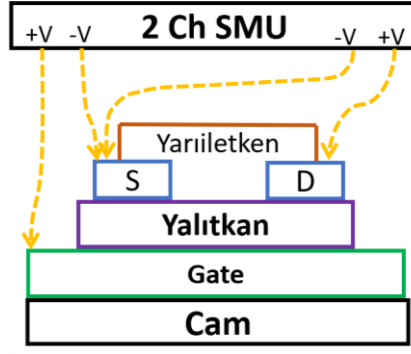
$$\mu = \frac{1}{qn_s R_s} \quad (3.20)$$

Tüm bu ölçümlerin bilgisayar aracılığıyla ölçülmesi ve hesaplanması için cihaz ayarları ve okuma/yazma olmak üzere iki bölümden oluşan bir program yazılmıştır.

### 3.1.3 TFT ölçümü

İnce film transistörlerde Drain-Source arasındaki voltaj farkını ayarlayacak ve Gate-Source arasındaki voltaj farkını ayarlayacak iki adet güç kaynağına ve bunlardan geçen akımları ve potansiyel farklılıklarını okuyacak iki adet de multimetreye ihtiyaç vardır. Kaynakmetreler ise güç kaynağı ve multimetrenin yaptığı işi bir arada yapabilen tek sistemdir. Bu tez çalışmasında kaynakmetre kullanılmıştır.

Drain ve Source arasındaki voltaj taramasını (süpürme, sweeping) gerçekleştirecek olan sistemin pulse özelliğinin olması TFT’nin durumuna göre avantaj sağlayabilir (Şekil 3.13)

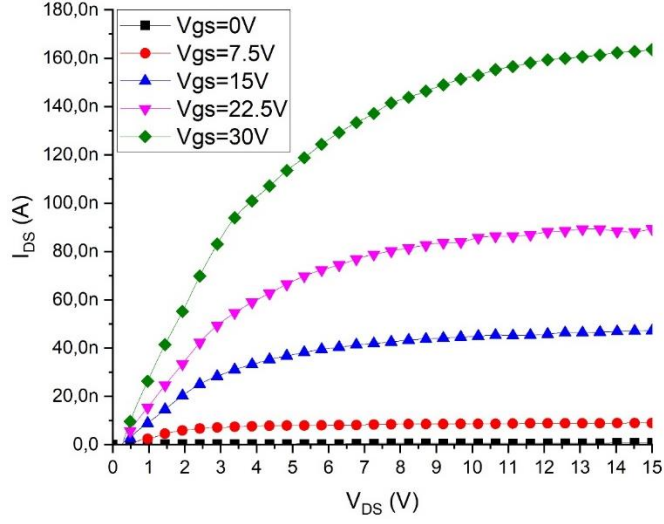


Şekil 3.13 TFT Bağlantı Şeması

Gate elektroduna bir potansiyel fark uygulayarak gate dielektriğinin polarize olmasını sağlamak ve bunu kademeli olarak artırmak gerekmektedir. Ancak gate elektroduna kaynakmetrenin bir ucunu tek başına bağlamak elektronik olarak bir anlam ifade etmemektedir. Bu yüzden bir referans potansiyel seçilmeli. Bu da çoğunlukla TFT'nin source elektrodu olmaktadır. Bu tez çalışmasında da Source elektrodu 0 V potansiyelde kabul edilmiştir (Şekil 3.13).

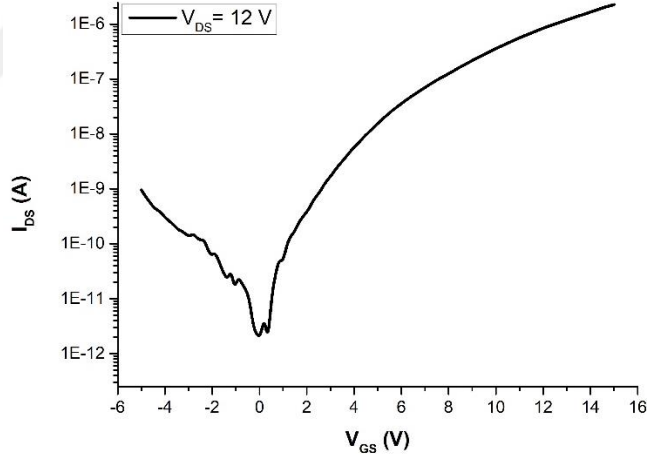
TFT ölçüm işleminde Gate elektrodu 0 V ile başlanıp artan voltajlarla test edilir. Çoğunlukla 5 farklı Gate gerilimi altında Drain-Source arasında tarama yapılır. Gate gerilimlerinin oransal şekilde artışı yaygın olarak kullanılıyor olsa da TFT'nin sensör olarak kullanıldığı uygulamalarda 0 V ve küçük bir aralıktaki 4 farklı gerilim de tercih ediliyor.

Şekil 3.14'te verilen grafik 0 gate voltajı ile başlamış ve 30 V'a kadar kademeli olarak artmıştır. 0 V, 7,5 V, 15 V, 22,5 V ve 30 V gate voltajlarında ayrı ayrı 0 V ile 15 V arasında Drain-Source arası taranmış ve ilgili voltaja karşılık gelen akım değerleri okunmuştur.



Şekil 3.14 Tez çalışmasında üretilen bir TFT'nin farklı gate gerilimleri altındaki  $V_{DS}$ - $I_{DS}$  grafiği

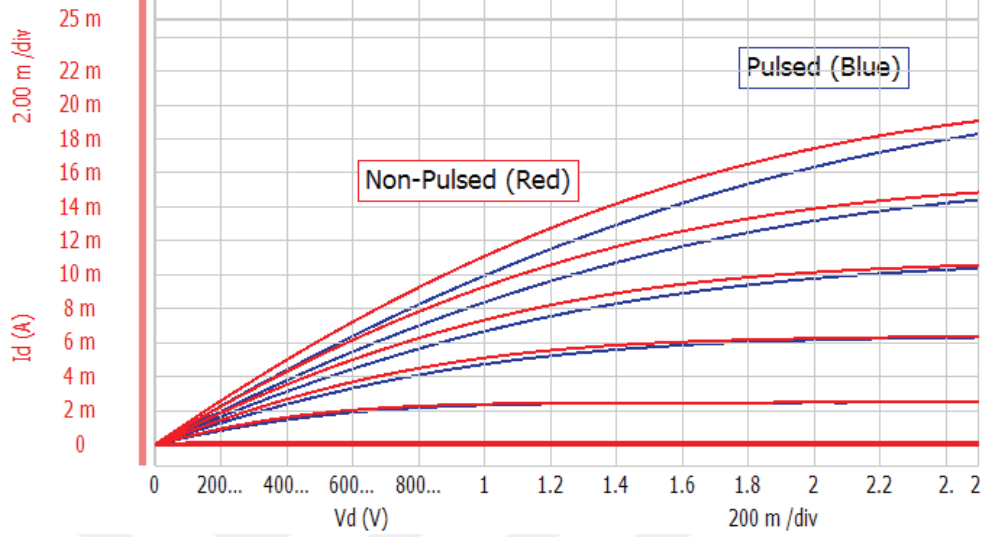
Şekil 3.14'teki grafik bize hangi  $V_{GS}$  gerilimi ve  $V_{DS}$  gerilimi altında ne kadar akım elde edilebileceğini göstermektedir. Aynı zamanda akımın hangi aralıkta sabit kalacağı bilgisini vermektedir. Bu da  $V_{DS}$  voltajındaki hareketlilikte ne kadar  $I_{DS}$  akımının değişeceğine veya sabit kalacağına dair bilgi vermektedir.



Şekil 3.15  $V_{DS} = 12$  V gerilim altında Logaritmik  $V_{GS}$ - $I_{DS}$  grafiği

Şekil 3.15'te verilen  $V_{GS}$ - $I_{DS}$  grafiği ise Drain-Source elektrotlarının saturasyonda olduğu bir değer olan 12 V sabit gerilim altında tutularak, Gate-Source arasında voltaj taraması yapılarak elde edilmektedir. Bu grafik ise TFT'nin çalışma voltajındayken  $V_{GS}$ 'ye verdiği tepkiyi ölçmek için kullanılmaktadır. Buradan on-off oranına, Subthreshold Swing (S)'e, Alan Etki Mobilitesine, transconductance'a ulaşılabilir.

Tüm bu verilerle transistörün tüm karakteristiği çıkarılmış oluyor ve kullanım alanına uygunluğu teorik olarak kontrol edilebiliyor. Bu verilerin çıkarılışı ile ilgili bilgiler Bölüm 2’de verilmiştir.



Şekil 3.16 Tarama sırasında pulse uygulanan ve uygulanmayan transistörün Id-VDS grafiği (Keysight, 2018)

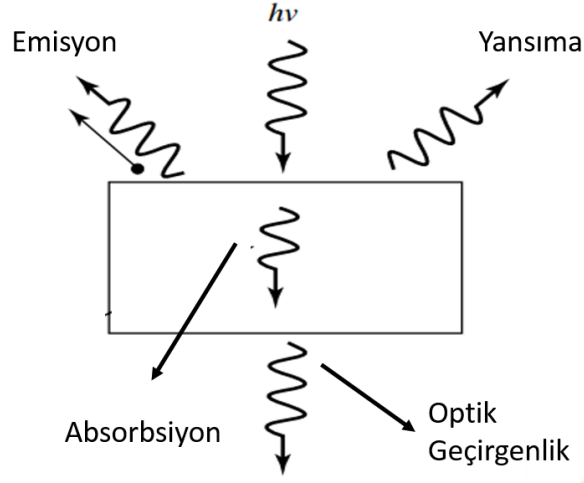
Şekil 3.16’da ise pulse ve DC ile yapılan ölçüm arasındaki farklılık verilmiştir. Pulse ölçümde VDS arasına sürekli gerilim uygulanmaz, anlık olarak uygulanır. Bu da ısınmanın önüne geçmektedir. DC ile ölçümde ise voltajda bir kesinti olmaz ve belirli oranda artırılarak devam edilir. Bu yarıiletkenin ısınmasına sebep olmaktadır. Isınan yarıiletken daha fazla akım geçirmekte ve ölçümde sapmalara sebep vermektedir. Hangi iki metodun kullanılması gerektiği hem TFT’nin kullanılacağı alana hem de yarıiletkenin özelliklerine bağlıdır.

### 3.2 Optik Karakterizasyon

Optik ölçümlerin çoğu zaman temas gerektirmemesi örneklerin her aşamada incelenmesine olanak sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında foto spektrometre ile TFT’yi oluşturan malzemelerin optik geçirgenlikleri incelendi, metalürjik mikroskop ile TFT’nin yapısı incelendi.

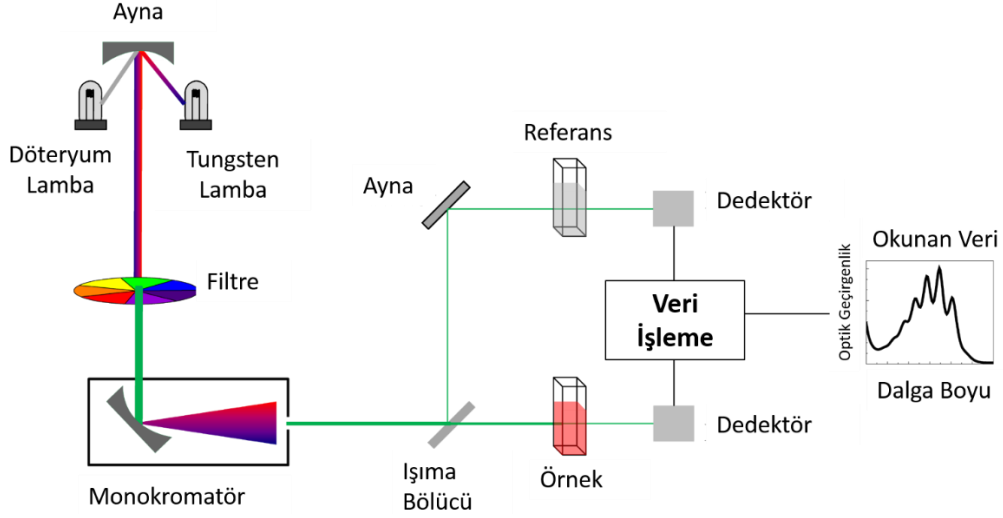
. Optik ölçümlerle örneklerin optik geçirgenlikleri, absorpsiyonları, yüzey pürüzlülükleri gibi özelliklerini incelenebilmektedir. Optik karakterizasyonda

yansıma, optik geçirgenlik, absorpsiyon, ve emisyon ölçümleri kullanılmaktadır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17 Üzerine ışık düşen bir örnekte gerçekleşebilecek optik olaylar

Şekil 3.18’de optik geçirgenlik ölçümünün nasıl yapıldığına dair bir şema verilmiştir. UV ışıma için çoğunlukla döteryum lambası kullanılmaktadır. Döteryum lambası 180 nm’den başlayan bir ışıma verebilmektedir. Halojen lamba ya da tungsten lambası ise ~300 nm’den başlayan bir spektrum vermektedir. Çeşitli lenslerle ışık şiddetleri ayarlanıp birleştirilerek optimum bir spektrum elde edilir. Daha sonra bir Monokromatör aracılığıyla her dalga boyu ayrı ayrı verilerek bir analiz yapılabilir ya da tüm dalga boyları aynı anda verilir ve bir kırınım lensi ile ışık dalga boylarına ayrılarak her dalga boyunun şiddeti ayrıca ölçülür. Optik geçirgenlik ölçümü çoğunlukla referans ve örneğin eş zamanlı test edilmesiyle yapılmaktadır. Buna karşın referansın 1 kere okutularak, diğer testlerin buna göre analiz edilmesi de diğer metotlardan birisidir. Bu tez çalışmasında ikinci yol olan referansın bir kere okutularak sonraki ölçümlerde bu değerlere göre analiz yapılmıştır.



Şekil 3.18 Optik karakterizasyon diyagramı

### 3.3 Yapısal Karakterizasyon

Yapısal karakterizasyon çoğu zaman malzemenin atomik boyutta ya da kristal boyutundaki incelemeleri için kullanılmaktadır. Ancak bu tez çalışmasında TFT'nin geometrik ve yüzey yapısını incelemek amacıyla kullanılmıştır. Makro ölçekte (1-500  $\mu\text{m}$ 'ye kadar) yapılan ölçümler optik mikroskop ile yapılmış olup, 1  $\mu\text{m}$ 'nin altındaki yapılar (yüzey durumu, mikro nano çatlaklar) ise atomik kuvvet mikroskobu ile yapılmıştır.

#### 3.3.1 Yüzey yapısının optik mikroskop ile incelenmesi

Tez çalışmasında kullanılan mikroskop metalürjik çalışmalar için uygun olup, üstten aydınlatmalıdır. Bright Field ile doğrudan TFT üzerine ışık düşürülerek inceleme yapılmıştır. Bu mod ile örneği ışık altında daha net inceleyebiliyor, kusurları 2 boyutta belli bir orana kadar tespit edebiliyoruz. Dark Field ise ışımının örneğe  $90^\circ$  açı ile değil de, farklı bir açı ile düşürülüp, çoğunlukla kenarlardan yansıyan ışımının gözlemlenebildiği bir moddur. Özellikle çok katmanlı yapılarda her katmanın kenarından yansıyan ışımının incelenebilmesi katmanlar hakkında bize bilgi verebilmektedir.

DIC (Differential interference contrast) modda ise ışık örnek üzere gelmeden önce iki farklı açıda polarize edilir. Örnek üzerine iki farklı açıda polarize ışık düşer ve örnekten yansıyan /geçen ışık lense gönderilir (bu iki farklı açıdaki ışık lense

toplanarak verilebilir). Bu da stereo mikroskoplarda olduğu gibi üç boyutlu gibi bir izlenim verir. Ancak gelen görüntü aslında iki farklı ışımının girişimidir.

### **3.3.2 Yüzey yapısının atomik kuvvet mikroskobu ile incelenmesi**

Yüzey pürüzlülüğünü ve nano ölçekteki deformasyonları incelemek için AFM kullanıldı. İki ince film katmanı arasındaki etkileşimi inceleyebilmek için yüzeyin durumunu bilmek gerekmektedir. Buna ek olarak üretim sırasında veya kullanılan camların belli bir standardının olmaması dolayısıyla yüzeyde nm/ $\mu$ m mertebesinde çukurlar veya tümsekler olabiliyor. Bu da katmanlar arasında kısa devre ya da çatlamalara sebep olabiliyor.

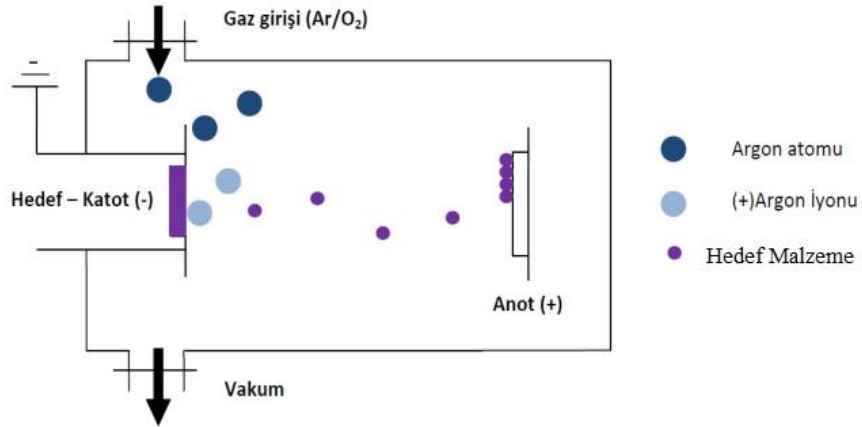


## 4. MİKROFABRİKASYON

### 4.1 İnce Film Kaplama

Fiziksel buhar biriktirme, kimyasal buhar biriktirme, döndürerek kaplama gibi birçok ince film kaplama metodu vardır. Bu tez kapsamında fizik bölümünde bulunan DC/RF magnetron sputtering (püskürtme) sistemi ve döndürerek kaplama sistemi kullanılmıştır.

DC/RF sputtering sistemi içerisine gönderilen gaz anot ile katot arasındaki fark dolayısıyla iyonlaşır ve yüklü bir parçacık haline gelir. Bu yüklü parçacıklar elektrik alan yardımıyla belirli bir doğrultuda hızlandırılırlar ve bu parçacıklara bir momentum/enerji kazandırılır. Belirli bir eşik enerjisinin üzerindeki parçacıklar hedef malzemeye çarptığında momentumlarının bir kısmını hedef malzemeyi oluşturan parçacıklara aktarırlar ve bazı parçacıkların hedef malzemeden kopmasını sağlarlar. Bu işleyiş sputter mekanizmasının temel işleyiştir. Eğer bu biriktirme işlemi sistem içerisinde oluşan plazmanın manyetik alan yardımıyla bir bölgede toplanması ya da yönlendirilmesiyle gerçekleşiyorsa bu sistem de Magnetron sputter sistemi olarak adlandırılır.

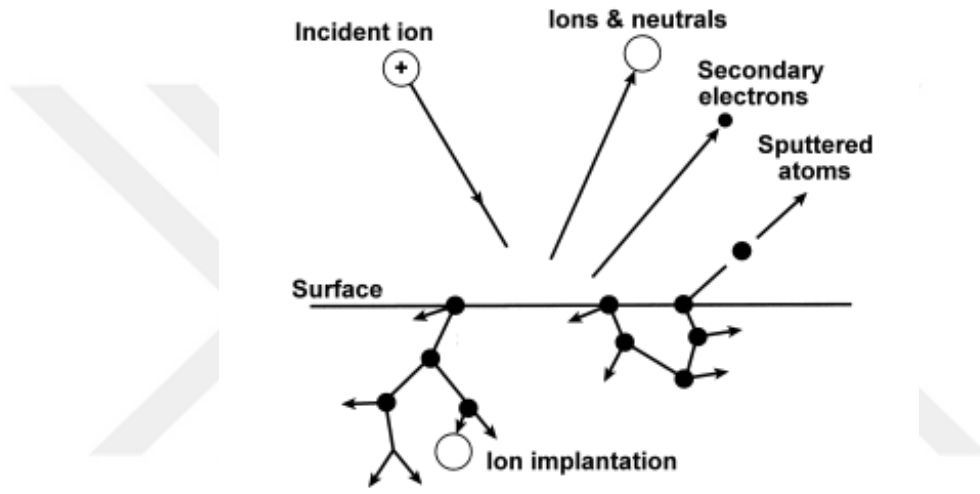


Şekil 4.1. Sputter sistem temsili (Uzun, 2015)

DC/RF sputtering sistemi tam verimlilikle çalışmamaktadır. Bunun bazı sebepleri iyonlaşan atomların hedef malzeme üzerinden yansması, hedef malzemeden parça koparacak enerjiye sahip olmamaları, iyonlaştıktan sonra tekrar nötralle olmaları olabilir. Bununla birlikte kullanılan gazın reaktif olması

durumunda malzeme ile etkileşime girip farklı bir malzeme oluşumuna sebep olabilirler, hedef malzeme içerisine gömülebilirler.

Hedef malzemeye çarptırılan iyonlar altaşa parça püskürtmek üzere yönlendirilmiş olsa da tamamı altaş doğrultusunda gitmemektedir. Sputtering kaynağına bağlı olmakla birlikte genel olarak belirli bir çaptan sonra birikme giderek azalmaktadır. Tüm bunlara ek olarak kopan parçacıkların altaşa tutunacak enerjisinin olmaması da sistemin verimliliğini azaltmaktadır.



Şekil 4.2. İyon ile yüzey arasındaki etkileşimler (Colligon, 1984)

Uygulanan voltaja göre sputter mekanizması ikiye ayrılabilir; DC sputtering (doğru akım) ve RF sputtering (radyo frekansı).

Direnci 10 kOhm'a kadar olan malzemelerde potansiyel altında polarizasyon düşük olduğu için DC sputtering tekniği kullanılır. Daha yüksek dirence sahip malzemelerde ise RF sputtering tekniği kullanılmaktadır (Sarkar, 2014). Bu tezde kullanılan RF/DC magnetron sputtering sisteminde her iki kaynak bulunuyor olsa da RF tercih edilmiştir.

## 4.2 Litografi

Fotolitografi belirli bir dalga boyu aralığındaki ışığa duyarlı fotorezistin bir kısmının ışığa maruz bırakılarak kimyasal yapısının değiştirilmesi ve kaldırılmasıyla gerçekleşmektedir (pozitif fotolitografi). Laboratuvarında kullanılan

i-line maske hizalayıcı yüksek yoğunlukta 350 nm dalga boyunda UV ışımaya maruz kaldıklarında kimyasal yapılarında değişimler meydana gelmekte ve “developer” ile kimyasal tepkimeye girerek kalkmaktadırlar. UV ışımaya maruz kalmayan bölgeler ise ince filmi aşındıracak olan asitlere dayanıklı olup, altındaki ince filmi koruyarak desenlenmesini sağlamaktadırlar.

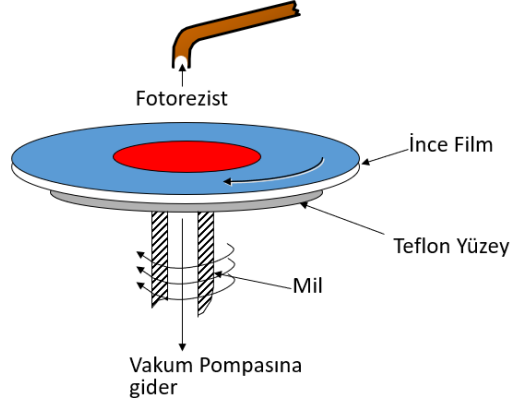
Şekil 4.3'teki gösterimde film 6000 RPM/min devir ile dönebilen spinner (döndürücü) üzerine bir yerleştirilmiştir. Film yerleştirildiği Chuck'da (tutucu) spinner'a bağlı olan vakum pompası ile sabitlenmektedir. Film 6000 RPM/dk devire ivmelenecek dönerken üzerine kimyasal aşındırma için uygun olan fotorezist dökülür ve üzerinde 0.5-2 um kalınlığında fotorezist tabakası oluşur. Devir sayısı ve fotorezistin çeşidi kullanılacak işleme bağlıdır. İyon tabancası ile bir aşındırma yapılacak olduğunda fotorezist tabakasının kalın olması istenir (2 um). Kimyasal aşındırma ile desen oluşturulacak ve desenlerin eni/boyu küçük ise daha ince bir (0.5 um) fotorezist tabakası oluşturulur.

Kaplanan fotorezist sıcak zemine bırakılır (hot plate) ve seyreltilmiş olan fotorezist içerisindeki ultraviyole ışımaya duyarlı moleküllerin bağ yaparak daha katı bir forma girmesi sağlanır. Sıcak zeminin sıcaklığı kullanılan fotoreziste bağlı olarak değişmekle birlikte 90-125 °C aralığındadır. Burada fotorezistin kullanım talimatlarında belirtildiği süre kadar (50 – 120 sn) kalan fotorezist ultraviyole ışımaya maruz bırakılacağı maske hizalayıcıya koyulmak üzere soğumaya alınır.

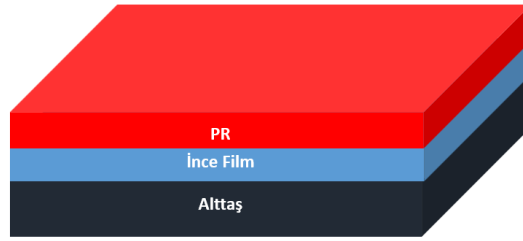
Maske hizalayıcı içerisindeki UV ışımaya optik düzene sayesinde maskeye dik ve dağılmadan göndermektedir. Fotorezist kaplı ince film maske hizalayıcıya yerleştirildikten sonra üzeri maske ile kapatılır ve fotorezistin bir kısmı UV ışımalarından korunur. UV ışımaya bir süre maruz kalan fotorezistin kimyasal yapısında değişiklikler meydana gelir ve bu değişiklik meydana gelen bölgeler developer ismi verilen kimyasal ile tepkimeye girebilir hale gelmektedir.

Maske hizalayıcıda bir kısmı UV ışımaya maruz bırakılmış ince film, developer kimyasalı içerisine konarak UV'ye maruz kalan kısımların kalkması beklenir. Uzun süre developer içerisinde kalırsa UV'ye maruz kalmamış bölgelerin şeklinde de bozulma meydana gelebilir. Kısa süre kalırsa kimyasal tepkime tam olarak gerçekleşmediği için kimyasal aşındırma işlemiyle kalkması gereken bölgeler

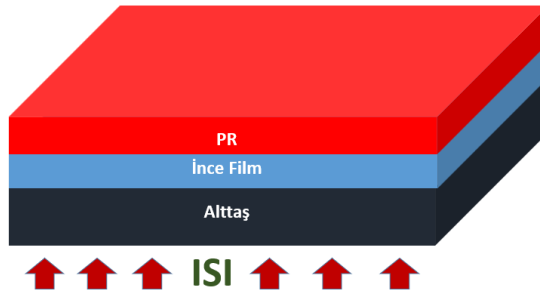
üzerinde fotorezist kalır ve bu bölgeler ince filmi kimyasal aşındırma işleminden koruyarak istenen desenin elde edilememesine sebep olur. UV'ye maruz kalan bölgelerin kalkmasının ardından son bir ısıtma işlemine tabi tutulur. Bu ısıtma işlemi fotorezistin asite daha dayanıklı olmasını sağlamaktadır ve çoğu zaman ilk ısıtma işleminden daha uzun süre kalması gerekmektedir.



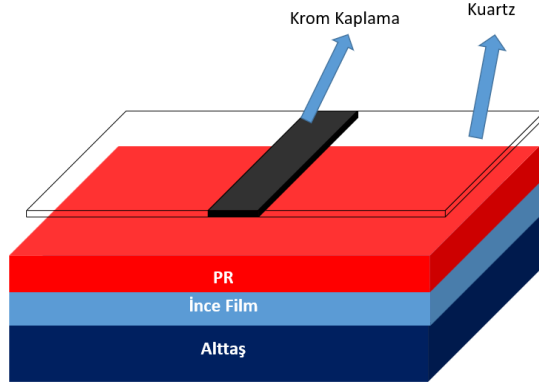
Şekil 4.3 Spin coater (döndürerek kaplama) işlemi ile fotorezist kaplama



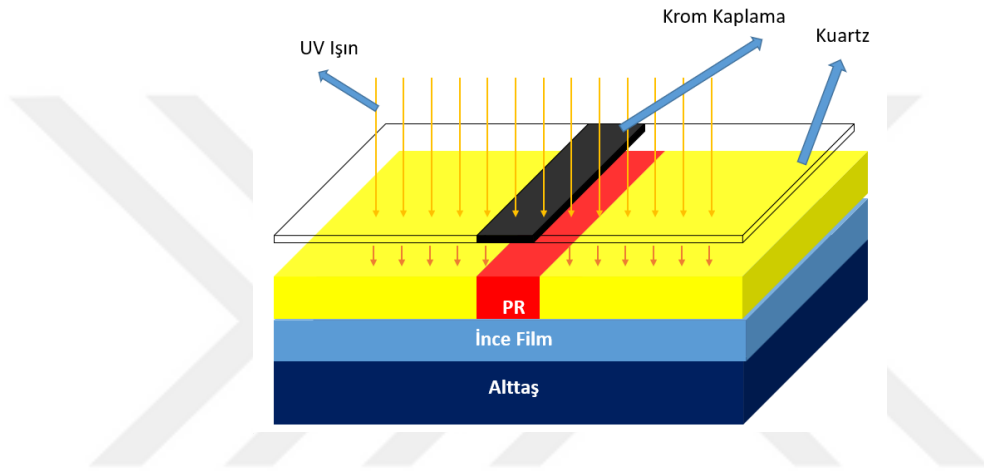
Şekil 4.4 İnce film üzerine fotorezist kaplanması sonrası durum



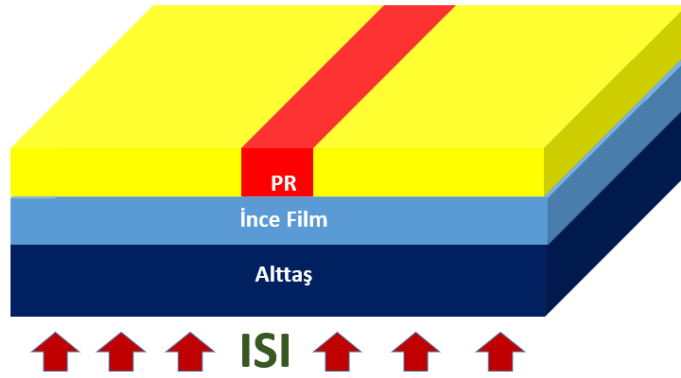
Şekil 4.5 Fotorezistin üreticinin belirttiği sıcaklıkta ısıtılarak sertleştirilmesi



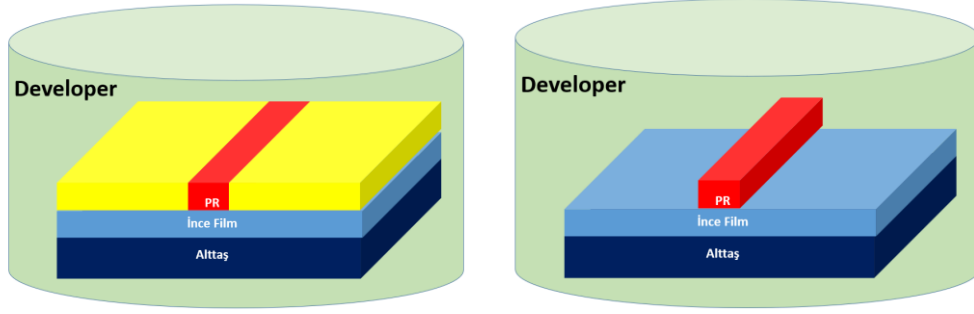
Şekil 4.6 İstenilen desene ait maske fotorezist üzerine yerleştirilir



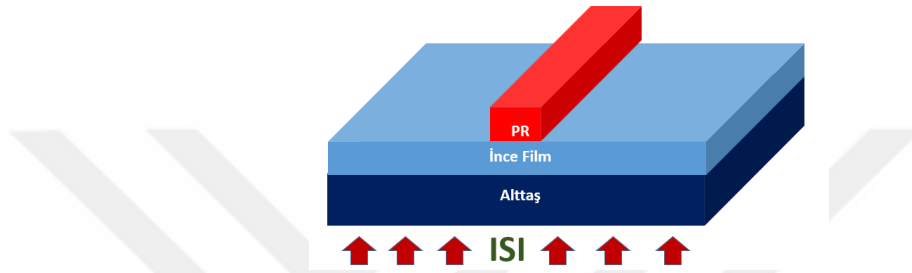
Şekil 4.7 Fotorezistin duyarlı olduğu dalga boyunda UV ışına maskeye dik olarak verilir



Şekil 4.8 UV gören ve görmeyen kısımların birbirinden ayrılmasını kolaylaştıran pozlama sonrası ısıtma



Şekil 4.9 UV ışına görmüş fotorezistin "developer" isimli çözüme daldırılarak yok edilmesi işlemi



Şekil 4.10 Fotorezistin aşındırma işlemi sırasında kalkmaması için son bir ısıtma işlemi uygulanır

Tez çalışmasında çoğunlukla AZ6632 fotorezist kullanılmıştır. AZ6600 serisi fotorezistlerin kimyasal aşındırma işlemine karşı dayanıklılığı oldukça yüksektir.

	AZ 6612	AZ 6615	AZ 6618-2DG	AZ 6624	AZ 6632
<b>Solids content [%]</b>	26.5	29.0	30.1	32.0	35.0
<b>Viscosity [cSt at 25°C]</b>	19.0	27.7	34.3	58.5	82.0
<b>Absorptivity [l/g*cm] at 398nm</b>	1.20	1.29	1.52	1.42	1.52
<b>Solvent</b>	methoxy-propyl-acetate (PGMEA)				
<b>Max. water content [%]</b>	0.50				
<b>Spectral sensitivity</b>	310 - 440 nm				
<b>Coating characteristic</b>	striation free				
<b>Filtration [µm absolute]</b>	0.1			0.1	0.2
<b>Na, K, Cu, Fe-content</b>	≤ 1 ppm				

Şekil 4.11 AZ6600 serisinin fiziksel ve kimyasal özellikleri. Bu veriler MicroChemicals firmasından alınmıştır.(Microchemicals, 2022)

<b>spin speed [rpm]</b>	2000	3000	4000	5000	6000
<b>AZ 6612</b>	1.70	1.39	1.20	1.07	0.98
<b>AZ 6615</b>	2.12	1.73	1.50	1.34	1.22
<b>AZ 6618-2DG</b>	2.55	2.08	1.80	1.61	1.47
<b>AZ 6624</b>	3.39	2.77	2.40	2.15	1.96
<b>AZ 6632</b>	4.53	3.70	3.20	2.86	2.61

Şekil 4.12 AZ6600 serisinin döndürerek kaplama metoduyla elde edilen kalınlıkları verilmiştir. Bu

veriler MicroChemicals firmasından alınmıştır(Microchemicals, 2022)

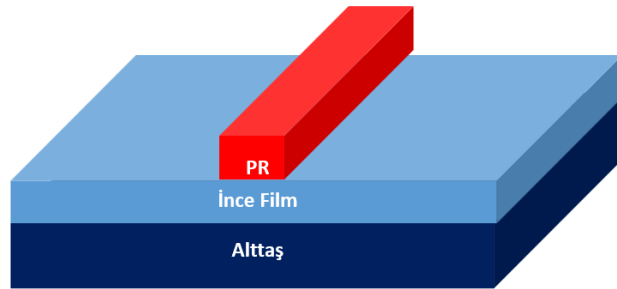
<b>Dilution and edge bead removal</b>	AZ EBR Solvent
<b>Prebake</b>	110°C, 50s, hotplate
<b>Exposure</b>	broadband, g- and h-line
<b>PEB</b>	not required, optional with monochromatic exposure
<b>Development</b>	AZ 726 MIF, stream-puddle, 30 - 50s
<b>Postbake</b>	125°C, 50s hotplate or 30 min. oven
<b>Removal</b>	AZ 100 Remover, conc.

Şekil 4.13 Pozlama, ısıtma ve "developer" uygulama prosedürü. Bu veriler MicroChemicals firmasından alınmıştır.(Microchemicals, 2022)

### 4.3 Aşındırma ve Kaldırma

İlk aşama olan fotolitografi işlemi film yüzeyinde ya da substrate yüzeyinde desenleme işlemidir. Sonraki aşama ise aşındırma (etching) ya da kaldırma (lift-off) işlemidir. Aşındırma kaplanan ince filmin yüzeyden bir solvent ya da iyonlar aracılığıyla yok edilmesi işlemidir. Kaldırma işlemi ince filmin üzerine yapıldığı fotorezist ya da başka bir tampon ince filmin kaldırılması ile meydana gelmektedir.

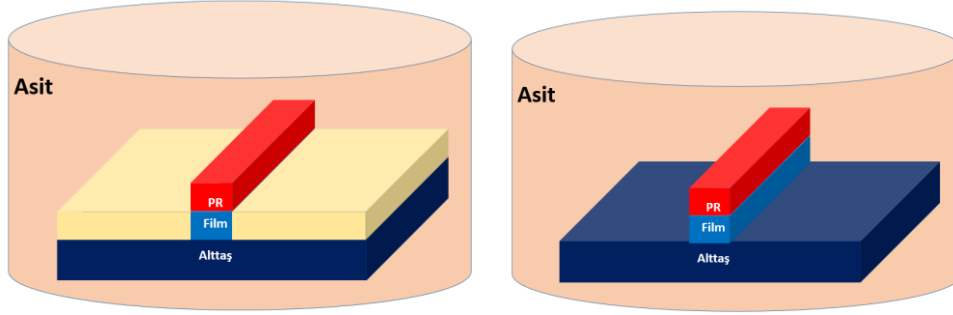
Aşındırma işlemi için ilgili desen fotorezist ile film yüzeyinde oluşturulur. İstenen desenin film üzerinde oluşturulmasına pozitif fotolitografi, istenen desenin tersinin film üzerinde oluşturulmasına ise negatif fotolitografi denir.



Şekil 4.14 Fotolitografi işlemi sonrası film üzerine işlenmek istenen fotorezist deseni

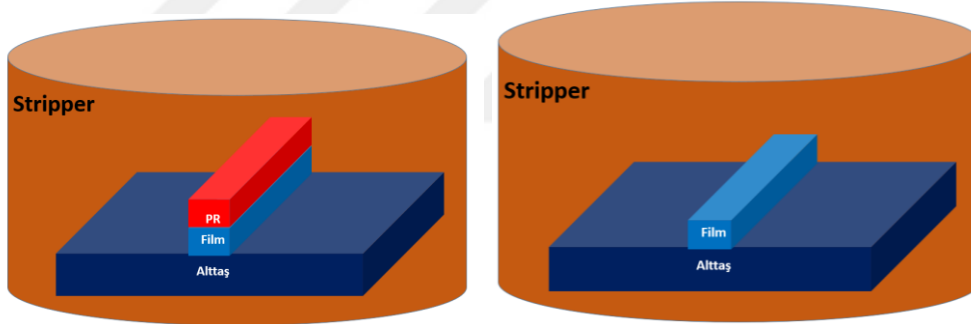
Şekil 4.15'te istenen yüzeyi fotorezist ile korunan ince film ilgili asit çözeltisi içine daldırılmış ve ince film asit içerisinde çözünmüştür. Bu tez çalışmasında ITO için HCl:HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O (3:1:1) asit çözeltisi, IGZO için HCl:H<sub>2</sub>O (1:10) ve SiO<sub>x</sub> için

ise HF: H<sub>2</sub>O (1:10) asit çözeltisi hazırlanmıştır. Kullanılan asitlerin konsantrasyonları ve aşındırma süreleri ile ilgili bilgiler bölüm 5’te verilmiştir.



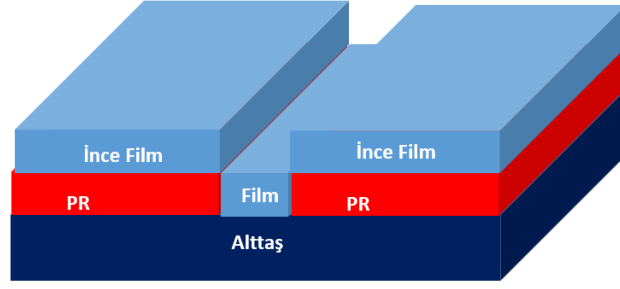
Şekil 4.15 Film yüzeyinin belirli bir kısmı fotorezist tarafından korunurken, geri kalan kısmı asit içerisinde çözünür

Fotorezisti kaldırma için “Stripper” adı verilen fotoreziste özel bir solüsyon kullanılır. Ancak Aseton, tolüen gibi çözüenler de fotorezistin temizlenmesini sağlamaktadır. Burada önemli olan fotorezisti çözdüğümüz kimyasalın ince filmimize zarar vermemesidir.



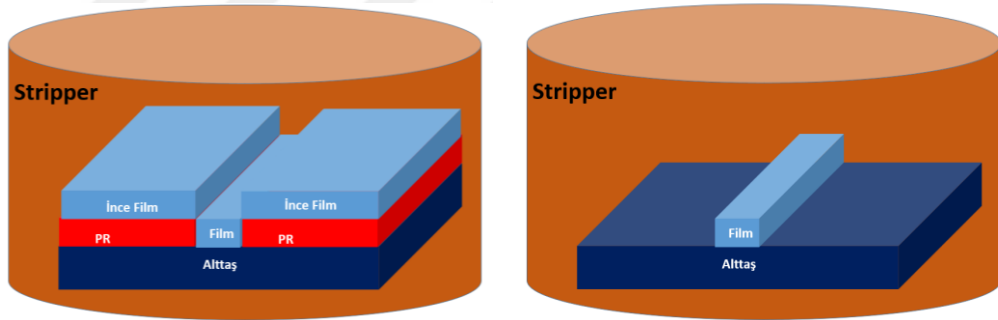
Şekil 4.16 Fotorezistin film yüzeyinden kaldırılması

Kaldırma işlemi ise aşındırma işleminden farklıdır. Burada ilk olarak fotorezist substrate üzerine kaplanır ve ilgili desen oluşturulur. Ardından fotorezist üzerine ince film kaplaması yapılır. Kaldırma işleminde genelde negatif fotorezist kullanılır ya da istenen maskenin negatifi pozitif fotorezist ile kullanılır. Şekil 4.17’de ortası açık bırakılan fotorezist deseni üzerine ince film kaplaması yapılmıştır. İnce film ortadaki boşlukta doğrudan substrate üzerine kaplanmışken diğer taraflarda ise fotorezist üzerine kaplanmıştır.



Şekil 4.17 Fotorezist üzerine ince film kaplaması

Şekil 4.18’de stripper içerisinde konan ince film ve fotorezist yapısı, fotorezistin stripper içerisinde çözünmesi dolayısıyla üzerindeki filmle birlikte substrate yüzeyinden kalkmaktadır ve yalnızca ortadaki ince film kalmaktadır. Bu metotta ince filmin aşındırılmasına yönelik bir adım olmadığı için görece daha kolay bir üretim metodudur. Ancak kalkma sırasında ince film kenarlarından kırılabilen ya da yüzeye tekrardan yapışabilmektedir. Bu da çok katmanlı yapılarda kısa devre, çatlama gibi problemlere sebep olabilmektedir.

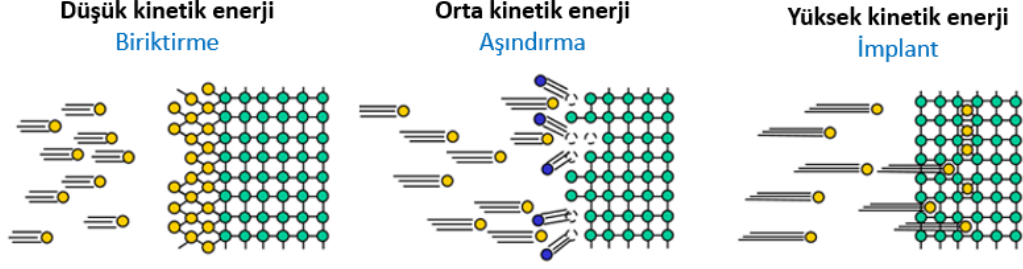


Şekil 4.18. Stripper ile fotorezistin kaldırılması işlemi

Kimyasal ile aşındırma tekniğinden farklı olarak bir de kuru aşındırma tekniği vardır. Bu tez çalışması kapsamında iyon tabancası ile aşındırma kullanılmıştır. Bu aşındırma tekniği de sputtering işlemine benzemektedir. Sisteme gönderilen gazlar iyonlaştırılır ve hızlandırılır. Farklı olarak hedef malzeme üzerine değil, aşındırma yapılacak malzeme üzerine yönlendirilirler. Yönlendirilen iyonlar iyon tabancasından çıkmadan önce nötr hale getirilebilir (veya nötr hale getirilmeyip yüklü halde substrate üzerine gönderilirler).

Şekil 4.19’da verilen görselde parçacıkların hızının düşük olması durumunda filmde parça koparamayıp yüzeye yapıştığı görülmektedir. Bu işleme biriktirme

işlemi adı verilmektedir. Eğer parçacıkların kinetik enerjisi çok yüksek ise yüzeyden parça koparmayıp doğruca film içerisine gömülürler. Bu işleme de implantasyon adı verilmektedir. Ortalama bir kinetik enerjiye sahipse ince film yüzeyine çarpan parçacıklar momentumlarının bir kısmını aktarır ve ince filmde parçacık koparılır. Bu işleme de kuru aşındırma (dry etching) adı verilmektedir.



Şekil 4.19 İyon tabancası ile biriktirme, aşındırma ve implantasyon işlemlerinin nasıl gerçekleştiğini gösteren diyagram

İyon tabancası ile yapılan kuru aşındırma tekniği doğrusal bir şekilde aşındırma yapmaktadır. Parçacıkların ilerleme yönüne dik tüm yüzeylerden eşit yüzeyde aşındırma yaptığı için açılı işlem yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında daha çok bu özelliği kullanılmıştır. Aynı zamanda bu işlemin seçici bir aşındırma işlemi olmaması dolayısıyla tüm yüzeylerden belirli oranlarda aşındırma gerçekleşmiştir. Aşındırılacak malzemenin yapısına göre aşındırma oranı değişmektedir. Aynı malzemenin kristal yapısı ile amorf yapısı arasında aşındırma oranları farklıdır. Bu da parçacıkların momentumunu yüzeye ne kadar aktarabildiğiyle ilişkilidir.

## 5. DENEY TARTIŞMA

Doktora süresince, test sisteminin geliştirilmesi, test sistemi ile ilgili yazılımların geliştirilmesi, ince filmlerin üretilmesi, çok katmanlı yapıların üretilmesi ve test analiz işlemlerinin yapılması çoğu zaman paralel olarak yürütülmüştür. Ancak tez devamlılığının sağlanması açısından belli bir sıralamaya koyulmuştur.

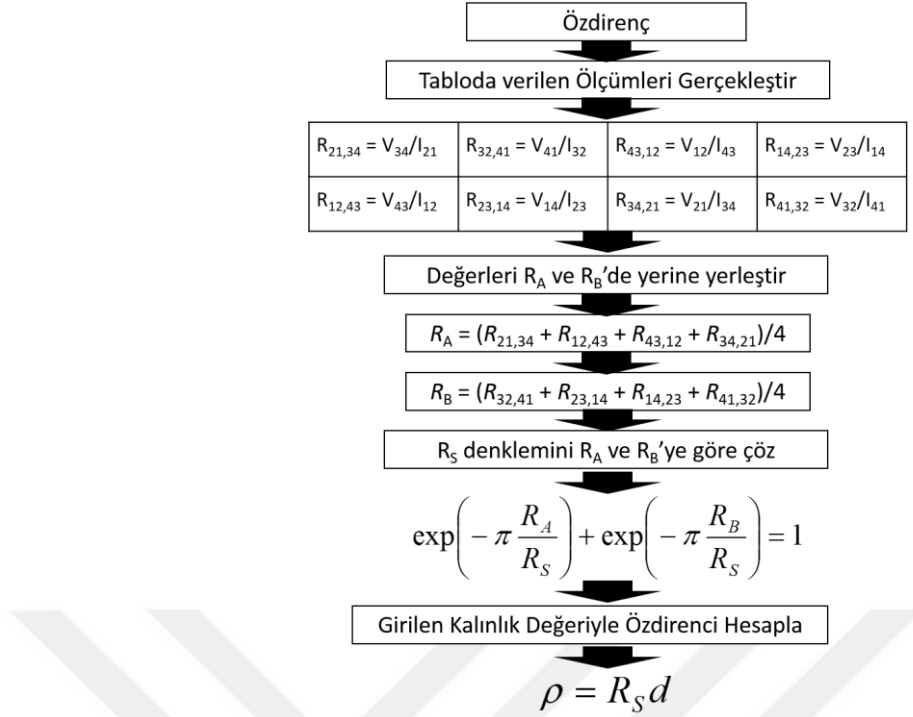
### 5.1 Yazılımın Geliştirilmesi

İnce filmlerin ve ince film transistörün elektriksel ölçümlerinin yapılabilmesi için National Instruments firmasına ait LabVIEW yazılımı ile test & analiz yazılımı geliştirilmiştir (*Labview Yazılımı Lisansı Mikrofab Şirketine ait olup, şirkete ait PC kullanılmıştır*).

Tez süresince yarıiletkenin elektriksel analizleri için Keithley 2401, TFT'nin elektriksel analizleri için Keithley firmasına ait 2614B (SourceMeasure Unit) (Şekil 5.3) kullanılmıştır. Bununla birlikte optik analizler Leica DM6000 Metalürjik Mikroskop ve Ocean Optics firmasına ait optik spektrometre de kullanılmıştır.

Yarıiletkene ait elektriksel özelliklerin test edileceği yazılımda şekil 5.1'de verilen algoritma kullanılmıştır. Bu algoritma ile kullanıcı öz direnç ya da yük taşıyıcı yoğunluğu ölçümlerinden birisini veya her ikisini seçerek işleme başlamaktadır. Her ikisinin de seçilmesi durumunda bu iki sonuca bağlı olan mobilite değeri de elde edilebilmektedir.

İnce film transistörün kullanılacağı Kullanıcı voltaj veya akım hassasiyetlerini kendisi belirleyebildiği gibi otomatik olarak da bırakabilmektedir. Çoğu zaman otomatik tercihi daha kolay ve doğru sonuçlar verse de ölçüm aralığının değiştiği (1, 10, 100 uA, 1, 10, 100 mA, 1A ve 210 mV, 2.1 V, 21V, 200V) aralıklarda beklenmeyen veriler verebilmektedir. Bu yüzden bu kısım kullanıcı seçimli bırakılmış olup, varsayılan değeri otomatiktir.



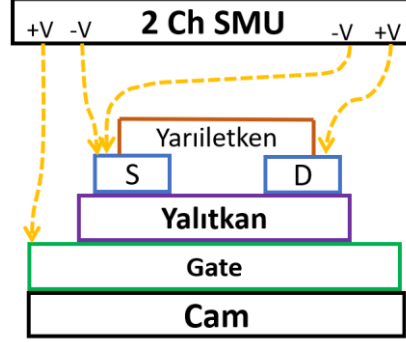
Şekil 5.1 Özdirenç ölçüm algoritması (Kuran, 2015)

Ardından akım ve voltaj koruma limitlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu limitler hem üretilen ince filmin ya da transistörün korunması için gerekli hem de operatöre gelebilecek zararları engellemek için eklenmiştir. Örneğin maksimum akım taşıma kapasitesi 100 uA olan bir transistöre yüksek gerilim altında 1A geçirmek transistörü kullanılmaz hale getirebilmektedir. Bununla birlikte 200V ve 1A'lık bir güç uygulanması sırasında kullanıcının kazara test sistemine teması hem kullanıcıya hem de sisteme zarar verebilir. Bu gibi durumlar için buna benzer test sistemlerinde çeşitli limitler ve koruma önlemleri bulunmaktadır.

Tüm bu konfigürasyonlardan sonra araştırmacı test edilecek örneğe uygulanacak akım ve voltaj değerlerini seçerek işleme başlamaktadır. Hem özdirenç hem de yük taşıyıcı yoğunluğunun seçildiği durumda yazılım Van der Pauw metoduyla önce özdirenç, ardından yük taşıyıcı yoğunluğunu bulmaktadır (kullanıcının seçtiği manyetik alan değeri altında). Buradan mobilite değeri otomatik olarak hesaplanabilmektedir.

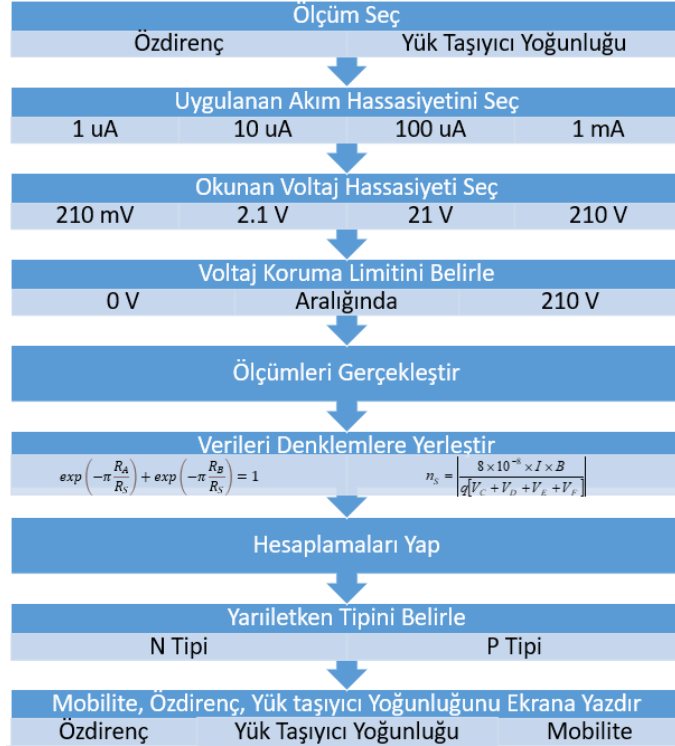
TFT ölçümleri için bu tezde 2 kanallı Keithley 2614B Kaynakmetre (SourceMeter Unit, SMU) kullanılmıştır. Şekil 5.3'te verilen şemada 1. Kanalın pozitif çıkışı (Output High) TFT'nin Drain kontağına, negatif çıkışı (Output Low) Source kontağına bağlandı. Bu şekilde Drain-Source arasında Voltaj tarama

(Voltage sweeping) yapıldı. Gate voltajının ise belirli bir seviyede tutulması için 2. Kanalin negatif voltajı (Output Low) Source kontağı üzerine bağlandı. Pozitif ucu ise (Output High) Gate kontağına bağlandı. (Burada laboratuvarında bulunan 2 kanallı bir Kaynakmetre tercih edilmiştir ancak 2 tane güç kaynağı veya SMU da aynı bağlantılarla kullanılabilir)



Şekil 5.2 Keithley 2614B Çift Kanallı 200V, 10A KaynakMetre kullanılarak yapılan TFT ölçümlerinin bağlantı şeması

Yarıiletken filmin elektriksel özelliklerinin incelendiği ve tablolandığı bir yazılım da geliştirilmiş olup, duruma göre kullanıcının voltaj ve akım değerlerini kendisinin yazdığı veya bir test kartı ile otomatik olarak yaptırabildiği arayüz geliştirilmiştir. Bununla ilgili algoritma şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.3 Ölçüm algoritması (Kuran, 2015)

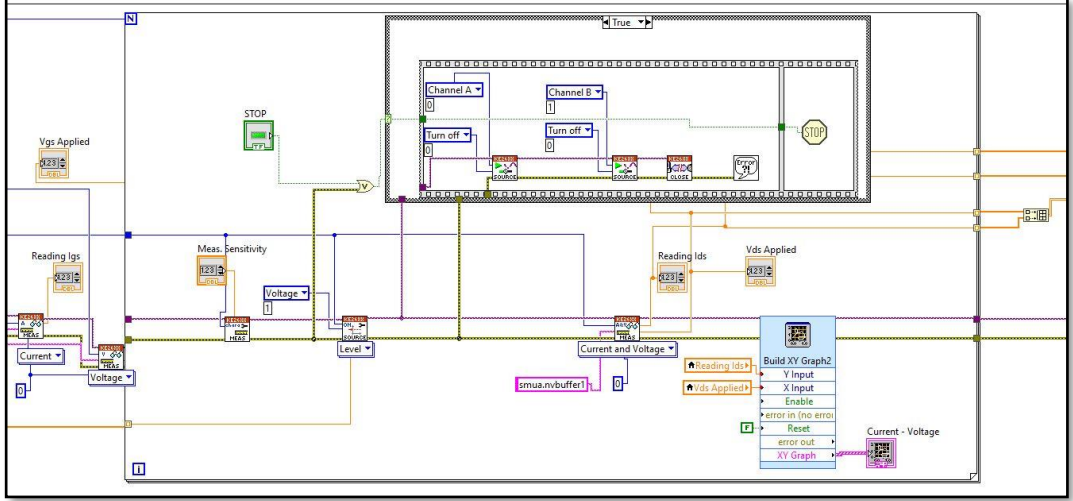
Şekil 5.4’te verilen resimde Van der Pauw ölçümü için geliştirilmiş yazılımın arayüzünden bir kesit vermiştir. Ölçüm hassasiyeti sisteme bağlanan SMU’ya bağlıdır. Resimdeki örnekte Keithley 2401’e 1 mA akım verilmesi için komut verilmiş olup, 0.999974 mA akım değeri okunmuştur. Hesaplamalar okunan değerlere göre yapılmaktadır.

Resistivity and Sheet Resistance			Carrier Density and Sheet Carry Density			Ra Rb				
Current 21 (A) 0	Voltage 34 (V) 0	Resistance 21,34 (Ohm) 0	Current 13 (A) P 0	Voltage 24 (V) P 0	Resistance 13,24P 0	0	0			
Current 12 (A) 0	Voltage 43 (V) 0	Resistance 12,43 (Ohm) 0	Current 31 (A) P 0	Voltage 42 (V) P 0	Resistance 31,42P 0	Homogeneity (%) 0				
Current 32 (A) 0	Voltage 41 (V) 0	Resistance 32,41 (Ohm) 0	Current 42 (A) P 0	Voltage 13 (V) P 0	Resistance 42,13P 0	Sheet Resistivity -40				
Current 23 (A) 0	Voltage 14 (V) 0	Resistance 23,14 (Ohm) 0	Current 24 (A) P 0	Voltage 31 (V) P 0	Resistance 24,31P 0	Sheet Car. Dens. 0				
Current 43 (A) 0	Voltage 12 (V) 0	Resistance 43,12 (Ohm) 0	+ Magnetic Field 0			N Type / P Type 0				
Current 34 (A) 0	Voltage 21 (V) 0	Resistance 34,21 (Ohm) 0				Current 13 (A) N 0	Voltage 24 (V) N 0	Resistance 13,24N 0	Resistivity -40	
Current 14 (A) 0	Voltage 23 (V) 0	Resistance 14,23 (Ohm) 0				Current 31 (A) N 0	Voltage 42 (V) N 0	Resistance 31,42N 0	Carrier Density 0	
Current 41 (A) 0	Voltage 32 (V) 0	Resistance 41,32 (Ohm) 0				Current 42 (A) N 0	Voltage 13 (V) N 0	Resistance 42,13N 0	Mobility 0	
Current 24 (A) 0	Voltage 31 (V) 0	Resistance 24,31 (Ohm) 0	- Magnetic Field 0			N Type / P Type 0				
Current 31 (A) 0	Voltage 42 (V) 0	Resistance 31,42 (Ohm) 0				Current 13 (A) N 0	Voltage 24 (V) N 0	Resistance 13,24N 0	Resistivity -40	
Current 42 (A) 0	Voltage 13 (V) 0	Resistance 42,13 (Ohm) 0				Current 31 (A) N 0	Voltage 42 (V) N 0	Resistance 31,42N 0	Carrier Density 0	
Current 24 (A) 0	Voltage 31 (V) 0	Resistance 24,31 (Ohm) 0				Current 42 (A) N 0	Voltage 13 (V) N 0	Resistance 42,13N 0	Mobility 0	

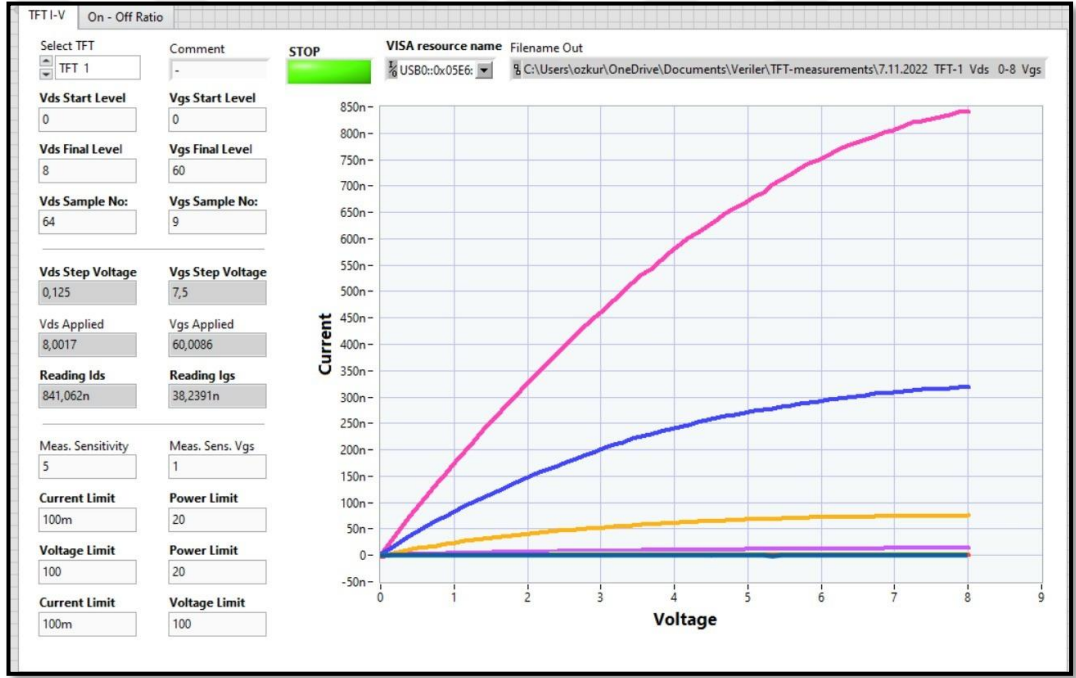
Şekil 5.4 Özdirenç, yük taşıyıcı yoğunluğu ve mobilite hesaplama programı

Bölüm 3.1.4’te (*FET Ölçümü*) bahsedildiği gibi herhangi bir malzemeyi ya da aygıtı sürekli olarak belirli bir akım altında bırakmak malzemenin ısınmasına sebep olmaktadır. Bunun için malzemenin ısı iletkenliği yüksek bir soğutucu ile soğutulması yaygın kullanılan metotlardan birisidir. Ancak Keithley 2614B ile pulse uygulayarak ısınmayı minimuma indirmek de diğer seçeneklerden birisidir.

Keithley firması 26XX serisinde “Keithley Test Script Builder” kullanıyor. Bu yazılım LUA isimli nesne yönelimli bir programlama dile yazılmış olup, kullanıcıların da bu dili öğrenmesi bekleniyor. Diğer bir alternatif ise Tektronix firmasının “Kickstart” yazılımının satın alınması beklenmektedir. Bu projede Keithley 26XX serisi için hazırlanmış LabVIEW kütüphanesi ve Lua beraber kullanılarak bir yazılım hazırlandı (Şekil 5.4, Şekil 5.5).



Şekil 5.5 Keithley 26XX için hazırlanan Labview yazılımının Bock Diagram'ından bir kesit



Şekil 5.6 Testi yapılan bir TFT'nin akım-voltaj grafiği ve program arayüzü

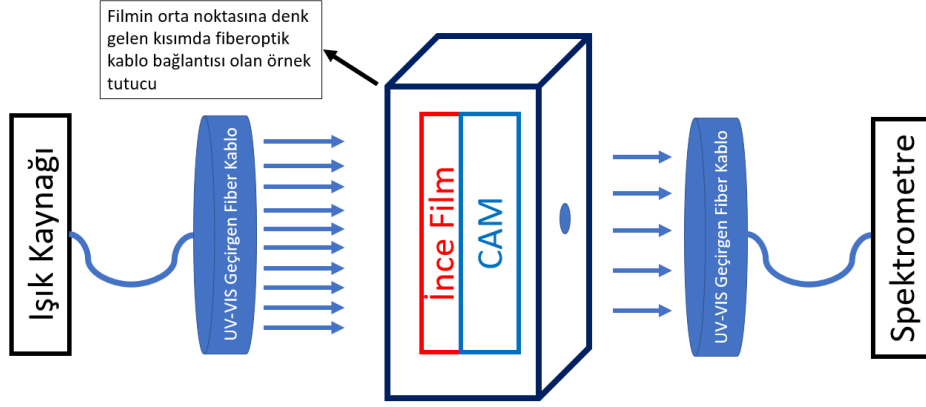
Bu yazılım ile araştırmacı DC tarama (DC Sweeping) veya Pulse Tarama yapabiliyor, akım, voltaj limiti ayarlayabiliyor, verileri anlık olarak grafik ekranda görebiliyor. Bu sayede anında müdahale şansı buluyor (Şekil 5.6).

Aynı zamanda Ocean Optics firmasının HR2000+ES fotospektrometresi için de firma tarafından satılan OceanVIEW isimli bir yazılım bulunmaktadır.

Absorbsiyon, yansıma, optik geçirgenlik gibi çeşitli özellikleri 30 günlük deneme süresi ile kullanmak mümkün.

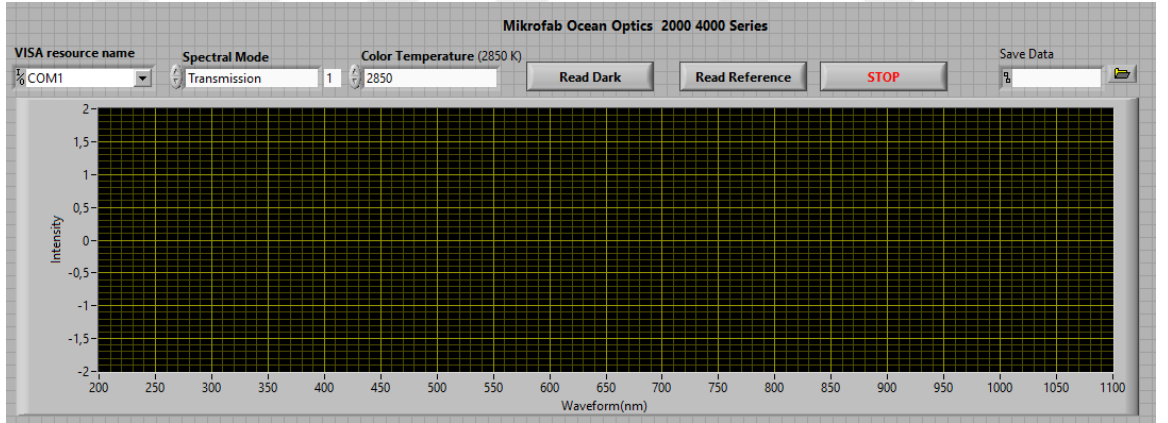
Ölçümlerin yapılabilmesi için 25 mm x 25 mm x 1.1 mm'lik camların yerleştirilebileceği ve tam orta noktasına fiberoptik kabloların bağlanabileceği bir örnek tutucu yapıldı. Işık kaynağı da yine Kuantum Aygıt Laboratuvarında geliştirilmiş olup, UV ışımalar için döteryum lambanın olduğu ve VIS, NIR ışımalar için de halojen lambanın olduğu bir sistem kurulmuştur. Bu ışık kaynağı ile 200 nm – 1100 nm aralığında ışıma elde edilebiliyor. Daha aşağısındaki ve yukarısındaki dalga boylarında da ışıma elde edilebiliyor fakat kullanılan spektrometre bu aralıkta ölçüm yapabildiği için o dalga boyları dikkate alınmıyor.

Şekil 5.8'de kurulan düzeneğin diyagramı verilmiştir. Burada ışık kaynağından gelen ışık fiberoptik bir kablo ile optik ölçümler için tasarladığımız ve ürettiğimiz örnek tutucuya bağlanıyor. Çıkışından gelen ışıma da yine bir fiberoptik kablo spektrometreye bağlantı sağlanıyor. Yalnızca ince filmin optik geçirgenliğinin ölçüleceği durumda önce referans ışmanın, yani herhangi bir kaplama yapılmamış camın optik geçirgenliği ölçülüyor. Ardından kaplama yapılmış cam sisteme yerleştirilerek yeni bir okuma yapılıyor ve yalnızca ince filmin optik geçirgenlik bilgisi elde ediliyor. Bu tez çalışmasında kullanılan camların optik geçirgenlikleri 344 nm ile 437 nm aralığında başlıyor. Belirli bir aralık olmasının sebebi kullanılan camların markasına, üretimine, içerdiği minerale ve yüzeyinin parlatılmasına bağlı olarak farklı optik özelliklerde olmasıdır. Tez çalışmasının başladığı süre ile bittiği süre arasında marka değişikliği yapılmış (*ilk kullanılan cam markasında bir paket cam pürüzsüz iken, başka bir paketin çok çizik olması veya kalınlık farklarının olması*), sonra alınan camlarda ise ölçü olarak bir standardın olması ancak yapısal bir standardın olmaması optik özellikleri büyük oranda etkilemiştir.



Şekil 5.7 Optik ölçümlerin yapıldığı sistemin diyagramı

Optik ölçümlerin yapılabilirdiği Labview ile bir yazılım geliştirildi, Geliştirilen yazılım ile sürekli spektrum okuması yapılabilir ya da geçirgenlik, absorpsiyon gibi veriler okunabilir (Şekil 5.9). Firmanın hazırladığı kütüphane kullanılarak hazırlanan bu yazılımda ışığın yakalanma süresi, zamanlama gibi ayarlar yapılabilirken, GPIO'dan da doğrudan veri okunabilir.

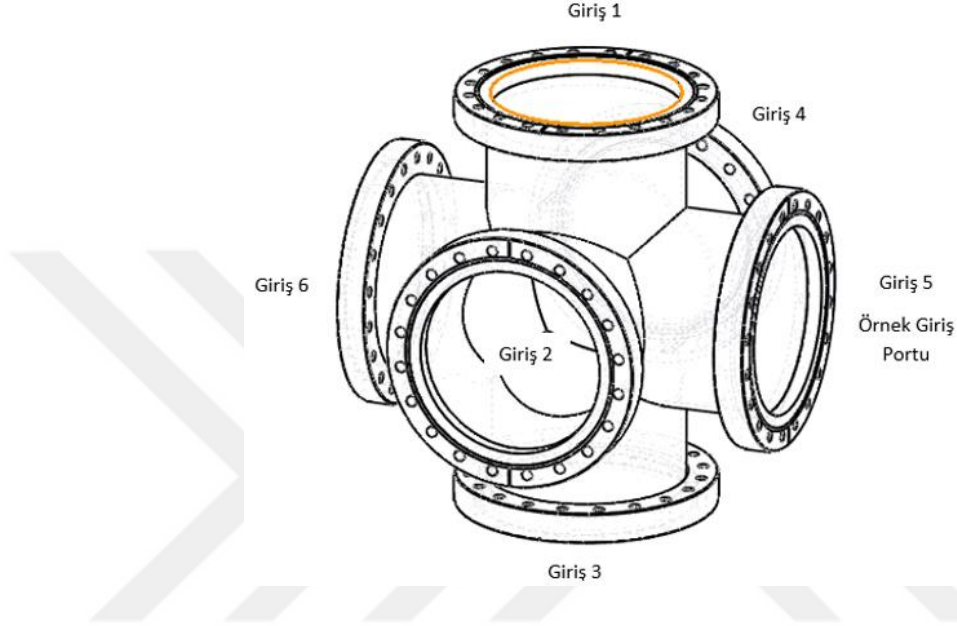


Şekil 5.8 Ocean Optics USB 2000 ve 4000 Serisi ile uyumlu Spektrum Yazılımı

Tüm bu yazılımları geliştirme işlemleri doktora sırasında ihtiyaç duyuldukça yapılmış olup, burada anlatıldığı sırayla değildir.

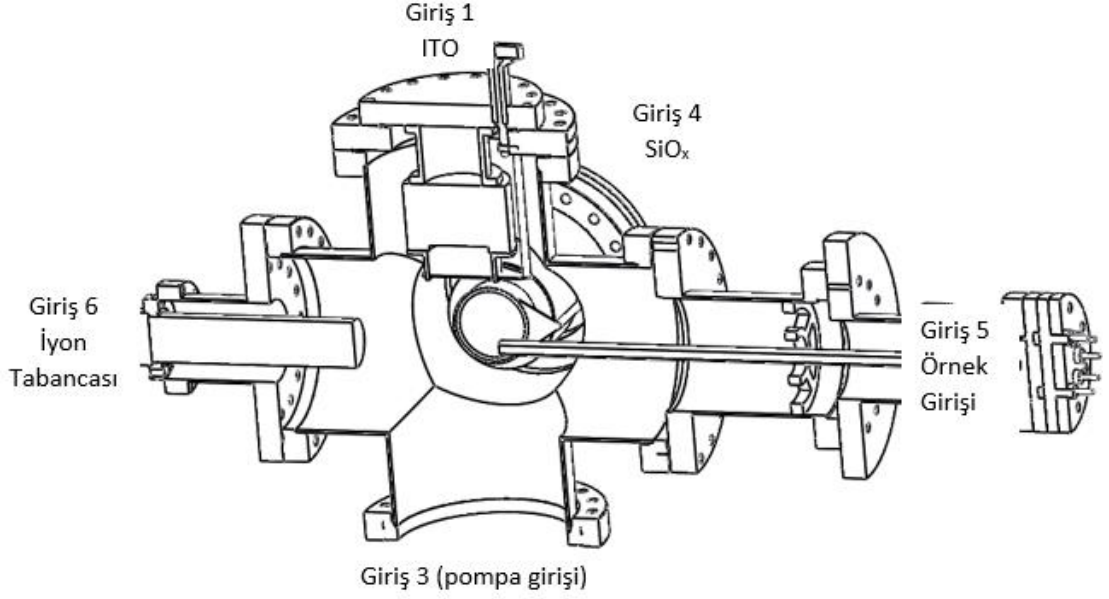
## 5.2 İnce Filmlerin Üretilmesi

İnce filmlerin üretilecek olduğu DC/RF magnetron sputtering sistemi için bazı değişiklikler ve güncellemeler yapılmıştır. Daha önceden süperiletken ince filmleri üretmek üzere tasarlanan ve buna göre bir konfigürasyona sahip olan sistemden ilk aşamada yüksek sıcaklıklara çıkabilmek için kullanılan ısıtıcı çıkarılmış, yerine dönüş hızı ayarlanabilen motor eklenmiştir.



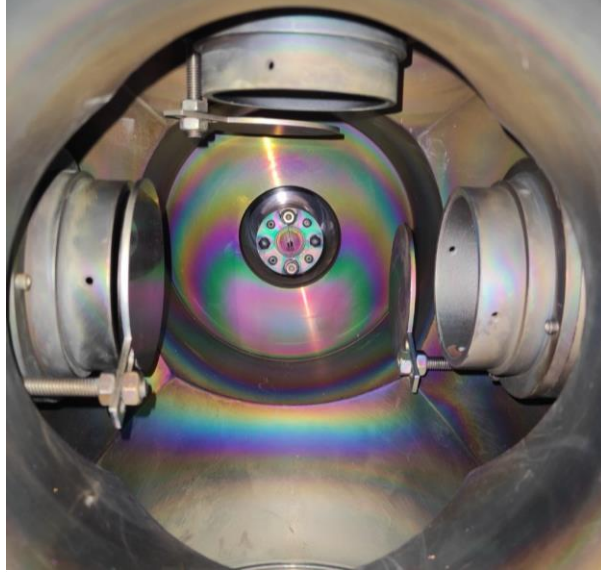
Şekil 5.9 Kurt J. Lesker firmasından alınan ConFlat® (CF) UHV 6-Way Cross 'un taslak çizimi

Sistemden YBCO, CeO<sub>2</sub>, YSZ, SrTiO<sub>3</sub> gibi süperiletken çalışmalarında kullanılan başlık ve hedef malzemeler çıkarılmıştır. Turbomoleküler pompa ve iyon tabancasının konumları ardışık film üretiminin ve iyon demetli aşındırmanın kirliliğe yol açmadan yapılabilmesi için yeniden düzenlenmiştir.



Şekil 5.10 RF/DC Magnetron Sputtering sisteminin son tasarımına ait kesit

Şekil 5.16'da şeması verilen sistemde 2 nolu konumda bulunan iyon tabancasından çıkan yüksek momentumlu parçacıklar sistemin ortasında bulunan ince filme çarpmakta ve aşındırmaktadır. Ancak ince filmde kopan parçacıklar 1, 3 ve 4 numaralı konumlarda bulunan hedef malzemeler üzerine gelebilmekteydi. Bu da hedef malzemelerde kirliliğe yol açmakta, üretilen ince filmlerin performansını etkileyebilmekteydi. Bu yüzden iyon tabancası şekil 5.16'daki 6 nolu konuma yerleştirilmiştir. Böylece ince filmde saçılan parçacıklar herhangi bir hedef malzemenin bulunmadığı 3 nolu girişe yönlendirilmiş oldu. 3 nolu girişe yerleştirilen vakum pompası ve turbomoleküler pompanın içerisine herhangi büyük boyutlu bir parçanın (vida, altlık vs) düşmemesi için 4 mm x 4 mm boşluklu karelerin bulunduğu PLA malzemeden bir koruma eleği üretildi ve yerleştirildi. Şekil 5.17'de ince filmlerin sistem içerisini nasıl kapladığını gösteren bir fotoğraf görünmektedir.

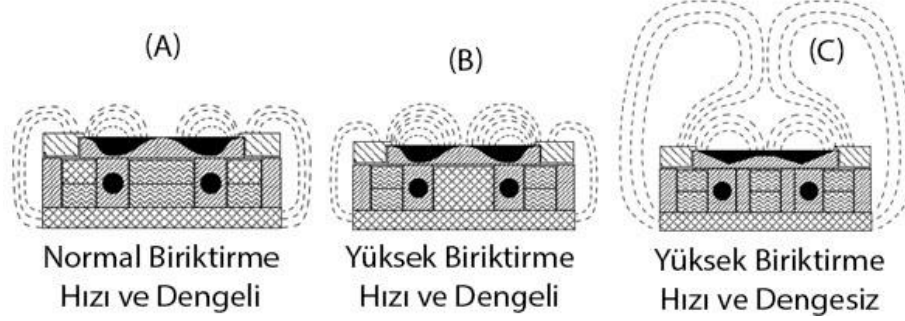


Şekil 5.11 Birçok ince film kaplamasının ardından sputter sistemi içerisindeki ince filmlerin yarattığı görsel

Sputtering işleminde gücün etkisi şu şekilde açıklanabilir; güç arttıkça bir noktaya kadar püskürtme hızı artmaktadır. Belirli bir değerden sonra ise hedef malzemenin yüksek momentumla alttaş üzerine çarpan parçacıklar tekrar alttaş ile esnek çarpışma yapabilmekte ya da yüzeyden tekrar parçacık koparabilmektedir (*bu işleme resputtering denmektedir*) (Krishna-Seshan, 2012). Sistem içerisindeki gaz miktarı arttıkça sistem içerisindeki plazma düzensizliği artabilmekte ve püsküren parçacıklar plazmayla etkileşime girebilmektedir. Böyle bir durumda kaplamanın homojenliği bozulmakta, bazı yerlerde ince bazı yerlerde kalın kaplama olabilmektedir.

Şekil 5.12’de gaz basıncı ve RF gücüne bağımlı olarak biriktirme hızlarına bağlı manyetik alan çizgileri verilmiştir. Şekil 5.12 C’de maksimum biriktirme hızı konfigürasyonunda manyetik alan çizgilerinin hedef malzemenin önünde çok büyük bir alan kapladığı görülmektedir. Böyle bir durumda plazma çok yoğun ve düzensiz olmaktadır. Hedef malzeme çok hızlı tüketilmekte ancak bu tüketime karşın kopan parçacıkların tamamı alttaşa birikmemektedir. Verimsizliğin yüksek olduğu bu üretim metodu bazı yüksek reaktivliğe sahip malzemelerde tercih edilmektedir. Şekil 5.12 B’de ise dengeli ve yüksek biriktirme hızlı bir konfigürasyona sahip durumun manyetik alan çizgileri görünmektedir. Bu durumda hedef malzemenin kopan parçacıklar C’deki konfigürasyona göre daha kolay alttaş üzerine birikebilmektedir. Üretim optimize edilmediği takdirde yüksek

momentumlu parçacıklar alttaş üzerinden tekrardan yansıyabilmektedir. Şekil 5.12 A ise tercih ettiğimiz konfigürasyon olup yüksek verimliliğe sahip ve normal biriktirme hızına sahip durumdur.



Şekil 5.12 RF gücüne bağımlı olarak biriktirme hızlarına bağlı manyetik alan çizgileri

### 5.2.1 IGZO kanal yarıiletkeninin üretilmesi

AJA firmasından satın alınan IGZO (*İndiyum (In)*, *Galyum (Ga)*, *Çinko (Zn)* ve *Oksijen (O)*) hedef malzemesi  $In_2O_3$ ,  $Ga_2O_3$ , and  $ZnO$  farklı oranlarda karıştırılması ile üretilmektedir. Yüksek mobilitesi, atmosfer koşullarından daha az etkileniyor olması, yüksek transparanlığı ve esnek alttaşlar ile uyumluluğu dolayısıyla tercih edilmiştir. Aynı zamanda Samsung ve LG gibi panel üreticilerinin de geniş ekranlarda ticari olarak IGZO tabanlı TFT'ler kullanması da malzemenin stabil olduğunun göstergelerinden birisidir.

Amorf  $SiO_x$  altyapısı ile üretilabiliyor olması firmaların IGZO kullanımına geçişini büyük oranda kolaylaştırmıştır. Bununla birlikte son yıllarda giyilebilir ve katlanabilir elektronik cihazlara olan ilginin artması da üreticileri esnek malzemeler kullanmaya yönlendirmiştir. Bu açıdan da en iyi alternatiflerden birisidir. 3.5 eV'luk enerji bant boşluğu ile transparan yarıiletken olan IGZO, 400-700 nm aralığında %80 üzerinde (%98'e kadar) transparan özellik göstermektedir. Bu da tez girişinde bahsedildiği üzere transparan elektronik aygıtlarda kullanımını kolaylaştırmaktadır.

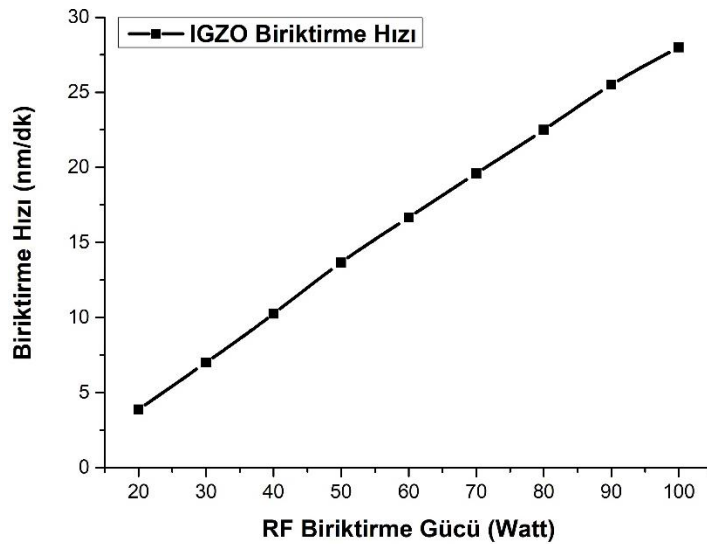
IGZO'dan önce ZnO, p-ZnO, AZO ve türevi ZnO tabanlı birçok malzeme ile çeşitli TFT denemeleri yapılmıştır. Üretim parametrelerine bağlı olarak iletken veya yarıiletken özellik gösteren bu malzemelerin de mobiliteyi amorf silikona

göre yüksek olmakla birlikte hem üretiminde hem de performansında zamana bağlı değişiklikler olabilmektedir (atmosfer koşulları, nem, homojenlik vb).

Transistörün kanal yarıiletkenini oluşturacak olan IGZO ince filmler ile yapılan çalışmalarda elektriksel özellikler dikkate alınarak planlama yapılmıştır. Çeşitli güç ve gaz basınçlarında üretilen filmler elektriksel testleri yapıldıktan sonra 2 kere daha üretilmiş (3 tekrarlı) ve sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür. Hem PVD sistemimizin hem de elektriksel test sistemimizin tekrarlanabilirliğinin yüksek olduğu bu çalışmalar sırasında görülmüştür. Buna ek olarak elektriksel testler farklı cihazlarla da denerek kendi aralarında da doğrulama yapılmıştır.

İnce filmlerin belirli bir kalınlıkta üretilmesi elektriksel ve optik özelliklerin kıyaslanabilmesi açısından önemlidir. Optik özelliklerde kalınlık optik geçirgenliği düşürmektedir. Elektriksel özelliklerde ise kalınlık arttıkça yüzey direnci düşmekte, yüzeysel yük taşıyıcı yoğunluğu ise artmaktadır. IGZO ince filmlerin kalınlığını belirlemek için 20W ile 100W aralığında farklı RF biriktirme güçlerinde ince filmler yapılmıştır. Buradan elde edilen grafik Şekil 5.13'te verilmiştir. Grafiğin 20 W ile 100 W aralığında lineer olması ara değerlerdeki biriktirme hızlarının bulunmasını kolaylaştırmıştır. Bu grafikten elde edilen denklem Şu şekildedir.

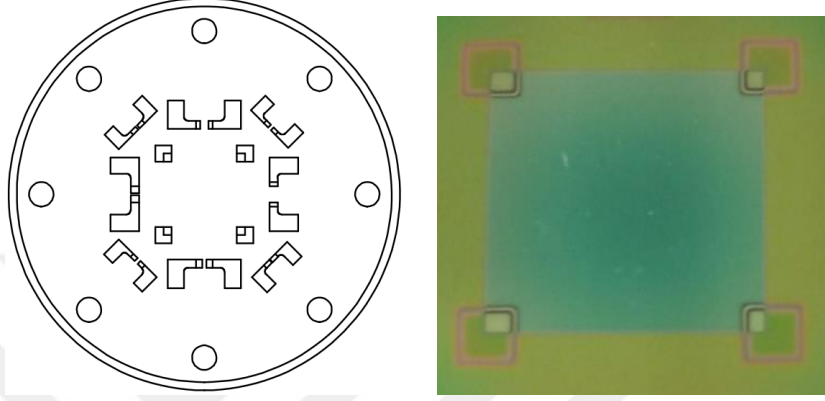
$$\text{IGZO Biriktirme Hızı (nm/dk)} = 0,304 * \text{RF Gücü} - 1,9$$



Şekil 5.13 IGZO ince filmlerin RF biriktirme gücüne bağlı olarak biriktirme hızı

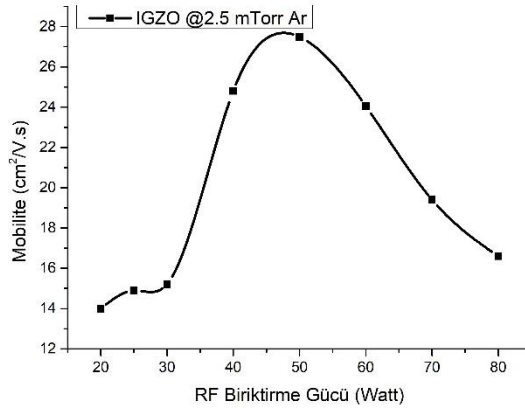
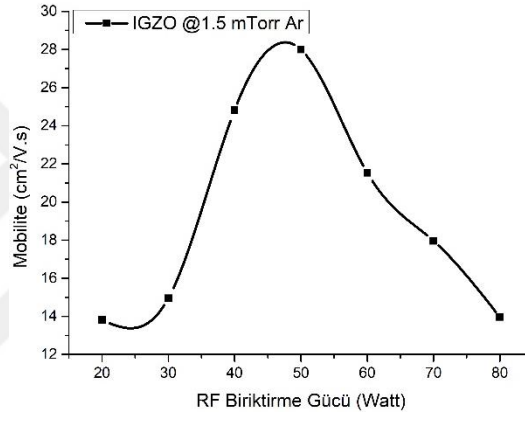
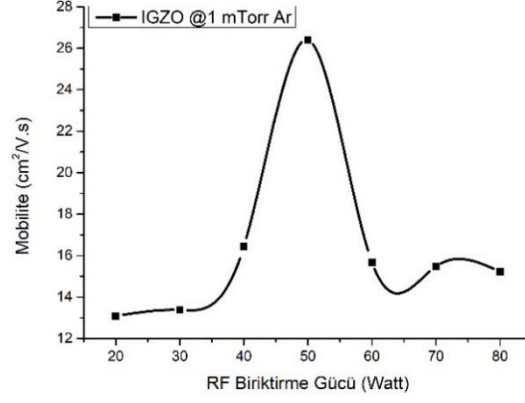
IGZO ince filmlerin elektriksel özelliklerini test etmek için alttaşlar üzerine aralarında ~1 cm boşluk bulunacak şekilde 4 tane ITO kontak pedi biriktirilmiştir.

Her bir ITO kontak pedi  $\sim 200$  nm kalınlığında olup, tamamı aynı biriktirme parametreleri ile üretilmiştir. Üretim sırasında hem kimyasal aşındırmadan kaçınmak hem de kalınlığın yavaşça azalmasını sağlamak için gölgeleme maskesi kullanılmıştır. ITO merkezinde kalınlık 200 nm iken, merkezden kenara doğru gittikçe kalınlık 20 nm'ye kadar azalmaktadır. IGZO ince filmler de bu ITO kontaktarı üzerine biriktirilmiştir.

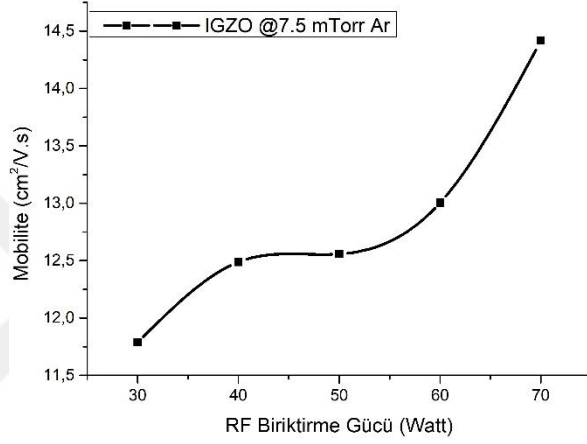
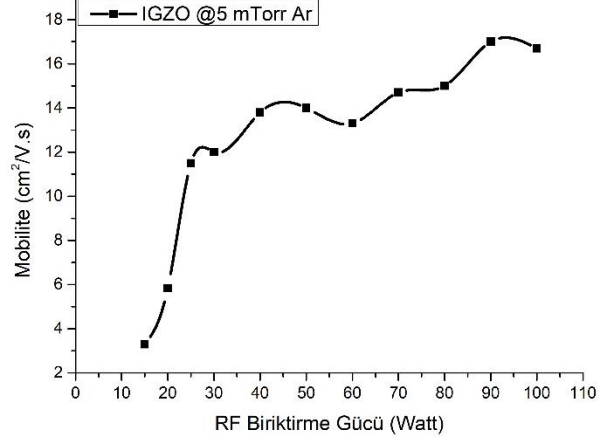


Şekil 5.14 ITO ve IGZO için gölgeleme maskeleri (üst üste bindirilmiş) ve üretim sonrası oluşan desen

20 W ile 80 W aralığında, 1 mTorr, 1,5 mTorr ve 2,5 mTorr Ar gazı basınçlarında üretilen IGZO ince filmlerin mobilite değerleri ~50 W civarında 27-29  $\text{cm}^2/\text{V.s}$  mobilite değerine ulaşmıştır.



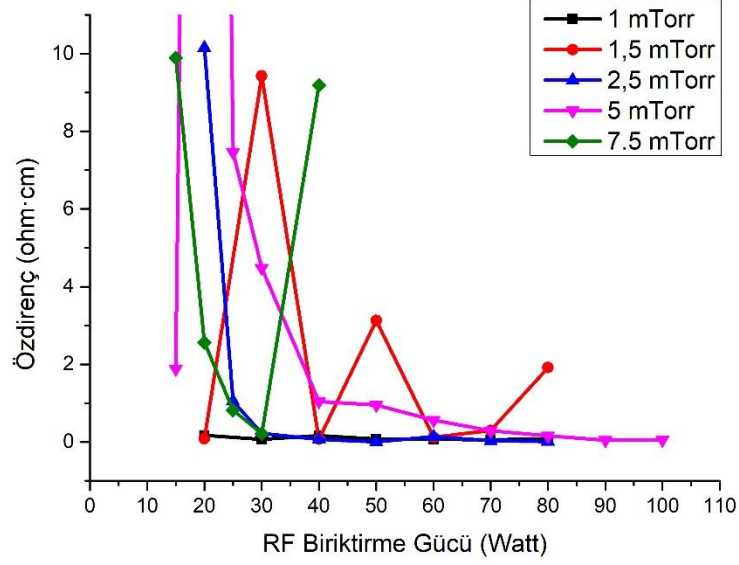
Şekil 5.15. 20 W ile 80 W aralığında, 1 mTorr, 1,5 mTorr ve 2,5 mTorr Ar gazı basıncı altında üretilen IGZO ince filmlerin mobilite & RF gücü grafikleri



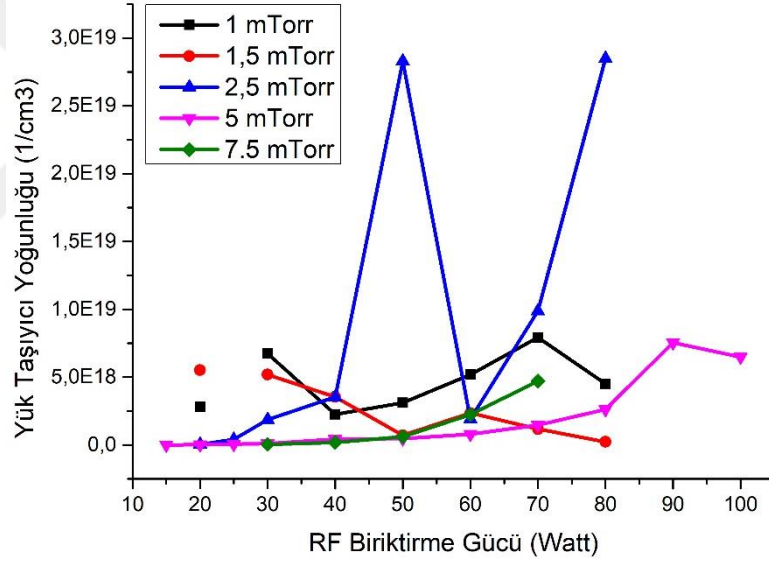
Şekil 5.16. 5mTorr ve 7,5 mTorr Ar gazı basıncı altında üretilen IGZO ince filmlerin mobilite & RF gücü grafikleri

5 mTorr Ar basıncı altında üretilen IGZO ince filmlerde 100 W değerine kadar üretim yapılmış ve elde edilen maksimum değer 16-17 cm<sup>2</sup>/V.s olarak belirlenmiştir. Daha yüksek RF gücü değerlerinde hedef malzemenin zarar görme ihtimali olduğu için çıkılmamıştır. 7,5 mTorr Ar basıncı altında üretilen IGZO ince filmlerde ise 20W, 80W, 90W ve 100W değerlerinde herhangi bir elektriksel iletkenlik görülmemiştir. Ara değerlerde ise elde edilen maksimum mobilite ~14 cm<sup>2</sup>/V.s olarak belirlenmiştir.

20 W ile 100 W aralığında farklı Ar gazı basınçları altında üretilen IGZO ince filmlerin özdirenç grafikleri arasında genel olarak bir korelasyon görülmemekle birlikte düşük RF biriktirme güçlerinde özdirençin görece daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.17 20 W ile 100 W aralığında farklı Ar gazı basıncında üretilen IGZO ince filmlerin özdirenç grafikleri

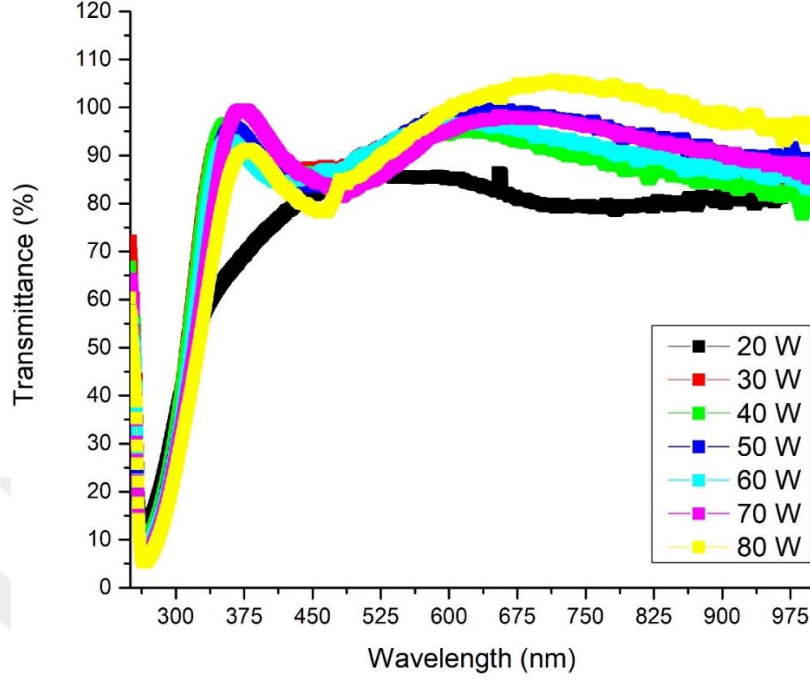


Şekil 5.18. 20 W ile 100 W aralığında farklı gaz basınçlarında üretilen IGZO filmlerin taşıyıcı yoğunlukları

Şekil 5.18'de verilen grafikte 20 W ile 100 W aralığında farklı Ar gazı basıncında üretilen IGZO ince filmlerin yük taşıyıcı yoğunlukları verilmiştir. Burada da belirgin bir korelasyon görülmemekle birlikte genel olarak yük taşıyıcı yoğunlukları  $10^{18}$  -  $10^{19}$  aralığında çıkmıştır.

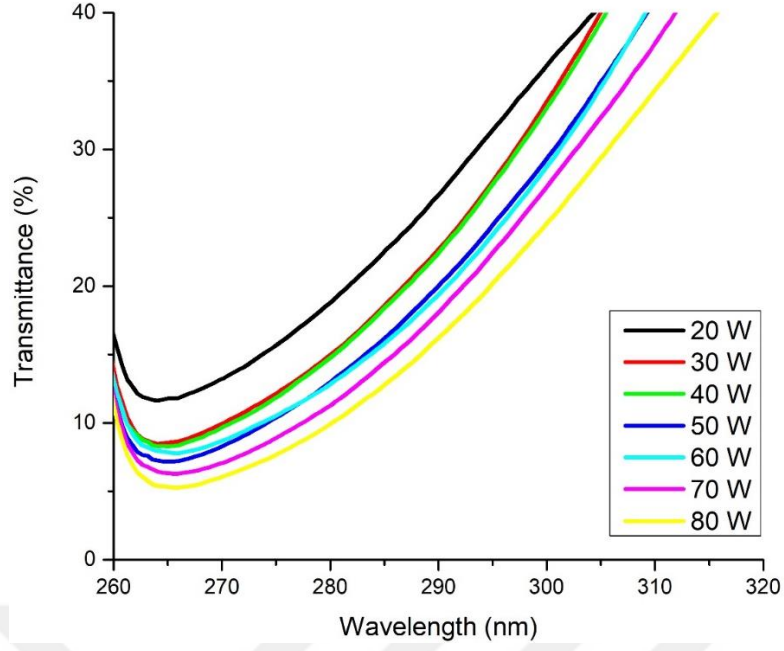
Şekil 5.19'da 1 mTorr Ar basıncı altında üretilen 200 nm'lik IGZO ince filmlerin optik geçirgenlik grafikleri görülmektedir. İnce filmlerin optik

geçirgenlikleri 300 nm ile 700 nm aralığında ortalama olarak %90 üzerinde çıkmıştır.



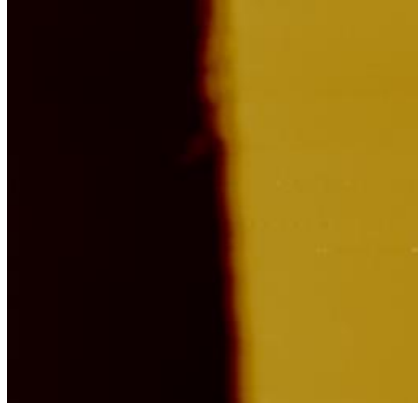
Şekil 5.19 Farklı RF biriktirme güçleri altında üretilen 200 nm'lik IGZO ince filmlerin optik geçirgenlik grafikleri

Şekil 5.20'de verilen grafik 5.19'da verilen grafiğin 260 nm ile 320 nm aralığında büyütülmüş halidir. Burada dikkat çeken durum 20 W'tan 80 W'a doğru bir kayma olmasıdır. Bu ince filmlerin üretiminde standart cam yerine kuartz cam kullanılmıştır. Kullanılan kuartz cam 265 nm'den sonra UV ışınlarını geçirmektedir. Bu da önceki değerlerde IGZO ince filmlerin optik geçirgenliklerini görememeye sebep olmaktadır. Fakat belirtilen aralıkta grafikler uzatıldığında 20 W'ta üretilen ince filmin X eksenini ~250 nm'de keseceği, 80 W'ta üretilen ince filmin ise X eksenini ~260 nm'de keseceği görülmektedir. Buradan da IGZO ince filmlerin üretim gücüne bağlı olarak yasak bant aralığının değişebileceği sonucuna varılmaktadır.



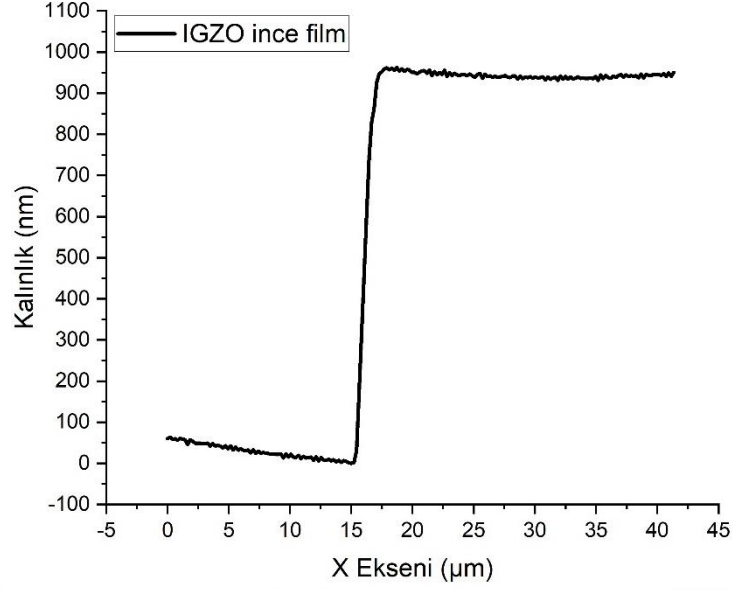
Şekil 5.20. IGZO ince filmlerin 260 nm ile 320 nm aralığındaki optik geçirgenlikleri

Şekil 5.21’de  $42 \mu\text{m} \times 42 \mu\text{m}$  alanda AFM alınan görüntü vardır. Bu görüntü kalınlık ölçümü için alınmış olup, sol taraftaki koyu kısım litografi ile aşındırılmış ve cama ulaşmış kesimdir. Sağ tarafta ise IGZO ince film görünmektedir.



Şekil 5.21 20W 1 mTorr Ar basıncı altında üretilen IGZO ince film (Resim  $42 \mu\text{m} \times 42 \mu\text{m}$  alana ait)

Kalınlık ölçümleri için film kalınlığı yüksek tutularak analiz yapılmıştır. Bu sayede hem dakikada biriktirilen ince film için ortalama hata düşmektedir hem de filmin ortasında ve kenarındaki kalınlık farklarından merkezden dışarıya doğru olan farklılaşma test edilebilmektedir.

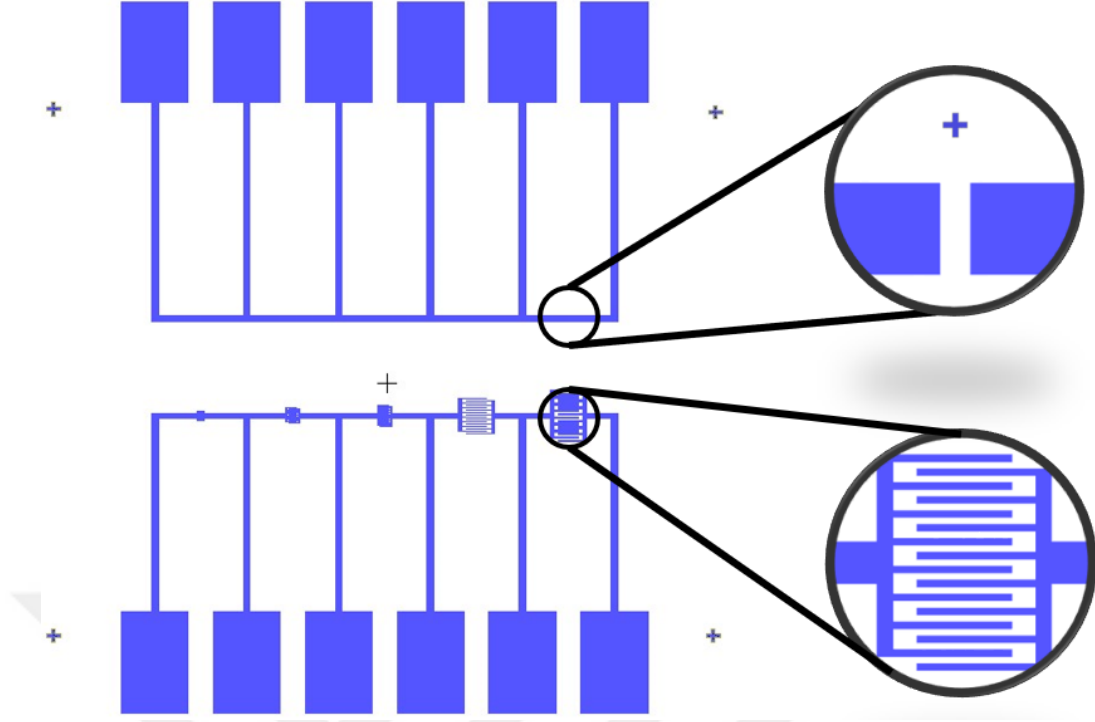


Şekil 5.22 IGZO ince filmin litografi ve aşındırma sonrası kalınlığını gösteren grafik (Şekil 5.21'deki resme ait kalınlık görüntüsüdür)

### 5.2.2 Drain-Source ve Gate elektrodu'nun üretilmesi

İlk denemeler ince film transistörün drain, source ve gate elektrotlarını oluşturacak olan iletken ve transparan özelliklere sahip ITO ile yapılmıştır. ITO hedef malzemesi ~20 ohm'lik bir dirence sahip olup hem RF hem DC kaynak kullanarak kaplamaya uygundur. Tezden elde edilecek çıktının ileride üretilmesi planlanan esnek ve transparan ince film transistör dizi için kullanılması hedeflenmektedir. Esnek alttaşlar için ~250 °C'ye kadar dayanan Kapton® gibi malzemeler kullanıldığı gibi 100 °C ve üzerinde erime sıcaklığına ulaşan PVC kaplama filmleri de kullanılmaktadır. Alttaş sınırlaması olmaması ve üretimin daha kolay olması için ince film kaplamasının oda sıcaklığında gerçekleştirilmesine karar verilmiştir. ITO ince filmin düşük bir özdirence sahip olması ve homojen olması amaçlanmaktadır.

Drain-Source elektrotlarının bulunduğu maskede ek olarak malzemelerin ışığa duyarlılık, gaza duyarlılık gibi özelliklerinin incelenebileceği "interdigit" tasarımı da bulunmaktadır (Şekil 5.18). Maskelerin sıralamasını değiştirerek yarıiletken, iletken ya da yalıtkan malzemelerin özelliklerinin incelenebileceği çok amaçlı bir tasarım yapılmıştır.



Şekil 5.23 Drain-Source elektrotlarına ait maskenin tasarımı (Üstteki büyütme Drain-Source'a ait, alttaki büyütme ise "interdigit" tasarıma ait)

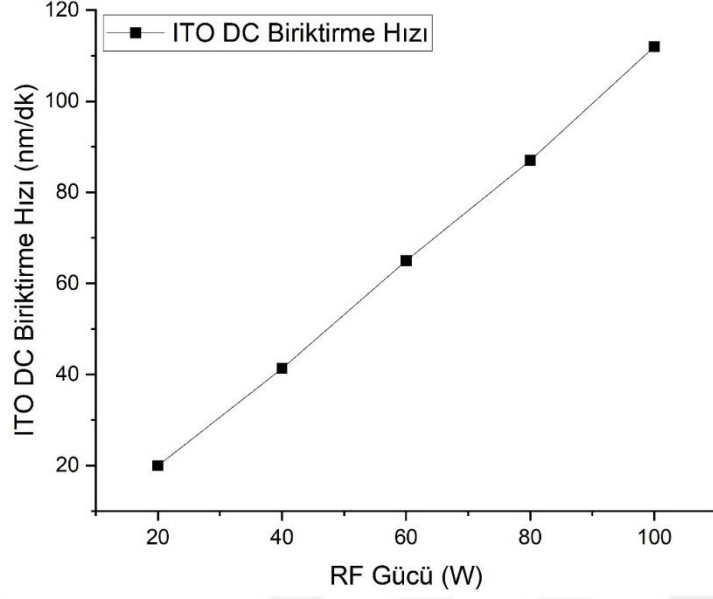
5 tane transistör üretmek için tasarlanan bu maskede Genişlik-Uzunluk (W/L) oranları 1/10, 2/10, 3/10, 4/10 ve 5/10 olarak belirlendi. Genişlik 100  $\mu\text{m}$  sabit olup, uzunluk, 10  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$ , 40  $\mu\text{m}$  ve 50  $\mu\text{m}$  olarak değişken aralıkla belirlendi. Kontak padler ise 2 mm x 3 mm olarak belirlendi.

Tablo 5.1'de verilen denemelerin temel amacı optimum bir püskürtme gücü belirlemek ve güce bağlı olarak değişen direnci, kaplamanın homojenliği gibi kriterler dikkate alınmıştır. Tabloda belirtilmeyen 100 Watt'a kadar birçok farklı parametrede ITO ince filmler üretilmiştir. Bazıları homojen olmamış, bazılarında biriktirmeden kısa bir süre sonra çatlama meydana gelmiş, bazılarının ise direnci çok yüksek çıkmıştır.

Tablo 5-1 Sistemde kullanılan 2 inçlik sputtering başlığı ile 1 inç x 1 inç boyutlarında alttaş üzerine yapılan ince filmlerin basit direnç ölçüm sonuçları

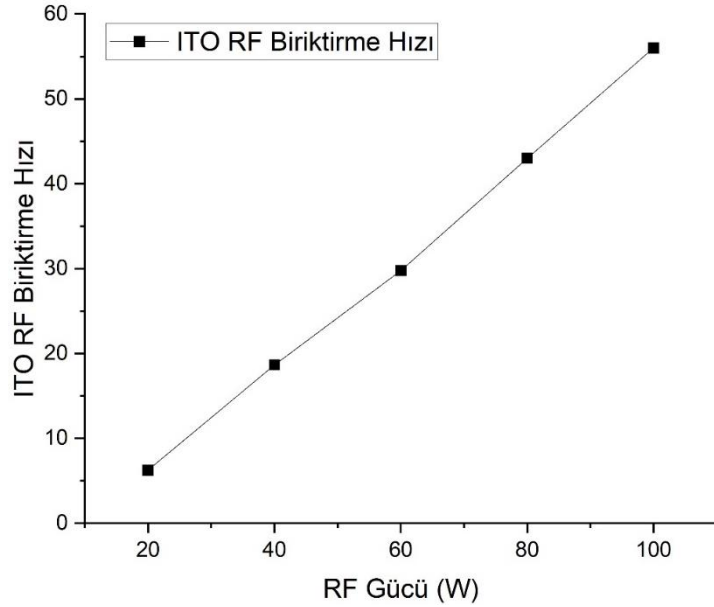
Hedef Malzeme	RF Gücü	Kaplama Süresi	Ar Gaz Basıncı	Açı	Gaz Akış Hızı	Direnç (~2 cm mesafeden)
ITO	50 Watt	60 dk	15 mTorr	0°	25 sccm	~2kΩ
ITO	50 Watt	60 dk	5 mTorr	0°	15 sccm	~1,5kΩ
ITO	50 Watt	60 dk	1 mTorr	0°	15 sccm	~500Ω
ITO	40 Watt	60 dk	15 mTorr	0°	25 sccm	~1kΩ
ITO	40 Watt	60 dk	5 mTorr	45°	25 sccm	~400Ω
ITO	40 Watt	60 dk	15 mTorr	45°	25 sccm	~1kΩ
ITO	40 Watt	60 dk	15 mTorr	30°	15 sccm	~500Ω
ITO	40 Watt	20 dk	1 mTorr	30°	5 sccm	~300Ω
ITO	40 Watt	30 dk	1 mTorr	30°	15 sccm	~180Ω
ITO	<b>40 Watt</b>	<b>40 dk</b>	<b>1 mTorr</b>	<b>30°</b>	<b>15 sccm</b>	<b>~120Ω</b>
ITO	30 Watt	60 dk	5 mTorr	30°	15 sccm	~400Ω
ITO	30 Watt	42 dk	1 mTorr	30°	15 sccm	~200Ω
ITO	30 Watt	30 dk	5 mTorr	30°	5 sccm	~600Ω

Şekil 5-18'de verilen grafikte ITO biriktirme hızınının 100W'a kadar lineer olarak arttığı görülmektedir. Artış grafiği için elde edilen denklem **Biriktirme Hızı (nm/dk) = 1.15\*DC Gücü – 3,8** olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.24 - ITO DC Magnetron püskürtme tekniği ile yapılan güce bağlı biriktirme hızı grafiği

ITO ince film RF magnetron püskürtme metodu ile yapıldığında biriktirme hızının %50'den fazla düştüğü görülmektedir. RF magnetron biriktirme metodu ile yapılan filmlerin 100 W'a kadar elde edilen biriktirme denklemi ise **Biriktirme Hızı (nm/dk) = 0,62\*DC Gücü – 6,4**'tür. Buna karşın ise yüzey pürüzlülüğü ise 4.2 nm'den 2.8 nm'ye düşmüştür.



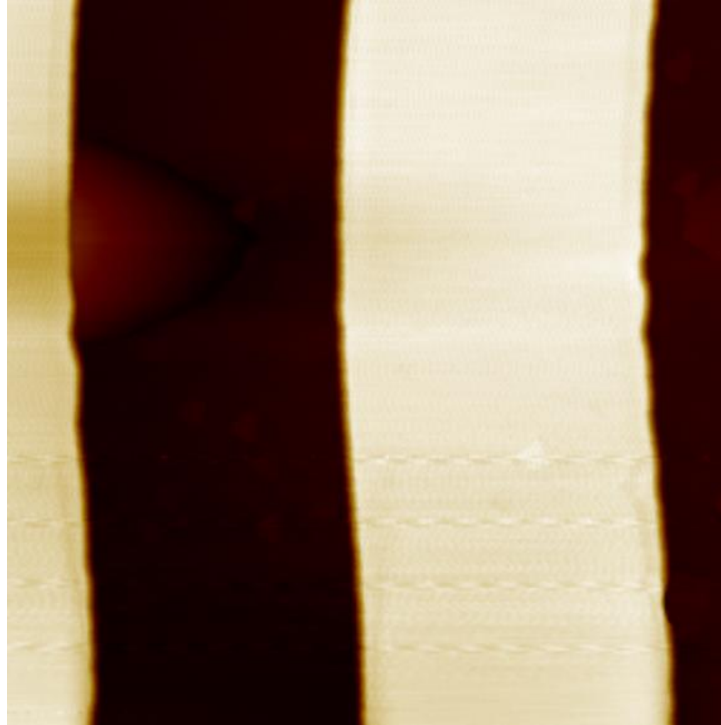
Şekil 5.25 RF magnetron püskürtme ile biriktirme hızının püskürtme gücüne bağlı grafiği

DC ve RF magnetron püskürtme metotlarında DC ile üretilen ince filmlerin direnci daha düşük olmasına karşın (Tablo 5.2) çok katmanlı yapılarda

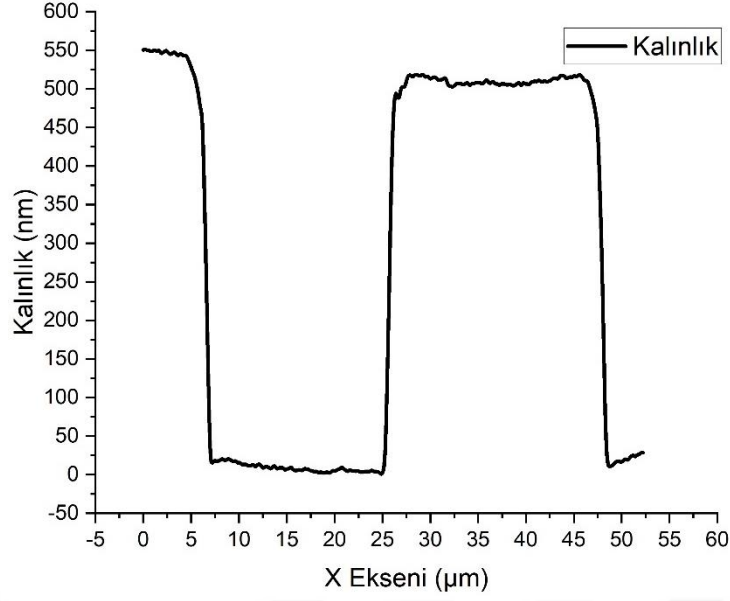
(ITO+SiO<sub>x</sub>+ITO) çatlamlar meydana geldiği görülmüştür. Bu yüzden TFT üretimindeki denemelerde genel olarak RF magnetron püskürtme tekniği kullanılmıştır.

Tablo 5-2 RF ve DC magnetron sputtering tekniği ile 200 nm'lik yüzey direnci

Hedef Malzeme	RF Gücü	RF/DC	Ar Gaz Basıncı	Gaz Akış Hızı	Açı	Yüzey Direnci $\Omega/\square$
ITO	100 W	RF	1 mTorr	12 sccm	0°	105
ITO	80W	RF	1 mTorr	12 sccm	0°	84
ITO	60W	RF	1 mTorr	12 sccm	0°	68
<b>ITO</b>	<b>40W</b>	<b>RF</b>	<b>1 mTorr</b>	<b>12 sccm</b>	0°	<b>45</b>
ITO	20W	RF	1 mTorr	12 sccm	0°	66
ITO	100 W	DC	1 mTorr	12 sccm	0°	88
ITO	80W	DC	1 mTorr	12 sccm	0°	65
ITO	60W	DC	1 mTorr	12 sccm	0°	33
<b>ITO</b>	<b>40W</b>	<b>DC</b>	<b>1 mTorr</b>	<b>12 sccm</b>	0°	<b>27</b>
ITO	20W	DC	1 mTorr	12 sccm	0°	30



Şekil 5.26 ITO ince filme ait AFM görüntüsü



Şekil 5.27 Kalınlığı belirlemek için interdigit deseninden alınan kesit

Şekil 5.26 ve 5.27’de AFM’den alınan görüntü ve görüntüye ait kesit grafiği verilmiştir. 2 çukur ve 2 tepe olarak alınan bu kesit hem kalınlık ölçümlerindeki hata payını düşürmektedir hem de ölçüm yapılan alanda kalınlık gradyentinin belirlenmesine yardımcı olmaktadır.

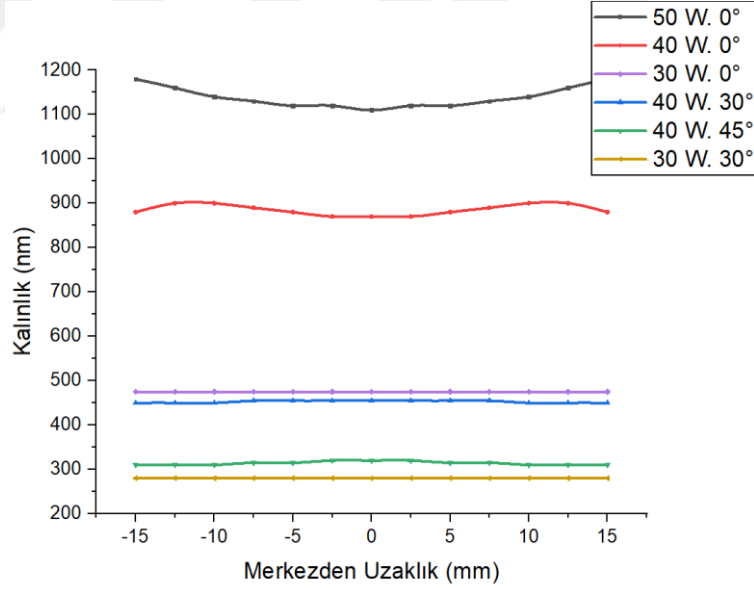
Yapılan denemelerde gaz basıncı ile direncin doğru orantılı korelasyon, gaz akış hızı ile ise ters orantılı korelasyon gösterdiği gözlemlenmiştir. Tablolarda  $XX^\circ$  derece ile belirtilen değer hedef malzeme ile alttaş eksenleri arasındaki açıyı vermekte olup, paralel olduğu anlamına gelmektedir. Bu konfigürasyon elde edilene dek birçok deneme yapılmış ve en uygun değerler 40 W RF gücü, 1 mTorr gaz basıncı, 15 sccm gaz akış hızında elde edilmiştir. Böylece alttaş üzerinde oluşan kalınlık gradyenti minimum indirilmiştir. Daha düşük değerlerde biriktirme hızı çok düşmekte, bununla birlikte direnç de artmaktadır. (Mattox, 2009). Biriktirme hızı ve homojenlik arasındaki ilişki de tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5-3. - Üretim parametrelerine göre biriktirme hızı ve kalınlık farkları (Ölçümler 1 saatlik biriktirme sonunda yapılmıştır).

Hedef Malzeme	RF Gücü	Ar Gaz Basıncı	Açı	Biriktirme Hızı	Kalınlık Farkı
ITO	50 Watt	15 mTorr	0°	20 nm/dk	~30-70 nm
ITO	40 Watt	15 mTorr	0°	15 nm/dk	~20-50 nm

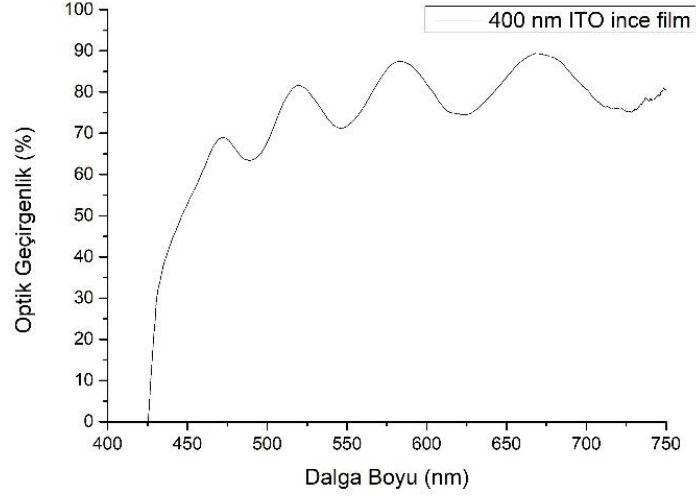
<b>ITO</b>	40 Watt	1 mTorr	30°	7 nm/dk	<5nm
<b>ITO</b>	40 Watt	1 mTorr	45°	~5 nm/dk	~5-10 nm
<b>ITO</b>	30 Watt	5 mTorr	0°	8 nm/dk	<5nm
<b>ITO</b>	30 Watt	1 mTorr	30°	~5 nm/dk	<5nm

Tablo 5.2’de üretim parametrelerine göre ITO biriktirme hızları ve filmde oluşan kalınlık farkları gösterilmiştir. Ölçüm yapılan cihaz referansı %3’ten daha küçük hata payıyla ölçmüştür. Buna dayanarak kalınlık ölçümlerindeki hata paylarının %3’ten küçük olduğu söylenebilir. 0° derece açı ile yapılan biriktirme işleminde kalınlık farkının 60 nm’ye kadar çıkabildiği görülmektedir. 50 W ile yapılan denemede alttaşın ortasının daha ince, kenarlarının ise daha kalın olduğu görülmüştür. Buradan bu konfigürasyonda resputtering olduğu ya da hedef malzemeden püsküren parçacıkların alttaşın ortasına daha az ulaştığı sonucuna varabiliriz. 40 W, 0° ile yapılan denemede ise orta kısımların daha ince, dış kısımların ise biraz daha kalın, ancak arada kalan kısmın daha kalın olduğu görülmüştür (Şekil 6).



Şekil 5.28 Kalınlık ölçümleri 3 ayı konumdan incelenmiştir.

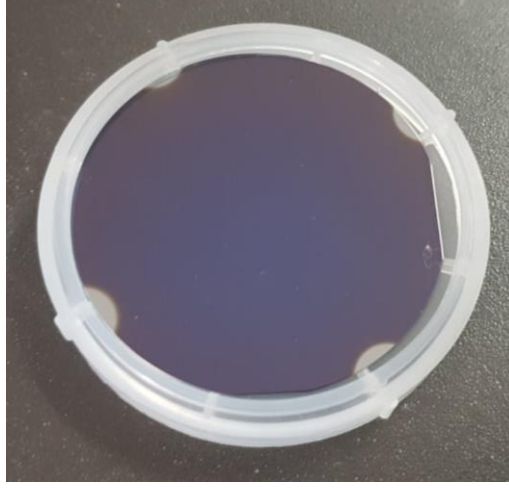
Şekil 5.18’de ITO ince filmine ait optik geçirgenlik grafiği verilmiştir. Kullanılan cam 430 nm’den sonraki dalga boylarını geçiriyor olup, Cam+ITO yapısının ortalama ışık geçirgenliği ~%81’dir. Bu oran üretim parametrelerine ve ITO’nun kalınlığına bağlı olarak değişmekle birlikte maksimum %92, minimum ise %73 optik geçirgenlik değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5.29 40 W, 1 mTorr'da üretilen ~400 nm'lik ITO ince filmin optik geçirgenliği.

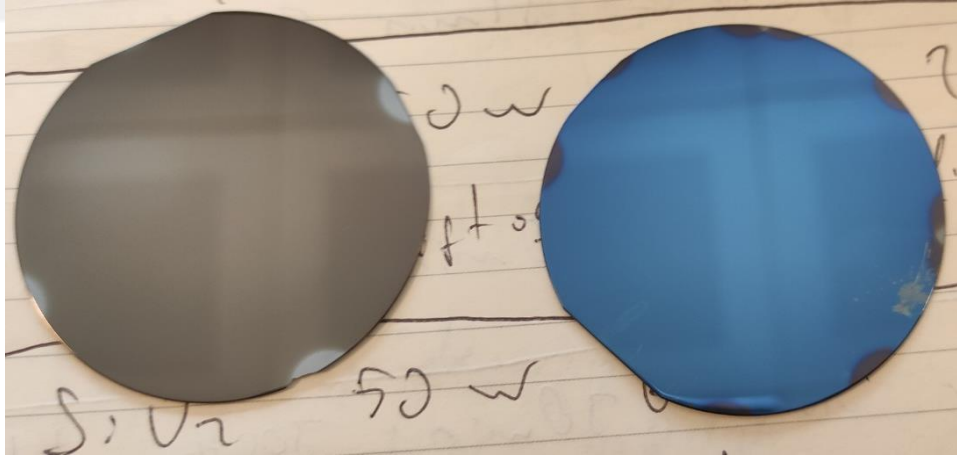
### 5.2.3 Gate yalıtkanının üretilmesi

SiO<sub>2</sub> ince film transistörde gate dielektriği olarak kullanılacak olup, kanal yarıiletkeni ile gate elektrodu arasındaki polarizasyonu sağlayacaktır. Kullanılan dielektrik malzemenin türüne ve kalınlığına göre oluşacak kapasitif etki değişeceği için bu direkt olarak transistör parametrelerini değiştirmektedir. Bu tez çalışmasında öncelikli olarak bütün parametreler SiO<sub>2</sub> verileriyle planlanmıştır. Aynı zamanda test çipi üzerinde üretilen tüm filmlerin (IGZO, SiO<sub>2</sub>, ITO) testleri de ayrıca yapılabilecektir.

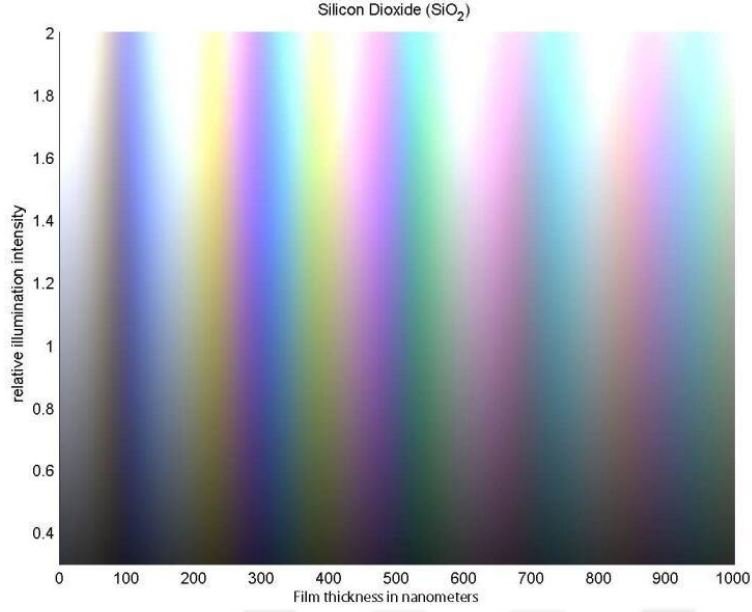


Şekil 5.30 2 inç'lik Silikon Wafer üzerine yapılan SiO<sub>2</sub> kaplaması

Bu tez kapsamında SiO<sub>2</sub> ince filmleri diğerlerinden ayıran en önemli özelliklerden birisi de film kalınlığına göre rengin değişiyor olmasıdır (Şekil 5.25). Şekil 5.24'teki filmin kalınlığı ve şekil 5.26'daki filmin kalınlığının tahmin edilebilir olması dolayısıyla litografi işlemi olmaksızın basit seviyede optimizasyon işlemi yapılabilir. Renkler birbirini periyodik olarak takip ettiği için süreyi değiştirerek daha net sonuçlar elde etmek mümkün.



Şekil 5.31 Silikon wafer üzerine yapılan farklı kalınlıklardaki SiO<sub>2</sub> ince filmlerin fotoğrafı



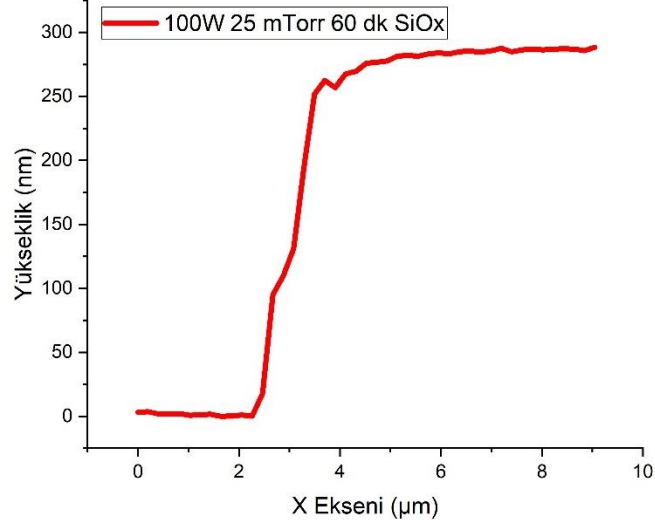
Şekil 5.32 Film kalınlığı ve ışık şiddetine göre SiO<sub>2</sub>'nin aldığı renkler ([Silicon Dioxide/Nitride Color vs. Film Thickness and Viewing Angle Calculator \(byu.edu\)](http://www.byu.edu/~jstuart/colorcalc/))

SiO<sub>2</sub> için yalnızca kaplama optimizasyonu yapılmış olup, litografi ve aşındırma işlemlerinin optimize edilmiştir.



Şekil 5.33 SiOx ince filmi kaplandığı kalınlığa göre farklı renklerde görünmektedir.

100W 20 mTorr Ar 5 mTorr O<sub>2</sub> ve 60 dakikada SiO<sub>2</sub> ince film üretilmiş ve AFM ile yapısal incelemeleri yapılmıştır (Şekil 5.23 ve 5.24). Kalınlığın 283 nm olduğu görülmüştür, bu da dakikada 4.71 nm'lik üretime denk gelmektedir. Yüzey pürüzlülüğünün ise bölgesel olarak değişmekle birlikte ortalama 4 nm olduğu ölçülmüştür.



Şekil 5.34 100W 20 mTorr Ar 5 mTorr O<sub>2</sub> ve 60 dakikada üretilen SiO<sub>2</sub> ince filmin kalınlığı



Şekil 5.35 10 µm x 10 µm'lik bir alandan alınan AFM görüntüsü, yüzey pürüzlülüğünün ortalama 4 nm olduğu ölçülmüştür

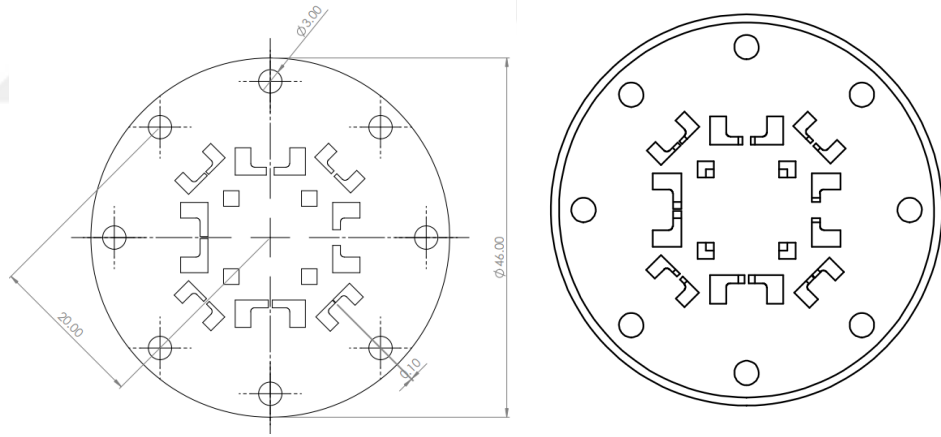
### 5.3 Çok Katmanlı Yapının Üretilmesi

Her bir katmanın tek başına optimize edilmesi kadar birden fazla katmanın da üretim sırasına göre optimize edilmesi önemlidir. Çünkü katmanlar arası istenmeyen kontaklar, birbirlerine uyguladıkları stres dolayısıyla çatlama vb. problemler olabilmektedir. Bu durum da daha önceden tekil olarak optimize edilen ince filmin tekrardan çok katmanlı yapı için test edilmesi anlamına gelmektedir.

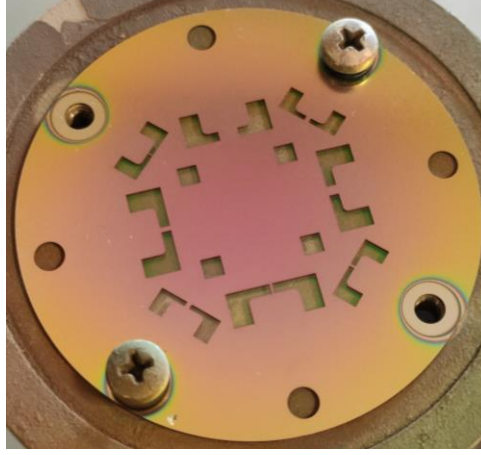
Tez süresince lift-off, gölgeleme maskesi, tamamen kaplayarak aşındırma gibi birçok metot denenmiştir. Her metodun kendi içerisinde kolaylıkları ve

dezavantajları bulunmaktadır. Farklı zamanlarda birkaç kez farklı metotlar denenmiştir ancak tez bütünlüğü açısından tek bir sıra ile verilecektir.

Gölgeleme metodunda herhangi bir kimyasal kullanılmıyor olup, kaplama maskedeki boşluklardan altına yapılaşmasıyla gerçekleşmektedir. Bu metot oldukça kolay ve pratik olup, hassasiyet gerektirmeyen işlerde başarılı olmaktadır. Aynı zamanda çok katmanlı yapının testlerinde çatlama, stres gibi durumlar hakkında da hızlı bilgi edinilmesini sağlamıştır. Şekil 5.28’de tasarımı yapılan ve 125  $\mu\text{m}$ ’lik paslanmaz çelik levhaya ürettirilen tasarım görülmektedir. Bu tasarım 2 adet maskeden oluşuyor. En alt gate elektrodu tamamen kaplanıyor. Üstüne yapılan  $\text{SiO}_x$  ince filmde ise ITO’dan kontak alabilmek için küçük bir boşluk bırakılıyor ve tamamen kaplanıyor. Üzerine Drain-Source üretimi için ilgili maske konularak kaplama yapılıyor. Son olarak yarıiletken maskesi ile IGZO kaplanmaktadır. Şekil 5.28’de verilen resimde üretim esnasında drain-source maskesi altta olmaktadır ancak yapının görülebilmesi için alta yarıiletken maskesi konularak görüntü alınmıştır.

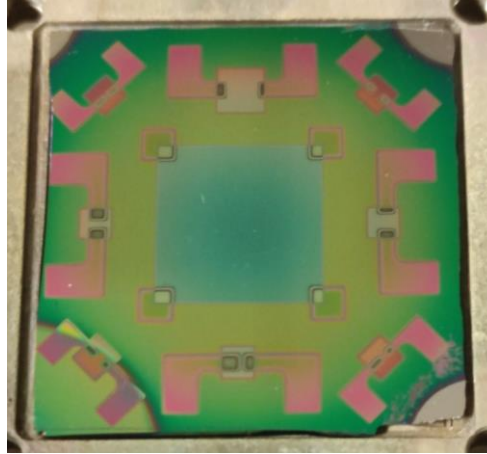


Şekil 15.36 – Maske 1 ve Maske 2 üst üste görüntülenmiştir.



Şekil 5.37 Gölgeleme metodu ile üretilen ITO ince film (maskesiyle birlikte çekilmiş)

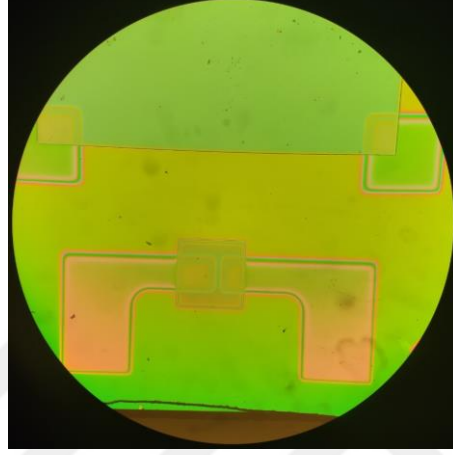
Gölgeleme maskesindeki en büyük problemlerden birisi yapıların küçülmesiyle birlikte hizalamanın da zorlaşmasıdır. 5.29'da üretilen drain-source elektrotları üzerine yarıiletken maskesinin hizalaması 50-150  $\mu\text{m}$  hata ile yapılabilmektedir. Hata payı örnek tutucuya yerleşik manipülatör ile 10  $\mu\text{m}$ 'ye kadar indirilebilir ancak bu durumda hem sputter içerisine çok fazla yabancı parça girmiş olacak, hem de bir süre sonra manipülatörler film kaplanması dolayısıyla kullanılmaz hale gelecektir.



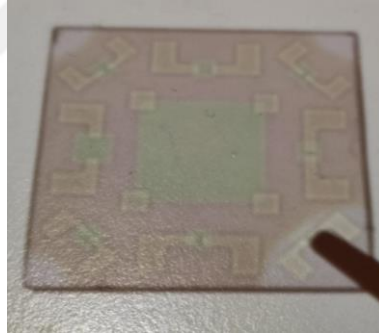
Şekil 5.38 Gölgeleme maskesi ile Si wafer üzerine üretilen transistör yapıları

Üretimi tamamlanan transistör yapısı şekil 5.30'da görülmektedir. İlk bakıldığında genel itibariyle nizami duran transistörler, mikroskop altında şekil 5.31'deki gibi durmaktadır. Yarıiletkenin 100  $\mu\text{m}$ 'den fazla sola kaydığı görülmektedir. Bu transistörün çalışmasına engel değildir.

Gölgeleme maskelerindeki diğer bir problem ise maskenin kalınlığı dolayısıyla kenarlara doğru kalınlık gradyenti oluşturmaktır. Bu durum hem görsel olarak hem de performans olarak problem yaratmaktadır. 5.31'deki görselde drain ve source elektrotlarının birbirine yaklaştığı bölgede kalınlık giderek incelmektedir. Bu hem transistör iletkenliğini olumsuz etkilemektedir hem de hatların rahat seçilememesine sebep olmaktadır.



Şekil 5.39 Gölgeleme maskesi ile üretim sonucunda elde edilen transistör yapısı

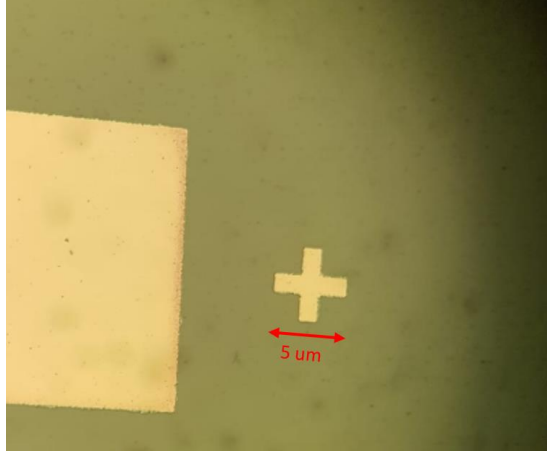


Şekil 15.40 - Gölgeleme maskesi ile oluşturulan transparan TFT yapısı, bu resim TFT'nin üretildiği camın değil, camdan beyaz zemine yansıyan gölgesinin resmidir. Sağ alt köşedeki cımbız gölgesinden de anlaşılmaktadır.

Fotolitografi ile yapılan üretimler hem daha profesyonel sonuçlar vermektedir hem de tekrarlanabilirliği çok yüksektir. Ancak fotorezist maliyeti, maske hizalayıcı, "spin coater" sistemi gibi ekipmanların gereksinimi dolayısıyla yüksek maliyetli bir laboratuvar altyapısı gerektirmektedir.

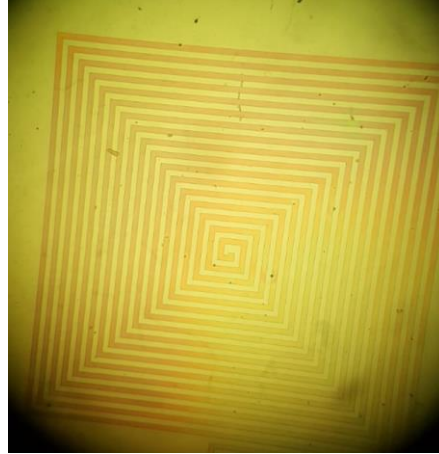
ITO ince filmler üzerine AZ6632 fotorezist kaplanmış ve fotolitografi çalışmaları yapılmıştır. Fotorezist kaplaması öncesi fotorezistin yüzeye iyice yapışması için TI Prime kullanılmıştır. Bu sayede ince film üzerindeki adezyon

kuvveti artmış ve fotorezist yüzeye daha iyi yapışmıştır. Bu işlem kimyasal aşındırma sırasında fotorezistin yüzeyden kalkmasını büyük oranda azaltmaktadır.

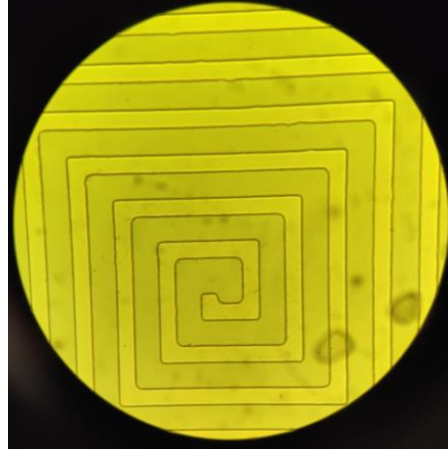


Şekil 5.41 ITO ince film üzerinde kaplanan fotorezistin fotolitografi sonrası görüntüsü.

Şekil 5-33'te de görüleceği üzere fotolitografi işlemi oldukça başarılı gerçekleşmiştir. Hatlar oldukça keskin ve kenarlarda herhangi bir ovalleşme meydana gelmemiştir. Şekil 5.34'te ise sarmal bir yapı ile deneme yapılmıştır. Sarmal yapı içerisindeki fotorezistin tamamen boşaldığı görülmektedir. Ancak pozlama süresi ve developer içerisinde bekletilen sürenin optimize edilmemiş olması dolayısıyla şekil 5.35 ve 5.36'daki köşelerin ovalleştiği görülmüştür.

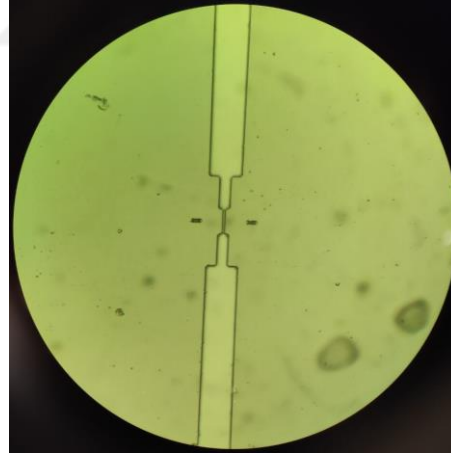


Şekil 5.42 SiO<sub>2</sub> üzerine yapılan bu fotorezist denemesinde sarmal yapı başarılı bir şekilde oluşturulmuştur.



Şekil 5.43 5.34'te verilen görselin 10x'te yakınlaştırılmış fotoğrafı

Fotorezist üreticisi Microchemicals firması hemen her türlü yüzeyde adezyonu artıracak çeşitli kimyasalların satışını yapmaktadır. Ancak metaller için farklı, seramik bazlı ince filmler için farklı, polimerler için farklı kimyasallar kullanılmaktadır. Tüm bunların satın alınması maliyetli olduğu için tüm doktora süresince yüzlerce kez fotolitografi çalışması yapılmıştır. Şekil 5.39'da ITO ince film üzerinde başarılı bir şekilde üretilen desene ait fotoğraf görülmektedir.



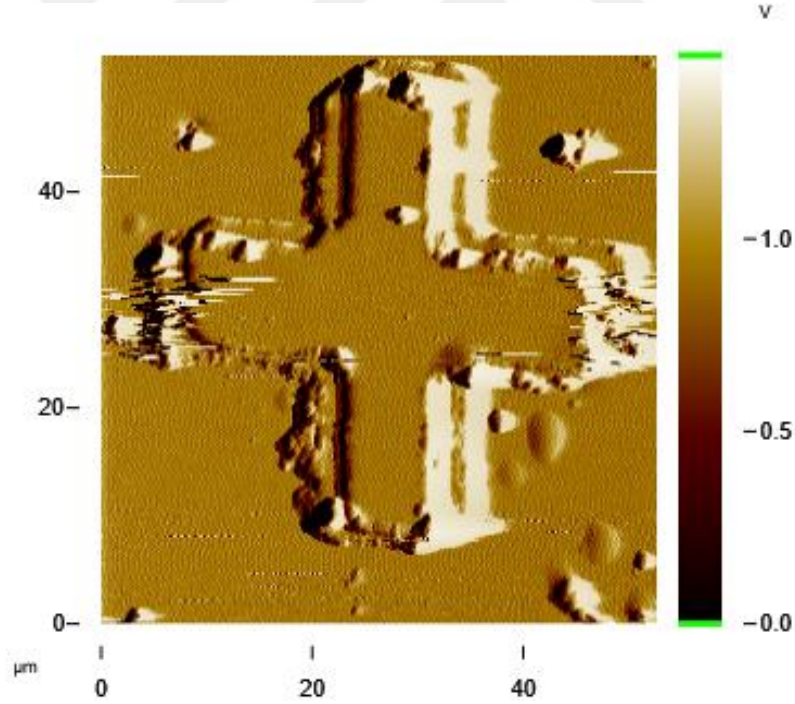
Şekil 5.44 ITO ince film üzerine kaplanan fotorezist ile 2  $\mu\text{m}$ 'lik desenin başarılı bir şekilde çıktığı görülmüştür.

ITO ince film üzerine yapılan fotorezist kaplamalarının yüzeye sadece cama göre daha iyi tutunduğu gözlemlenmiştir. 5.37'de verilen görsellerde fotorezist ile cam yüzey arasında boşlukların olduğu, developing işlemi sırasında çatlakların ve kalkmaların meydana geldiği görülmüştür. Bu problemin giderilmesi için hem yüzeyin adezyonunu artırmaya yönelik işlemler yapılmış, hem de örneğin "post-exposure bake" süresi uzatılmıştır.

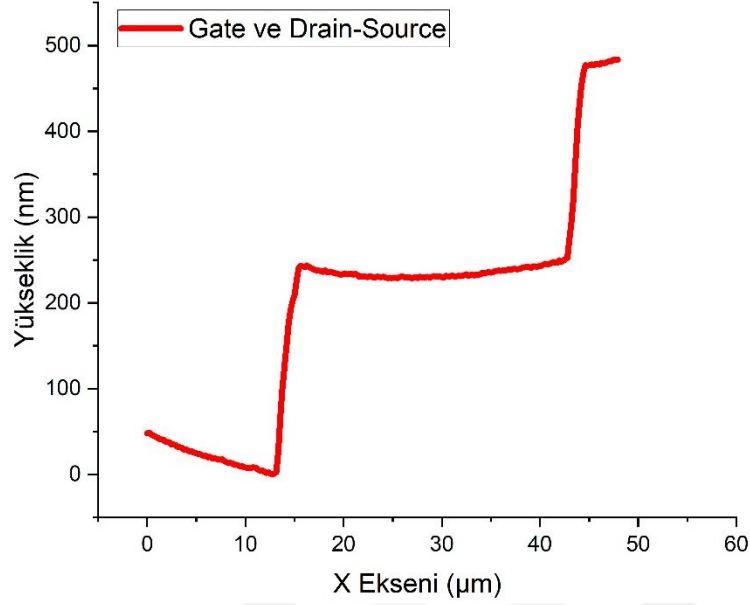
ITO ince film üzerine SiO<sub>2</sub> ince film kaplaması yapılmıştır. Yapılan çalışmalardan bazılarında SiO<sub>2</sub>'nin çatladığı görülmüştür. SiO<sub>2</sub>'nin ve ITO'nun üretim parametrelerinde değişiklik yapıldı ve 2 katmanlı yapıdan 3 katmanlı yapıya başarıyla geçildi.

ITO+SiO<sub>2</sub>+ITO çok katmanlı yapısında ise çatlamların daha belirgin olduğu görülmüştür. Şekil 5.40'ta verilen görseller en uç örnekler olup, problemin ne kadar önemli olduğunun görülmesi açısından önemlidir.

Çok katmanlı yapıların üretiminde kullanılan malzemeler, ortam sıcaklığı, nem, havadaki parçacık sayısı, ışık şiddeti vb etkenler üretimi etkilemektedir. Özellikle kullanılan fotorezist, alttaş gibi malzemeler üretimi doğrudan etkilemektedir. Bu tez kapsamında ileride yapılacak çalışmaları kısıtlamaması açısından üretimin standart mikroskop camı üzerine yapılması tercih edilmiştir. Ancak standart mikroskop camı üzerinde 1 µm'den daha büyük parçacıklar ve delikler bulunmaktadır. Bu deformasyonlar transistörlerin üzerine geldiğinde



Şekil 5.45 Kaplama yapılan cam üzerindeki kirlilikler dolayısıyla ince filmlerde meydana gelen deformasyonun gösterildiği bir AFM görüntüsü



Şekil 5.46 ITO (30W, 1.5mTorr, 15dk) + ITO (30W, 1.5mTorr, 15dk) iki katlı filmin X eksenine göre yüksekliği (Grafik ilk ITO katmanına göre düzeltilmiştir.)

### 5.3.1 Kimyasal aşındırma

Desenlendirilmiş fotorezist ile kaplı ince filmin istenmeyen kısımlarının kaldırılması için ıslak aşındırma veya kuru aşındırma yapılmaktadır. Islak aşındırma kimyasallar ile yapılırken, kuru aşındırma hızlandırılmış atomlarla/iyonlarla veya reaktif gazlarla yapılmaktadır.

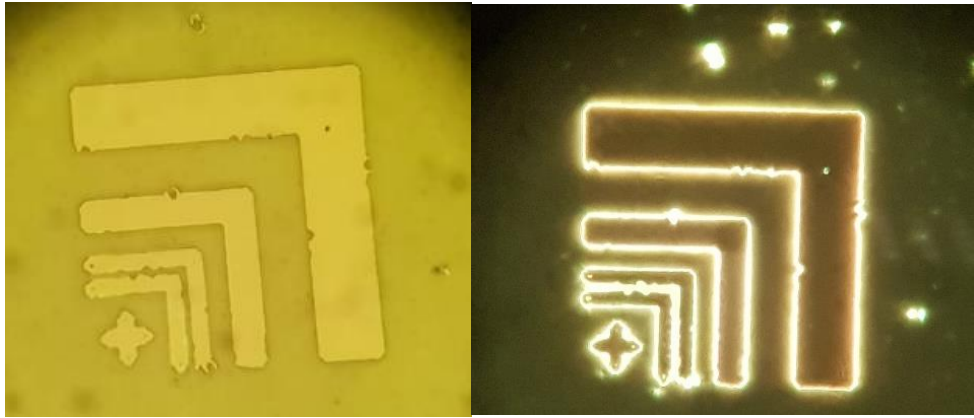
Kullanılan IGZO, SiO<sub>2</sub>, ITO ince filmleri bazı kimyasallarla tepkimeye girerken bazıları ile de herhangi bir tepkimeye girmeyerek formlarını korumaktadır. Bu durum seçici aşındırma (selective etch) ve seçici olmayan aşındırma olmak üzere ikiye ayrılabilir. Bununla beraber kimyasalın dokunduğu tüm düzlemlerin aynı anda tepkimeye girdiği izotropik aşındırma ve yalnızca belirli düzlemlerin tepkimeye girdiği anizotropik aşındırma da kullanılabilir. Üretilen ince film transistörün oda sıcaklığında yapılması yapının tüm katmanlarının büyük oranda amorf olmasına sebep olmaktadır. Bu yüzden kullanılan teknik izotropik kimyasal aşındırmadır. Silikon kristali KOH ile <100> düzlemine göre 54 derece ile tepkimeye girmektedir. Bu durum hem bir tampon bölge oluşturulmasına izin vermekte hem de açılı yapıların oluşmasını sağlamaktadır. Aşındırma işleminin çok hızlı veya yavaş olması istenmemektedir. Hızlı ve izotropik aşındırma ile hedeflenen deseni elde etmek zor ve risklidir. İnce filmin kalınlığı yapısı ve

kullanılan asitin türüne bağlı olmakla birlikte optimum aşındırma hızı 100-250 nm/dk denebilir.

ITO oldukça kararlı bir yapı olup bazı asitlerle yavaş tepkimeye girerken bazıları ile de hiç tepkimeye girmemektedir. HCl ile 20 nm/dk hızla tepkimeye girerken film kalınlığına bağlı olarak 8-10 dk içerisinde tamamen yok olurken bir başka asit ile çok yavaş veya hiç tepkimeye girmeyerek formunu korumaktadır. Buna karşın ZnO ve AZO HCl, HF, fosforik asit ile çok hızlı bir şekilde tepkimeye girerek tamamen kalkmaktadır.

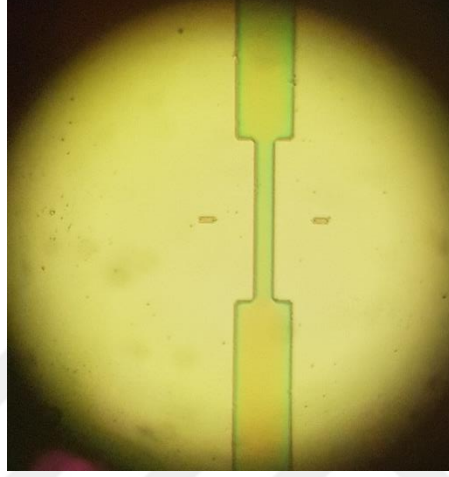
ITO, HCl (%37), HNO<sub>3</sub> (%68) ve DI ultra saf su ile sırasıyla 8:2:3 oranlarında bir karışım hazırlanarak 20 nm/dk hızla aşındırılmıştır. ZnO ve AZO, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (%87) ve DI ultra saf su ile hazırlanan 1:100 oranındaki karışım ile 200 nm/dk hız ile aşındırılmıştır. Buna ek olarak HCl ve DI ultra saf su ile hazırlanan 1:200 oranında karışım ile de aşındırılma işlemi yapılmıştır ancak ITO'yu da aşındırabileceği için bu TTFT üretiminde tercih edilmemiştir. SiO<sub>2</sub>, HF (%49) ve DI ultra saf su ile hazırlanan 1:10 oranında hazırlanan karışım ile 100 nm/dk hız ile aşındırılmıştır.

Oda sıcaklığında yapılan ITO ince filmlerin kimyasal aşındırma işleminde bazı problemler ortaya çıkmıştır. Bu problemlerden en önemlisi ince filmler üzerinde bazı noktalarda yuvarlak kusurlar ortaya çıkmasıdır. Şekil 8'de verilen resimde de görülmektedir.



Şekil 8 - ITO ince filme HCl:HNO:H<sub>2</sub>O 5:1:10 oranlarında 35 Derecede yapılan kimyasal aşındırma işlemi

Bu kusurlar büyük oranda üzerine kaplama yapılan camlardan kaynaklanmaktadır. Buna ek olarak kimyasal reaksiyonun hızının da etki ettiği gözlemlenmiştir.



Şekil 11 - Başarılı bir ITO kimyasal aşındırma denemesi

Gate elektrodu olarak kullanılacak olan ITO ince film üzerine Gate dielektriği olarak kullanılmak üzere  $\text{SiO}_2$  ince film denemeleri yapılmıştır. Normal cam üzerine yapılan  $\text{SiO}_2$  kaplamalarında herhangi bir probleme rastlanmamışken ITO üzerine  $\text{SiO}_2$  ince filmin aşındırma sırasında parçalandığı görüldü. Şekil 12’de  $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$  1:10 çözeltisinde ~30 saniye sonra meydana gelen ince filmin parçalanması görülmektedir.

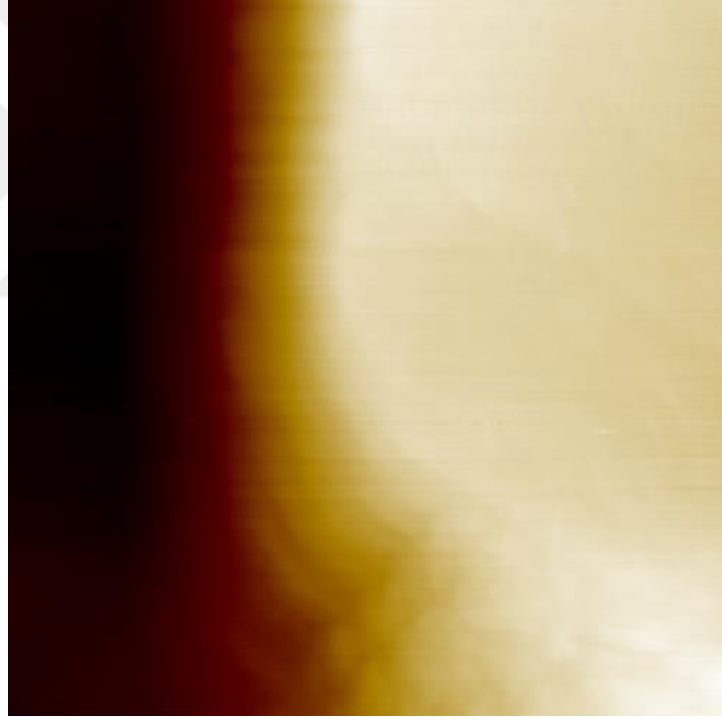
Maske kullanımı fotolitografi ve aşındırma işlemlerine olan ihtiyacı ortadan kaldırdığı için yaygın olarak kullanılan metotlardan birisidir. Bu tez projesinde TFT üretimi için gölgeleme maskesi üretilmiştir.

İşlem süreci şu şekilde gerçekleşmiştir. Temizlenen cam altlık üzerine komple ITO kaplanmıştır. Bu katman üzerinde hiçbir işlem yapılmadan gate elektrodu üzerinden kontak alınabilecek kadar bir boşluk bırakılarak geri kalan kısma  $\text{SiO}_2$  kaplanmıştır. Ardından Maske 1 kullanılarak Drain ve Source elektrotları kaplanmış ve son olarak maske 2 kullanılarak kanal yarıiletkeni olan IGZO kaplanmıştır. Tüm bu kaplamaların sonucunda elde edilen yapı şekil

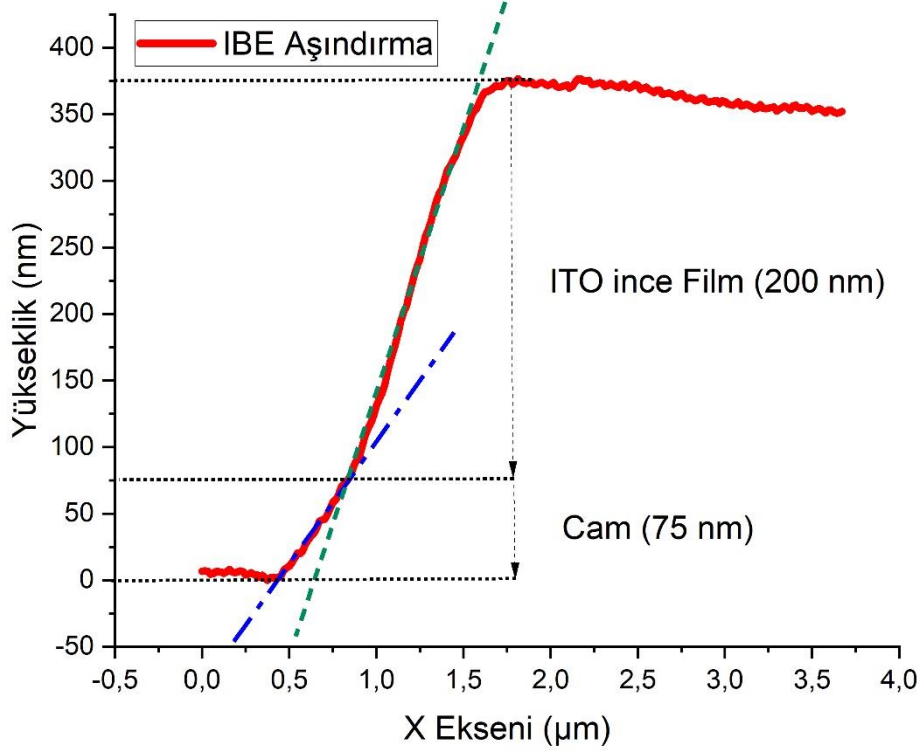
Daha önceki dönemlerde ince film transistörü oluşturan her katman ayrı ayrı optimize edilmişti. Bu optimizasyon çalışmalarında oda sıcaklığında üretilen ITO ince film için yüzey direnci 30-50 ohm  $\square$  aralığında elde edilmiştir.

ITO ince film üzerine yapılan SiO<sub>2</sub> ince filminde herhangi bir problem oluşmamaktadır. Ancak 2 ITO ince film arasında kalan SiO<sub>2</sub> ince filminde mikro çatlaklar meydana gelmektedir. Mikroskop altında 100x büyütmede ve dark field modunda bakıldığında çatlaklar oldukça belirgin görünmektedir.

### 5.3.2 Kuru aşındırma



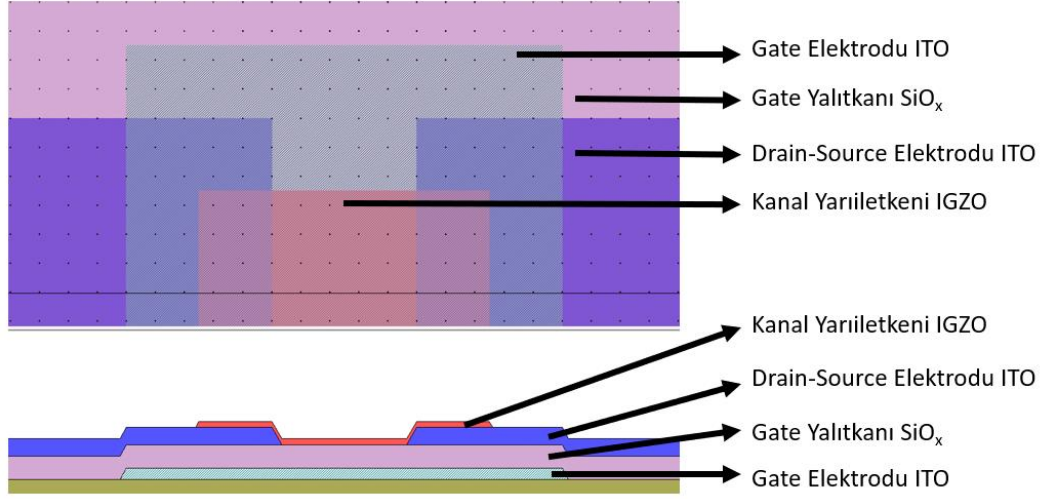
Şekil 5.47 AFM ile alınan ITO IBE aşındırma görüntüsü



Şekil 5.48 IBE Test sırasında hem ITO ince filmin aşındırılması hem de üzerine kaplı olduğu camın aşındırıldığı görülmektedir.

#### 5.4 İnce Film Transistörlerin Üretilmesi

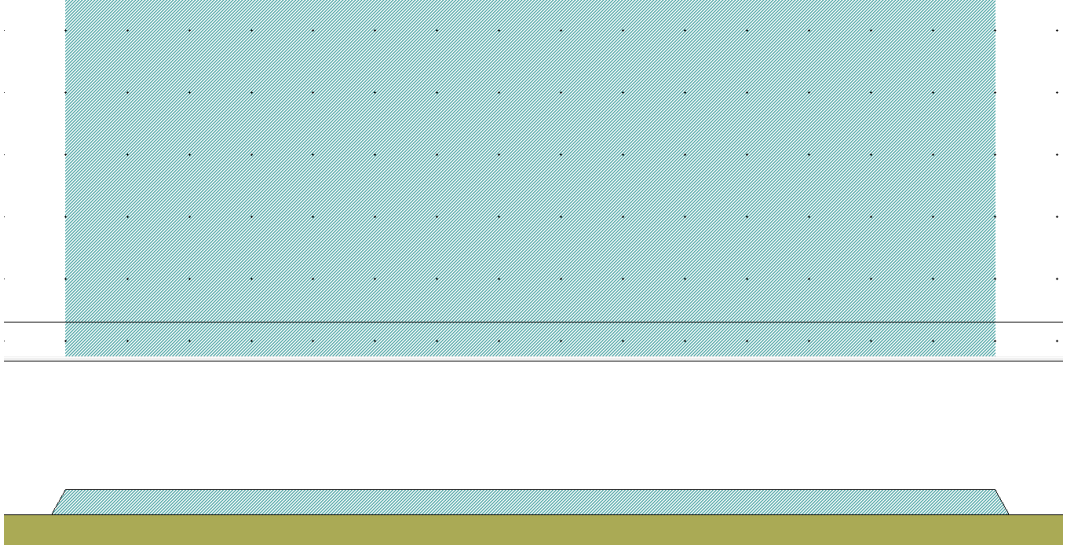
İnce film transistörler Bölüm 5.3'te kısaca değinilen 1000 taneden fazla ince filmin üretiminden elde edilen deney ve tecrübelerle yapılmıştır. Bu tez için tasarlanan TFT maskesinde bottom gate ve top gate yapılarının her ikisi de yapılabilir olsa da IGZO'nun son aşamada yapılması hem aşındırma sürecinde oluşabilecek problemleri ortadan kaldırmaktadır hem de yalnızca IGZO'nun tamamen aşındırılıp yeniden yapılması ve yalnızca IGZO'nun etkisini inceleyebilme açısından kolaylık sağladığı için son aşamada üretilmiştir. Şekil 5.45'te verilen transistör yapısında hem transistörün üstten görünümü (bir kısmı) hem de ilgili görünümün kesiti verilmiştir. Kesitte de görüldüğü üzere ilk katman Gate elektrodu olan ITO'dur, ardından üzerine Gate dielektriği kaplanmış, ardından Drain-Source elektrodu ve son olarak kanal Yarıiletkeni olan IGZO kaplanmıştır.



Şekil 5.49 TFT yapısının görünümü. Üstteki şekil yapının üstten görünümüdür. Altteki şekil ise siyah çizgi ile gösterilen yerden alınan yan kesit görünümüdür

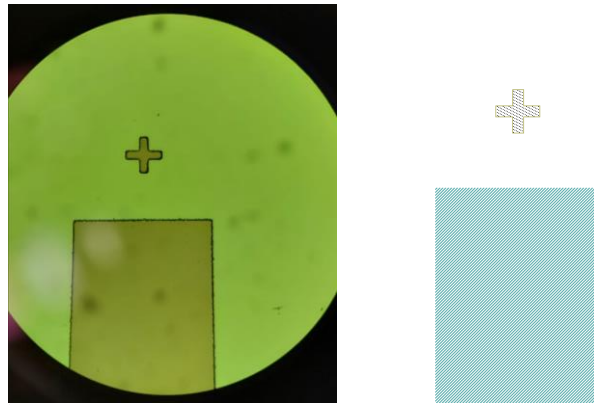
Aşağıda aşamaları tek tek verilen TFT yapısı tamamen “lift-off”, tamamen kimyasal aşındırma, tamamen kuru aşındırma ve tüm bunların farklı aşamalarda kullanıldığı metotlarla yapılmıştır. İlk katmanın açılı üretilmesi için “ion gun” ile aşındırma yapılmaktadır. Bu da sonraki aşamalarda katmanların açılı olarak devam etmesini sağlamaktadır. Tüm bunlardan bağımsız olarak verilen şekillerde anlaşılabilir olması açısından tüm katmanların kenarları  $60^\circ$  açılı olarak gösterilmiştir.

Şekil 5.46’da verilen resimde ITO gate elektrodunun üretildikten sonraki kesiti ve üstten görünümü görülmektedir. İlk katman olan bu katman TFT yapısının en önemli katmanıdır. Bu katmanda meydana gelen herhangi bir kirlilik, kalıntı ya da deformasyon diğer tüm katmanlarda artarak kendini göstermektedir. Aynı zamanda bu katmanın üstüne yapılacak olan SiOx katmanından daha ince olması Gate ile Drain-Source elektrotları arasındaki kısa devrenin önüne geçilmesini sağlamaktadır. Yapılan TFT’lerde bu katman genel olarak 100 nm ile 200 nm aralığında yapılmıştır.



Şekil 5.50 Üstteki resim üstten görünüm, alttaki resim ise yanal kesitidi. 1. Aşama: **ITO Gate elektrodu**

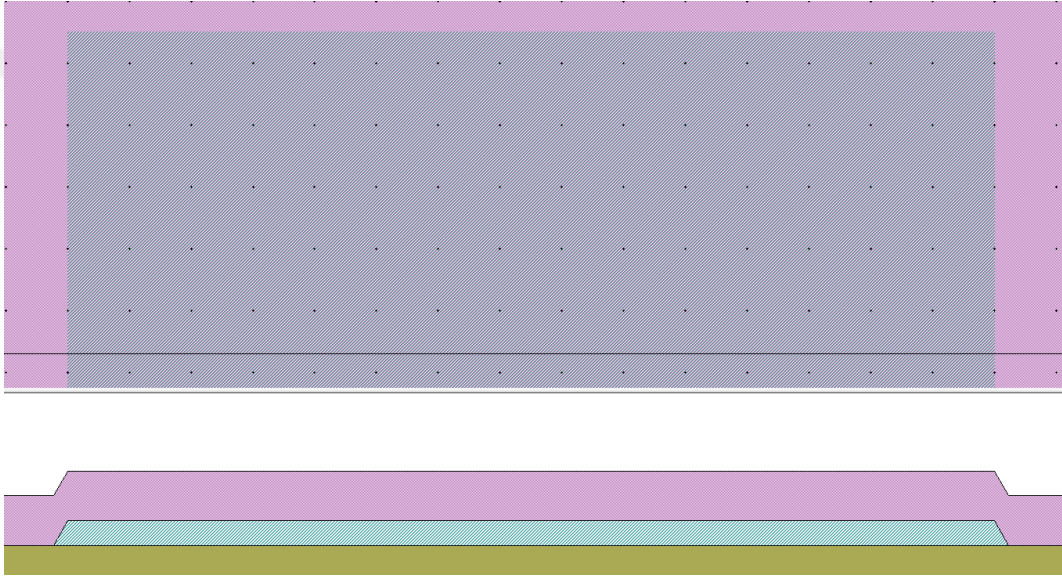
Şekil 5.47’de transistörün ikinci aşaması olan ITO Gate elektrodu üzerine yapılan  $\text{SiO}_x$  Gate yalıtkanı gösterilmiştir. Gate elektrodu ile Drain-Source elektrotlarını birbirinden yalıtacak ve Gate’e uygulanan potansiyel ile polarize olup yarıiletkende kanal açacak olan bu katmanda çatlaklar olmaması büyük önem taşımaktadır. Bu katmandaki deformasyon kısa devreye sebep olmaktadır ve transistörün çalışmamasına sebep olmaktadır. Aynı zamanda bu katmanın üretim parametreleri diğer katmanlara göre büyük önem taşımaktadır. İki ITO katmanı arasında kalan  $\text{SiO}_x$  yüzey gerilimleri dolayısıyla strese uğrayıp çatlamaktadır. Tüm TFT çalışmaları boyunca 2. Ve 3. Aşamaların optimizasyonu için yüzlerce deneme yapılmıştır.



Şekil 5.51 Soldaki resim mikroskop görüntüsü, sağdaki resim ise tasarım görüntüsü, Gate elektrodunun üretilmesi

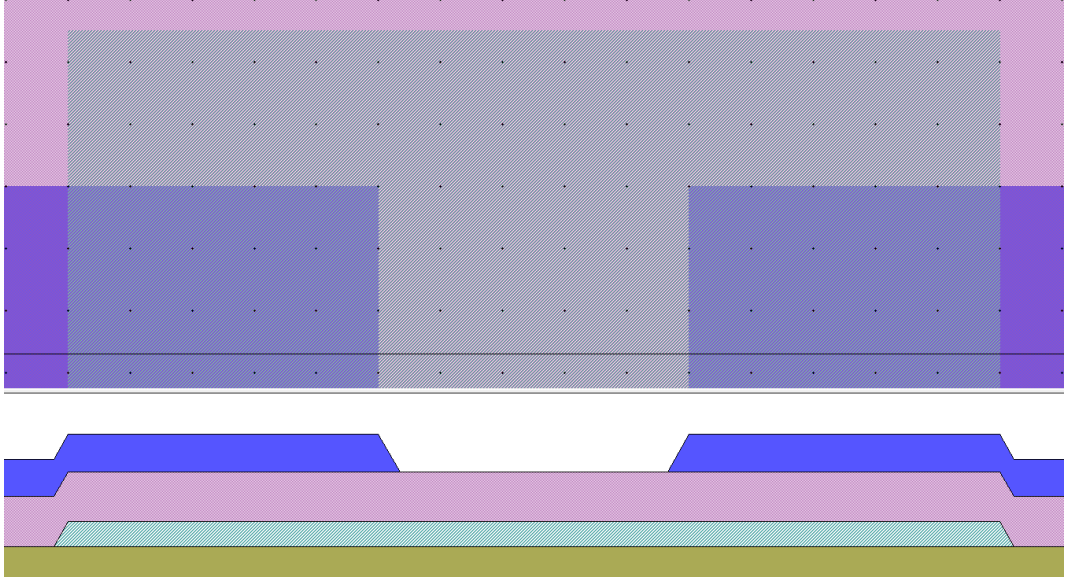
Şekil 5.51’de verilen tasarım (sağdaki) gate elektroduna ait olup, cam üzerine ITO kaplaması ve sonrasında desenlemesi ile oluşmuştur (soldaki mikroskop görüntüsü).

Gate yalıtkanı bir önceki aşamada da bahsedildiği üzere gate elektrodundan daha kalın yapılmaktadır. Bu yapı tekniği ile 1. Ve 3. Katmanlar arasındaki kısa devrenin önüne büyük oranda geçilmektedir. Aynı zamanda lift-off ya da aşındırma sırasında kenarlarda kalabilme ihtimali olan parçaların da bir üst katmana teması engellenmektedir.

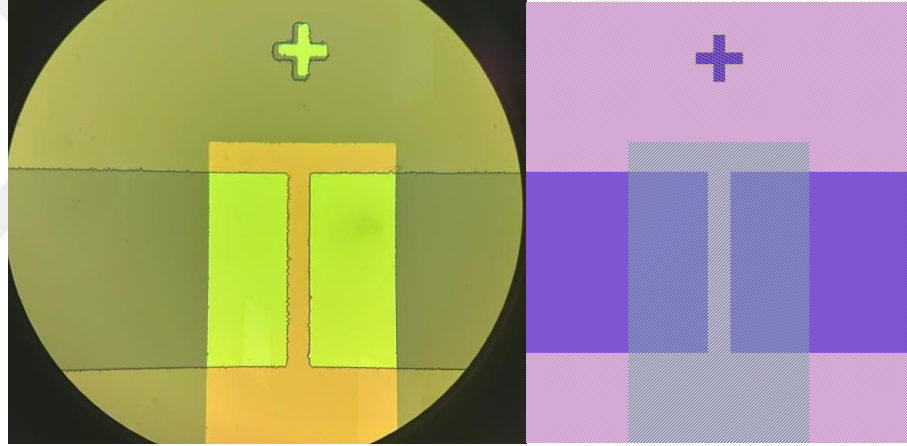


Şekil 5.52 Üstteki resim üstten görünüm, alttaki resim ise yan kesitidi. 2. Aşama: ITO Gate Elektrodu +  $\text{SiO}_x$  Gate Yalıtkanı

Şekil 5.48’de verilen resimde TFT’nin 3. Katmanı olan Drain-Source elektrodunun aşındırma sonrası hali görülmektedir. Tercih edilen bottom gate yapıda ve bu maske tasarımında bu katmanın diğer katmanlara göre daha kalın veya ince olması herhangi bir avantaj getirmemektedir. En üste yapılacak olan IGZO kanal yarıiletkeni  $\text{SiO}_x$  katmanı sayesinde Gate elektrodundan izole haldedir.

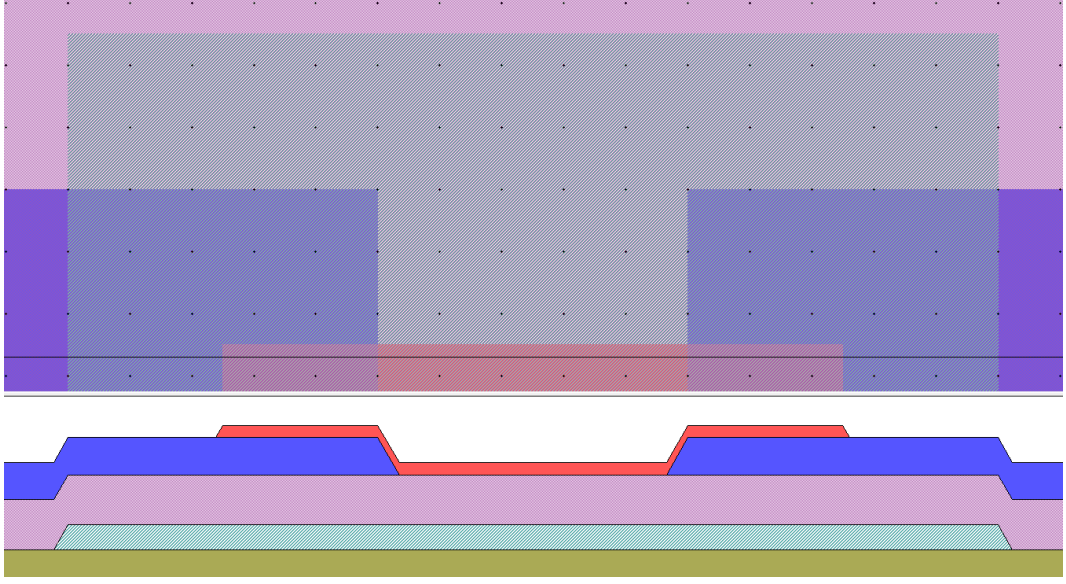


Şekil 5.53 Üstteki resim üstten görünüm, alttaki resim ise yanıl kesitidi. 3. Aşama: ITO Gate Elektrodu + SiO<sub>x</sub> Gate Yalıtkanı + **ITO Drain-Source Elektrodu**

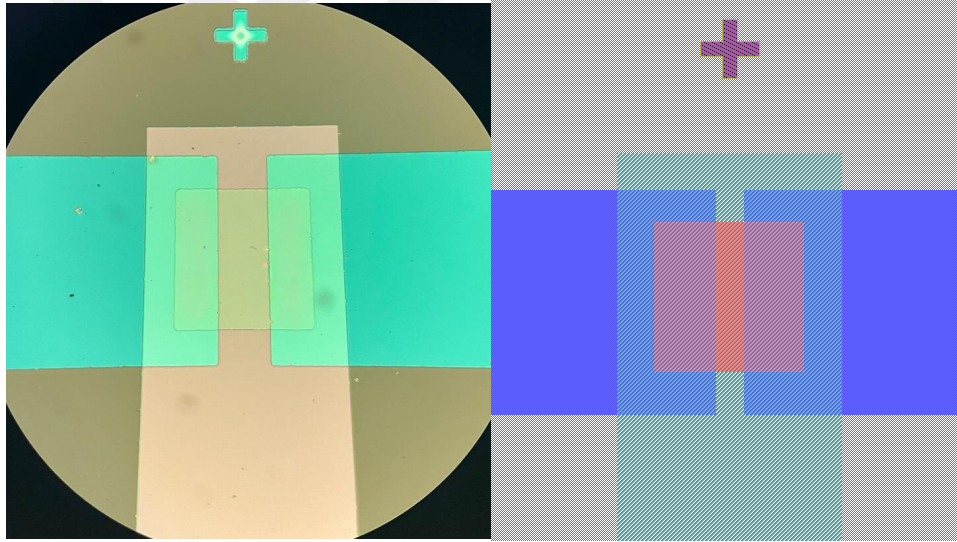


Şekil 5.54 - Soldaki resim mikroskop görüntüsü, sağdaki resim ise tasarım görüntüsü Gate elektrodu ve Gate dielektriği üzerine yapılan Drain-Source elektrodu

Şekil 5.49'da verilen resim TFT yapısının 4. Ve son aşamasıdır. Bu aşamada transistör yapısı tamamlanmış olup teste hazır hale gelmektedir. IGZO'nun ZnO'ya göre daha stabil olması dolayısıyla bu katmandan sonra herhangi bir katman yapılmıyordu. Ancak üretimden hemen sonra yapılan TFT testleri ile sonraki günlerde yapılan TFT testlerinde farklılıklar olması dolayısıyla daha sonradan bu katman üzerine koruyucu (enkapsülasyon) SiO<sub>x</sub> katmanı yapılmaya başlanmıştır. Bu sayede TFT yapısı haftalar sonra bile aynı performansta çalışmaya devam etmiştir.



Şekil 5.55 Üstteki resim üstten görünüm, alttaki resim ise yanal kesitidi. 4. aşama: ITO Gate Elektrodu +  $\text{SiO}_x$  Gate Yalıtkanı + ITO Drain-Source Elektrodu + **IGZO Kanal Yarıiletkeni**

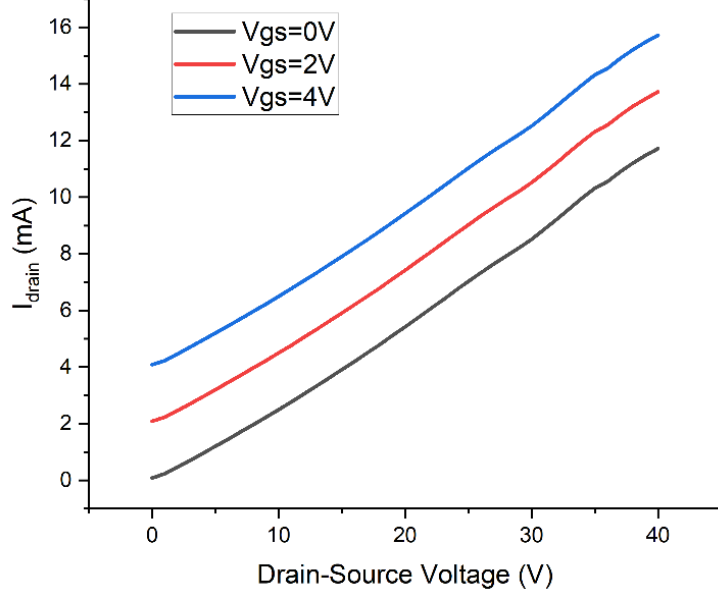


Şekil 5.56 Soldaki resim mikroskop görüntüsü, sağdaki resim ise tasarım görüntüsü, tüm aşamaları tamamlanmış, ince film transistörün 50x büyütme altındaki fotoğrafı

### 5.5 Test ve Analizlerin Yapılması

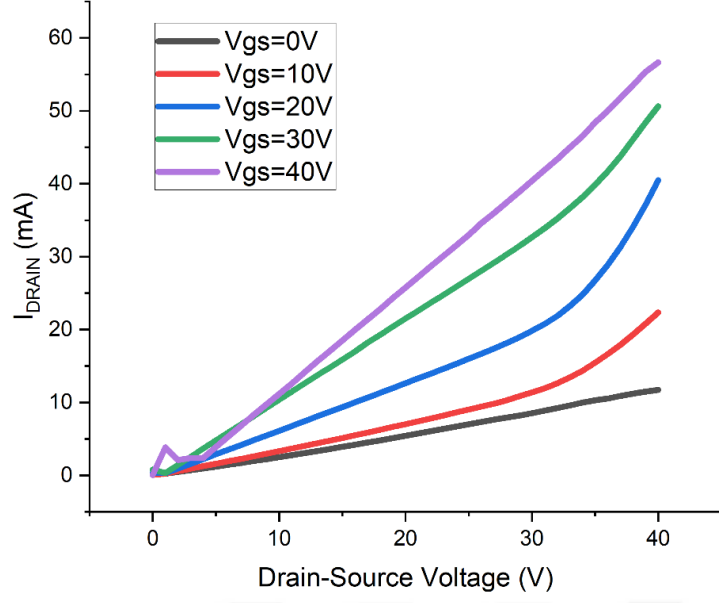
Şekil 5.48'de verilen ITO+ $\text{SiO}_2$ +ITO yapısında ilk katman Gate elektrodu, ikinci katman gate yalıtkanı ve üçüncü katman ise drain-source elektrodudur. İlk ITO katmanı ile ikinci ITO katmanı arasında herhangi bir elektriksel iletkenlik bulunmamalıdır. Fakat çatlaklar dolayısıyla iki katman birbirinden izole olamamakta ve 100-1000 ohm aralığında direnç okunmaktadır.

Drain-Source ve Gate Elektrodu arasında kısa devre olması durumunda alınan I-V grafiği Şekil 5.50’de görüldüğü gibi olmaktadır. Gate-Source arasına uygulanan potansiyel fark drain-source arasına uygulanan potansiyele “offset” olarak eklenmektedir. Bu da I-V grafiklerinin aıllarının aynı olmasına yani paralel olmalarına sebep olmaktadır.



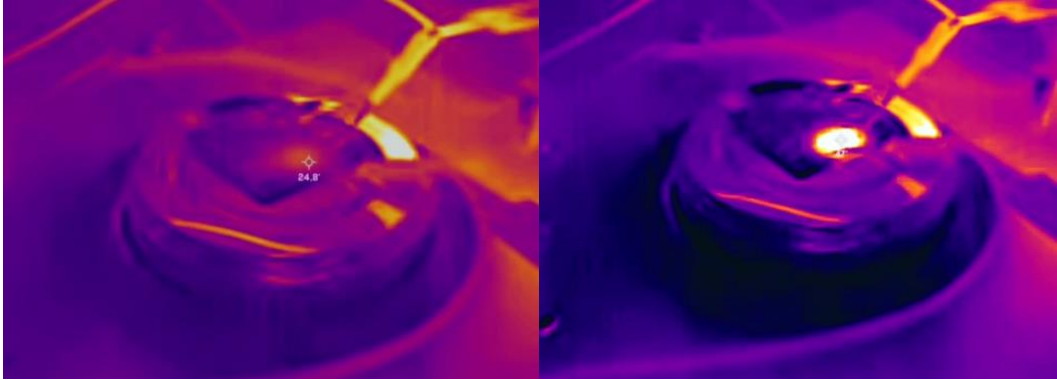
Şekil 5.57 - ITO katmanları altında sızıntı varken alınan I-V grafiği

Şekil 5.51’de verilen lmde Id akımının saturasyona girmesi beklenektedir ancak tam tersi Şekilde akımın giderek arttığı görülmektedir. Bunun sebebi ise IGZO ince filminden geçen akımın ince filmi ısıtması ve ısınan ince filmin daha fazla akım geçirmesine sebep olmasıdır.

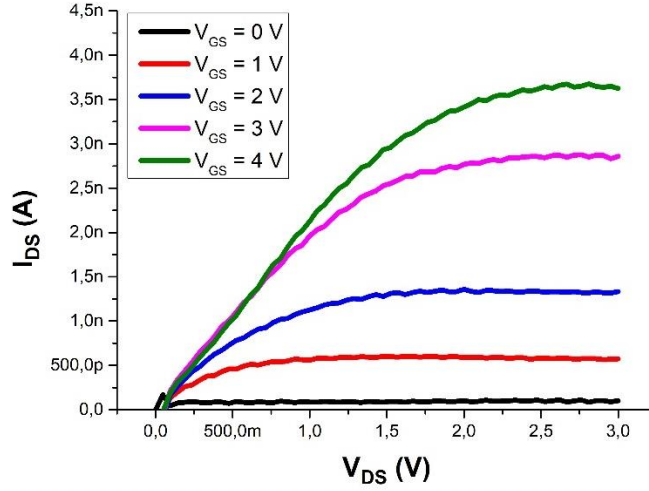


Şekil 5.58 - Gate yalıtkanı olarak alümin kullanıldığı ince film transistörün akım-voltaj grafiği

Şekil 5.52’de verilen resimlerde ise ölçümden önce ve ölçüm esnasındaki sıcaklığı verilmiştir. Bu resimlerde başlangıçta 24 C’de olan transistörün ölçüm esnasında ~50 C’ye çıktığı görülmektedir. Uygulanan potansiyel arttıkça drain-source arasında geçen akım da orantılı olarak artmaktadır. Ancak belli bir sıcaklıktan sonra çığ etkisi oluşmaya başlıyor ve akım sabit kalmayıp giderek artıyor.



Şekil 5.59 - Elektriksel testler sırasında termal kamera ile incelemesi yapılan ince film transistör



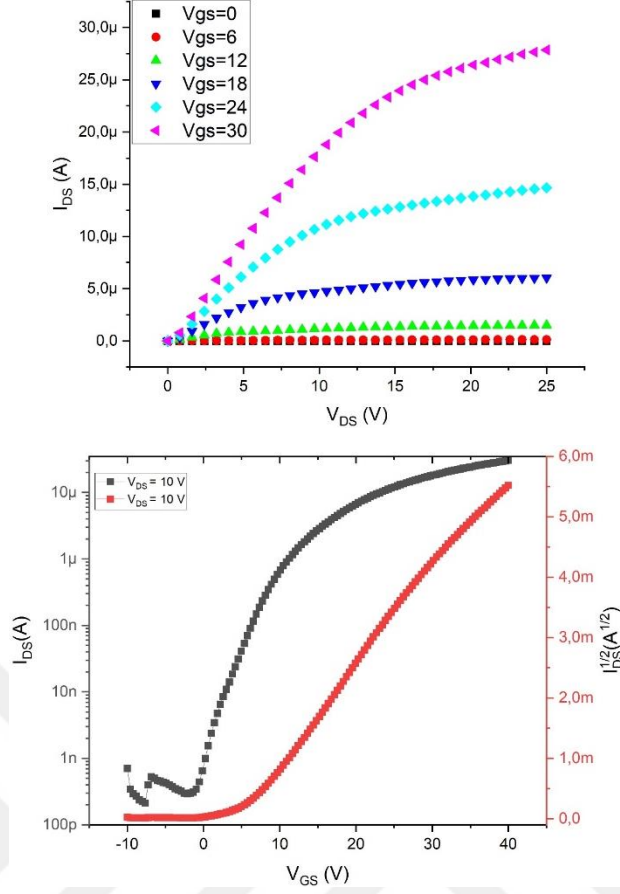
Şekil 5.60. 0 - 3 V Drain-Source voltajı aralığında, 0-4V Gate-Source Voltajı altında yapılan TFT ölçümü (W/L oranı 10/5)

Şekil 5.60'ta verilen TFT ölçümünde  $V_{GS} = 4V$  olduğu durumda  $\sim 4$  nA akım geçtiği görülmektedir. Akımın düşük olmasının sebeplerinden birkaçı 10 nm kalınlığında üretilen IGZO'nun mobilitesinin çok düşük olması ve öz direncinin yüksek olmasıdır. IGZO ince filmin çok ince olması dolayısıyla ölçüm çok hızlı (NPLC: 0,001) olarak alınmıştır, bu da ölçümde  $\sim 45$ -150 pA aralığında bir gürültüye ve hata payına sebep olmuştur.

Üretilen transistörlerin led sürücüsü olarak kullanılması hedeflendiği için daha fazla akım değerine ihtiyaç vardır. Bu yüzden filmlerin kalınlığı ve IGZO'nun elektriksel özelliklerini değiştirmek üzere bazı optimizasyon çalışmaları yapılmıştır.

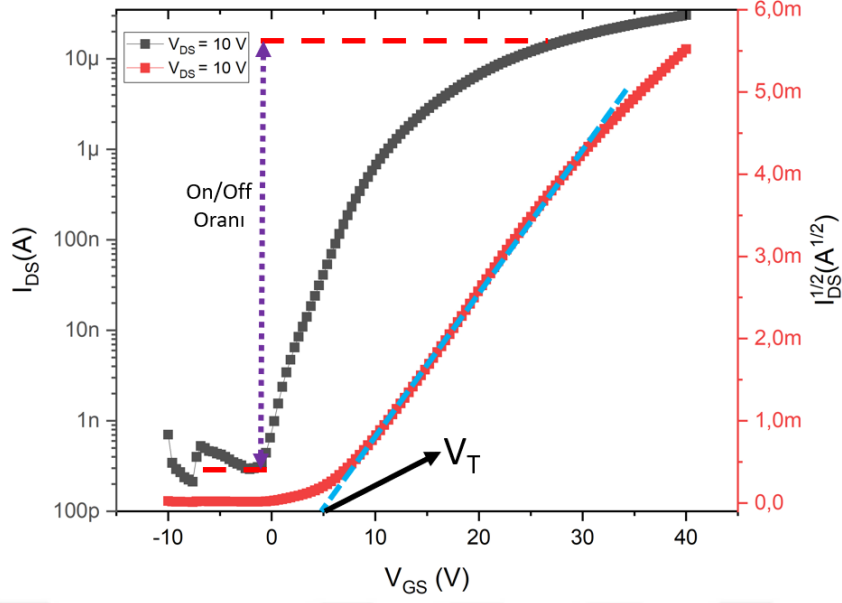
Bölüm 5.5'te bu ana kadar verilen başarısız TFT denemeleri tüm bu süreçte karşılaşılan problemlerin gösterilmesi ve kaynaklarının belirtilmesi içindir. Bu denemelerin birçoğunun tekrarlanabilirliği yok ya da çok düşüktür. Tekrarlanabilir, yüksek doğruluklu TFT'ler üretebilmek için ultra temiz bir laboratuvar ortamı, her aşamanın kontrollü yapılması ve çıkan her problemde sürecin yeniden başlatılması gerekmektedir.

Şekil 5.59'te verilen  $I_{DS}$ - $V_{DS}$  grafiği tez kapsamında üretilen TFT'ye aittir.



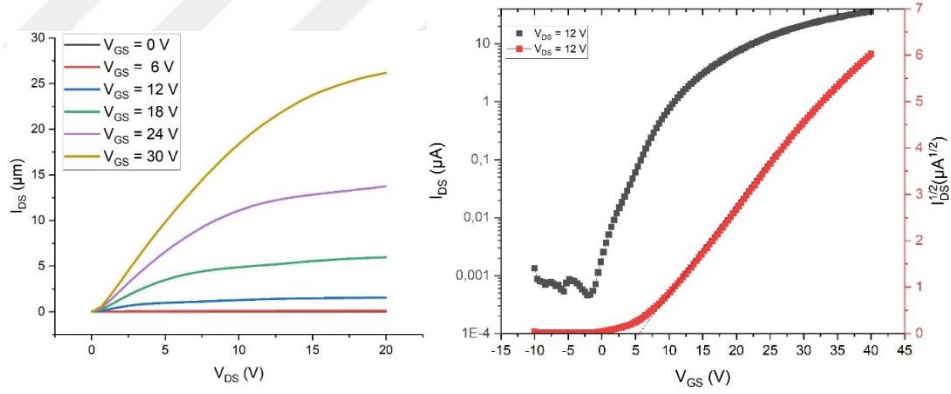
Şekil 5.61 Tez kapsamında üretilen 10/4 W/L oranına sahip ince film transistöre ait elektriksel ölçümler

Şekil 5.60'ta transistörün eşik voltajına için kırmızı ile çizilen  $V_{GS} - (I_{DS})^{1/2}$  grafiğinden ulaşabiliriz. Burada Grafiğin lineer bölgesi uzatıldığında  $(I_{DS})^{1/2}$  ekseninin 0 olduğu değer 5 V'ta kesmektedir. Bu ince film transistör için  $V_T = 5$  V'tur. On/Off oranına ise siyah ile çizilen  $V_{GS} - \log(I_{DS})$  grafiğinden ulaşılabilir.  $V_{GS}$ 'nin 0 olduğu nokta ile TFT'nin belirlenen maksimum çalışma değeri aralığında  $I_{DS}$  oranı bize on/off oranını vermektedir.  $V_{GS} = 0$  iken  $I_{DS}$  değeri  $215E-12$ 'dir. Bu transistör için maksimum  $V_{GS}$  değeri 30 V olarak belirlenmiştir.  $V_{GS} (30V)$  iken  $I_{DS}$  ise  $21E-6$ 'dır. Maksimum ve minimum  $I_{DS}$  değerleri oranlandığında ise  $\sim 10^5$  değerine ulaşılmaktadır.



Şekil 5.62 Şekil 5.57’de verilen  $V_{GS}$ - $I_{DS}$  grafiğinin parametrelerinin analizini gösteren diyagram

Şekil 5.59’da elektriksel test sonuçları verilen transistörün analizi yapılmıştır. Transistörün eşik voltajı 5.01 V çıkmıştır.



Şekil 5.63 W/L oranı 10/3 olan TFT’nin  $V_{DS}$ - $I_{DS}$  ve  $V_{GS}$ - $I_{DS}$  grafiği

$$I_{DS} = \frac{W\mu C_G}{L} \left[ (V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad (5.1)$$

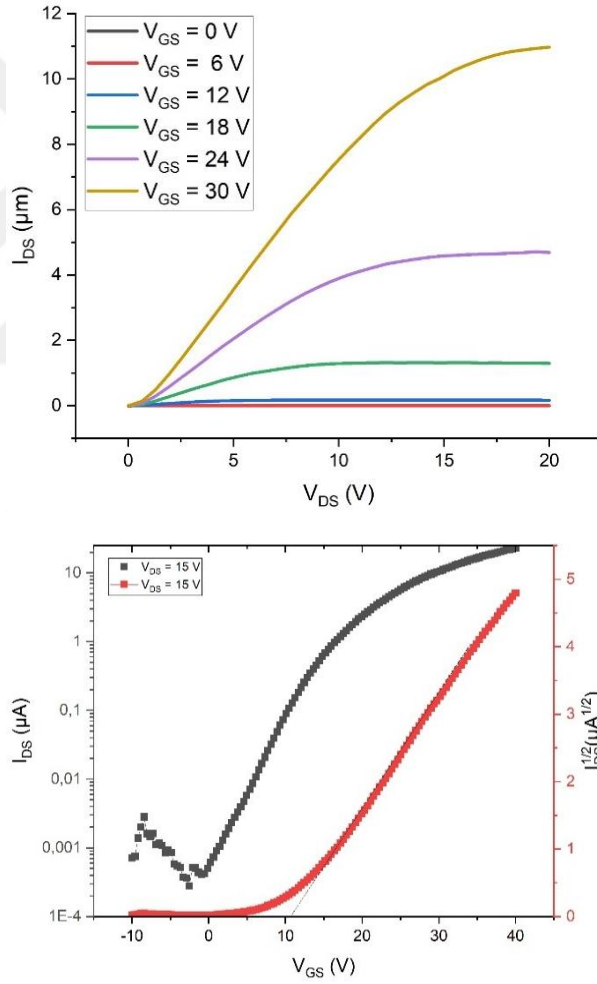
5.1 denkleminde  $V_T = 5.01$  V ,  $V_{DS} = 12$  V ,  $V_{GS} = 18$  V koyulduğunda,  $I_{DS}$  değeri 4,988μA çıkmaktadır. Buradan da  $\mu C_{ox} = 0,018 \cdot 10^{-6}$  cm<sup>2</sup> F/V.s sonucuna ulaşılmaktadır. Bu değer transistörün yapısal bir değeri olup, mobilite ile gate yalıtkanının kapasitans çarpımıdır. Aynı üretim parametresine sahip diğer transistörler de de  $\mu C_{ox} = 0,018 \cdot 10^{-6}$  cm<sup>2</sup> F/V.s değerinin elde edilmesi gerekmektedir.

$$g_m = \sqrt{2\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} I_D} \quad (5.2)$$

5.2 denklemde  $W = 10E-6$  m,  $L=3E-6$  m,  $I_{DS} = 4,988\mu A$  ve  $\mu C_{ox}=0,018 \cdot 10^{-6}$  olarak değerler yerleştirildiğinde,  $g_m = 0,77 \mu S$  çıkmaktadır.

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{GS}-V_T} \quad (5.3)$$

5.3 denklemde  $I_{DS} = 4,988\mu A$ ,  $V_T = 5.01$  V ,  $V_{DS} = 12$  V ve  $V_{GS} = 18$  V olarak yerine konulduğunda  $g_m = 0,77 \mu S$  çıkmaktadır. Bu da  $\mu C_{ox}=0,018 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2$  F/V.s değerinin farklı bir doğrulamasıdır.



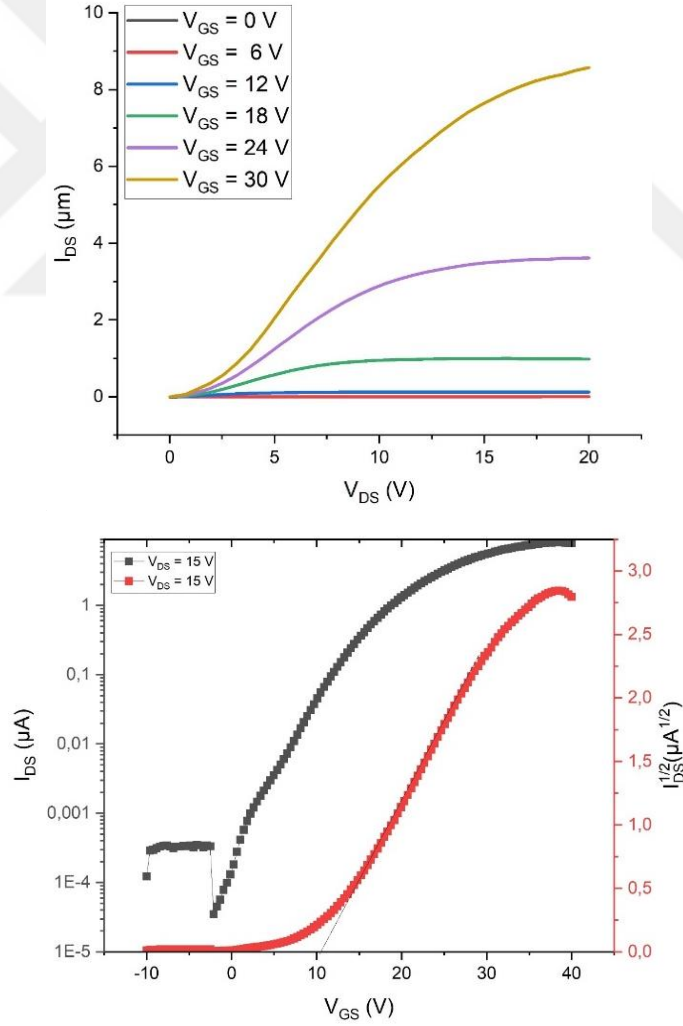
şekil 5.64 W/L oranı 10/4 olan TFT'nin  $V_{DS}$ - $I_{DS}$  ve  $V_{GS}$ - $I_{DS}$  grafiği

5.1 denklemde  $V_T = 10$  V ,  $V_{DS} = 15$  V ,  $V_{GS} = 24$  V koyulduğunda,  $I_{DS}$  değeri  $4,502 \mu A$  çıkmaktadır. Buradan da yine  $\mu C_{ox}=0,018 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2$  F/V.s sonucuna

ulaşmaktadır. Bu TFT'ye özgü yapısal değer olduğu için aynı parametrelerde üretilen tüm TFT'lerde aynı değer elde edilmektedir..

5.2 denkleminde  $W = 10E-6$  m,  $L=4E-6$  m,  $I_{DS} = 4,502 \mu A$  ve  $\mu C_{ox}=0,018 \cdot 10^{-6}$  olarak değerler yerleştirildiğinde,  $g_m = 0,64 \mu S$  çıkmaktadır.

5.3 denkleminde  $I_{DS} = 4,502 \mu A$ ,  $V_T = 10$  V ,  $V_{DS} = 15$  V ,  $V_{GS} = 24$  V olarak yerine konulduğunda yine  $g_m = 0,64 \mu S$  değeri elde edilmektedir. Bu da daha önce elde edilen  $\mu C_{ox}=0,018 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ F/V.s}$  değerinin farklı bir doğrulamasıdır.



Şekil 5.65 W/L oranı 10/5 olan TFT'nin  $V_{DS}$ - $I_{DS}$  ve  $V_{GS}$ - $I_{DS}$  grafiği

5.1 denkleminde  $V_T = 10 \text{ V}$  ,  $V_{DS} = 15 \text{ V}$  ,  $V_{GS} = 24 \text{ V}$  koyulduğunda,  $I_{DS}$  değeri  $3.531 \mu\text{A}$  çıkmaktadır. Buradan da yine  $\mu C_{ox}=0,018 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ F/V.s}$  sonucuna ulaşılmaktadır. Bu TFT'ye özgü yapısal değer olduğu için aynı parametrelerde üretilen tüm TFT'lerde aynı değer elde edilmektedir..

5.2 denkleminde  $W = 10\text{E-}6 \text{ m}$  ,  $L=5\text{E-}6 \text{ m}$  ,  $I_{DS} = 3.531 \mu\text{A}$  ve  $\mu C_{ox}=0,018 \cdot 10^{-6}$  olarak değerler yerleştirildiğinde,  $g_m = 0,50 \mu\text{S}$  çıkmaktadır.

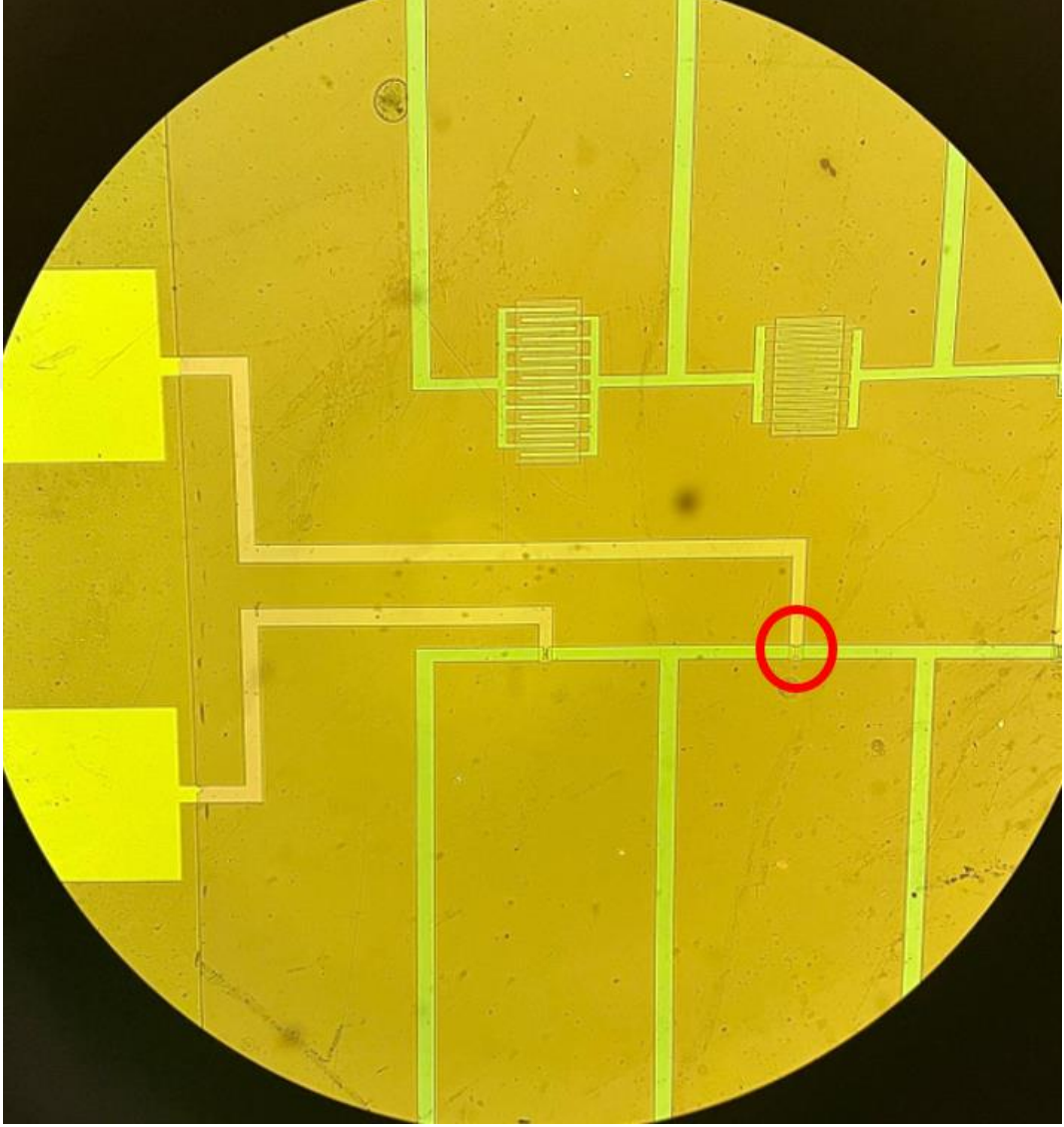
5.3 denkleminde  $I_{DS} = 3.531 \mu\text{A}$  ,  $V_T = 10 \text{ V}$  ,  $V_{DS} = 15 \text{ V}$  ,  $V_{GS} = 24 \text{ V}$  olarak yerine konulduğunda yine  $g_m = 0,50 \mu\text{S}$  değeri elde edilmektedir. Bu da daha önce elde edilen  $\mu C_{ox}=0,018 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ F/V.s}$  değerinin farklı bir doğrulamasıdır.

Şekil 5.66'da verilen transistörde altta ve üstte görünen morumsu yapılar gate elektrodunun kontak noktalarıdır. Sağda ve solda görünen sarımsı yapılar ise drain-source elektrotlarının kontak noktalarıdır. Bu tez çalışmasında standart mikroskop lamı kullanılmıştır. Tüm tez süresince 10'dan fazla markaya ait lamlar kullanılmış olup, lamaların yüzey yapısı, optik geçirgenliği ve kalınlığı tüm üretim sürecini etkilemiştir. Bu resimdeki lamın optik geçirgenliği %94-98 aralığında (400-700 nm) değişmektedir. Yapının tüm katmanlarının toplam transparanlığı %84-87 aralığında üretim parametresine bağlı olarak değişmektedir. Kontak noktalarının ve yollarının daha belirgin görünebilmesi için HDR ile fotoğraf çekilmiş ve kontrast artırılmıştır.



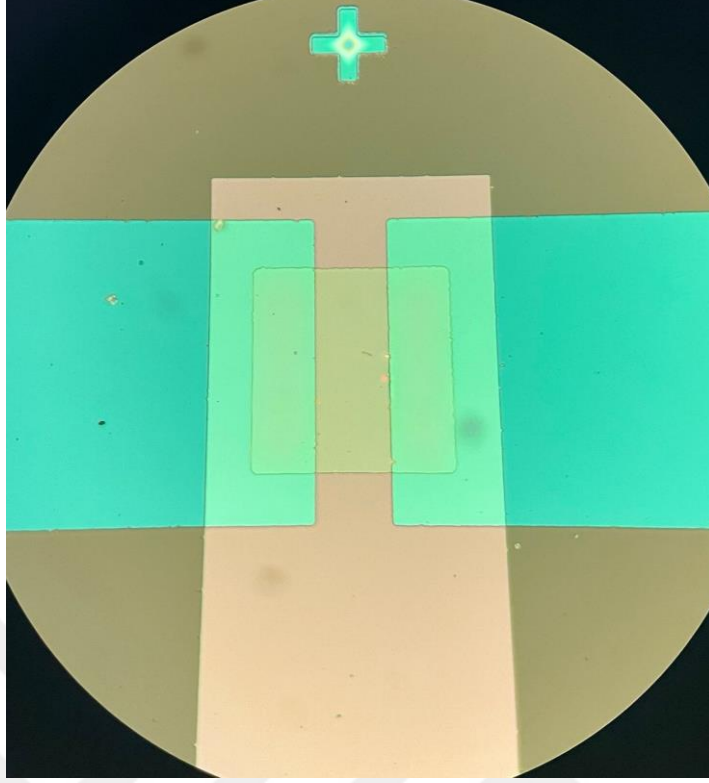
Şekil 5.66 Tüm aşamaları tamamlanmış ve üzerine 5. katman olarak IGZO yarıiletkeni korumak için  $\text{SiO}_x$  kaplaması yapılmış tamamen transparan ince film transistör

Şekil 5.67’de verilen resim tüm yapının mikroskop büyütmesi ile görüntülenmesidir. Üst taraftaki “interdigit” yapılar sensör uygulamaları için kullanılacaktır. TFT üretiminde diğer katmanlarla birlikte üretilmektedir. Bu tez çalışmasının konusu olmadığı için o yapılara değinilmemiştir.



Şekil 5.67 Şekil 5.66’te resmi verilen transistör dizisinin mikroskop altında büyütülmüş hali

Şekil 5.68’de verilen resim ise 5.67’de kırmızı halka ile işaretlenmiş TFT yapısının mikroskop altında büyütülmüş halidir (ölçeklendirilebilmesi için; Drain-Source elektrotları 100 um genişliğindedir).



Şekil 5.68 IGZO tabanlı TFT'nin tamamlanmış hali. Şekil 5.67'de kırmızı halka ile çizilen kısmın büyütülmüş halidir

## 6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında yeni nesil amorf-oksit yarıiletken malzemelerden IGZO ince filmler ile ince film transistörler (TFT) yapılmış ve test edilmiştir. IGZO ince filmlerin elektriksel ve optik özellikleri RF magnetron püskürtme parametrelerine (RF güç, Ar basıncı) bağlı olarak incelenmiş ve bu parametrelerle filmlerin elektriksel özelliklerinin değiştiği gözlenmiştir. Bu amaçla belirli parametre değerleri ile film özellikleri arasında çeşitli korelasyonlara bakılmıştır. Bunu takiben üretim parametrelerine bağlı olarak yapılan ince filmlerin Hall mobilitesi, yük taşıyıcı konsantrasyonu ve öz direncinin TFT performansına olan etkisi incelenmiş ve üretime bağlı olarak değişimine bakılmıştır. Cam üzerine kaplanan bu filmlerin optik geçirgenlikleri de bu süreçte incelenmiş olup, tamamen şeffaf yapıda bir TFT aygıtı elde edilebilmesinin şartları incelenmiştir. Tez çalışmaları süresinde, ince filmlerin üretim parametreleri, çok katmanlı yapıya sahip TFT'lerin üretim süreçleri, test amaçlı transistörlerin tasarımı ve litografi işlemlerinin optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Sonuç olarak standart cam altlıklar üzerine tümüyle transparan yapıda, ITO/SiO<sub>x</sub>/ITO/IGZO ince film katmanlarından oluşan ve tümüyle oda sıcaklığında yapılan TFT'ler üretilmiş ve test edilmiştir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Algahtani, F., Thulasiram, K. B., Nasir, N. M., and Holland, A. S.**, 2013, Four point probe geometry modified correction factor for determining resistivity, *Proc. of SPIE*, 8923(DECEMBER 2013):89235D-1–6pp.
- Barquinha, P., Pereira, L., Gonçalves, G., Martins, R., and Fortunato, E.**, 2009, Toward High-Performance Amorphous GIZO TFTs, *Journal of The Electrochemical Society*, 156(3):H161pp.
- Colligon, J.**, 1984, *Vacuum technology, thin films and sputtering: An introduction*, Vol. 34.
- Fortunato, E., Barquinha, P., Pimentel, A., Gonçalves, A., Marques, A., Pereira, L., and Martins, R.**, 2005, Recent advances in ZnO transparent thin film transistors, *Thin Solid Films*, 487(1–2):205–11pp.
- Fortunato, E., Ginley, D., Hosono, H., and Paine, D. C.**, 2007, Transparent Conducting Oxides for Photovoltaics, *MRS Bulletin*, 32(March):242–7pp.
- Fortunato, E., Barquinha, P., and Martins, R.**, 2012, Oxide semiconductor thin-film transistors: A review of recent advances, *Advanced Materials*, 24(22):2945–86pp.
- Kagan, C. R., and Andry, P.**, 2003, *Thin-film transistors*, MARCEL DEKKER, INC., New York, Basel.
- Keysight, T.**, 2018, *The Parametric Measurement Handbook 4th Edition*.
- Krishna-Seshan**, 2012, *Handbook of Thin Film Deposition*, Elsevier B.V.
- Lee, M., Shih, C., Chen, J., Huang, W., Gan, F., Shih, Y., Qiu, C. X., and Shih, I.**, 2009, 15 . 4 : Excellent Performance of Indium-Oxide-based Thin-Film Transistors by DC Sputtering, *Sid*:191–3pp.
- Mattox, D. M.**, 2009, *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*.
- Microchemicals, P.**, 2022, Microchemicals Photoresist, URL: <https://www.microchemicals.com/products/photoresists>.
- Ni.com**, 2022, How to Choose the Right DAQ Hardware for Your Measurement System, URL: <https://www.ni.com/en-tr/shop/data-acquisition/how-to-choose-the-right-daq-hardware-for-your-measurement-system.html>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Nomura, K., Takagi, A., Kamiya, T., Ohta, H., Hirano, M., and Hosono, H.,** 2006, Amorphous oxide semiconductors for high-performance flexible thin-film transistors, *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers*, 45(5 B):4303–8pp.
- Ortiz-Conde, a., García Sánchez, F. J., Liou, J. J., Cerdeira, A., Estrada, M., and Yue, Y.,** 2002, A review of recent MOSFET threshold voltage extraction methods, *Microelectronics Reliability*, 42(4–5):583–96pp.
- Ortiz-Conde, A., García-Sánchez, F. J., Muci, J., Terán Barrios, A., Liou, J. J., and Ho, C. S.,** 2013, Revisiting MOSFET threshold voltage extraction methods, *Microelectronics Reliability*, 53(1):90–104pp.
- Park, J. S., Maeng, W.-J., Kim, H.-S., and Park, J.-S.,** 2012, Review of recent developments in amorphous oxide semiconductor thin-film transistor devices, *Thin Solid Films*, 520(6):1679–93pp.
- Perloff, D. S.,** 1977, Four-point sheet resistance correction factors for thin rectangular samples, *Solid-State Electronics*, 20(8):681–7pp.
- Sarkar, J.,** 2014, *Sputtering Materials for VLSI and Thin Film Devices*, Vol. 2.
- Schroder, D. K.,** 2006, *MATERIAL AND DEVICE SEMICONDUCTOR MATERIAL AND DEVICE Third Edition*, Vol. 44.
- Uzun, Y.,** 2015, ÇOK KATLI SÜPERİLETKEN YBCO İNCE FİMLERİN, SrTiO<sub>3</sub> ARAKATMANLAR KULLANILARAK ÜRETİLMESİ.
- Versnel, W.,** 1978, Analysis of symmetrical Van der Pauw structures with finite contacts, *Solid-State Electronics*, 21:1261–8pp.
- Webster, J. G.,** 2003, *Electrical Measurement, Signal Processing, and Displays*, CRC Press, New York.
- Wong, H., White, M. H., Krutsick, J., and Bocrr, R. v,** 1987, MODELING OF TRANSCONDUCTANCE DEGRADATION AND EXTRACTION OF THRESHOLD VOLTAGE IN THIN OXIDE MOSFET's, *Solid-State Electronics*.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)**

**Yabuta, H., Sano, M., Abe, K., Aiba, T., Den, T., Kumomi, H., Nomura, K., Kamiya, T., and Hosono, H.,** 2006, High-mobility thin-film transistor with amorphous InGaZnO<sub>4</sub> channel fabricated by room temperature rf-magnetron sputtering, *Applied Physics Letters*, 89(11):10–3pp.

**Yeon Kwon, J., and Kyeong Jeong, J.,** 2015, Recent progress in high performance and reliable n-type transition metal oxide-based thin film transistors, *Semiconductor Science and Technology*, Institute of Physics Publishing.

**Zhu, Y., He, Y., Jiang, S., Zhu, L., Chen, C., and Wan, Q.,** 2021, Indium-gallium-zinc-oxide thin-film transistors: Materials, devices, and applications, *Journal of Semiconductors*, IOP Publishing Ltd.

## TEŞEKKÜR

Tanıdığım 12 yıl boyunca hem bu doktora tezi çalışması için hem de bazı kişisel çalışmalarım için bazen benim kadar bazen ise benden daha çok efor sarf eden, vizyonu ile bana farklı bakış açıları katan, bazen filtre kahvenin kaç ölçek yapılması gerektiği gibi hayati konularda, bazen de 250 A, ~6000 W'lık ölümcül sisteme çalışır durumdayken müdahale etmek gibi önemsiz! konularda tartıştığım, çoğu zaman hoca-öğrenci ilişkisinden farklı olarak iki arkadaş gibi olduğum yalnızca tez danışmanım olmayan sevgili hocam İlbeyi AVCI'ya tüm içtenliğimle teşekkür ederim. Umuyorum ki sonraki süreçte de gerek makarnanın nasıl yapılacağı konularında gerekse de bir mikroişlemcinin katmanları arasındaki arayüzde çıkacak problemin aşılması için yapılacaklar konusunda danışmanlık almaya devam edeceğim.

Tüm doktora sürecimde yanımda olan ancak yurt dışına görevlendirilmesi dolayısıyla savunmamda bulunmayan, çok karmaşık konuları bile tüm yalınlığıyla en ince ayrıntısına kadar anlatan, hemen her zaman arkamda olduğunu bildiğim, tatlı yemeyi en az benim kadar seven, yüzüme karşı sürekli iltifatta bulunmasa da benim olmadığım ortamda beni öven, diğer danışmanım Prof. Dr. Mustafa TEPE'ye çok teşekkür ederim. Umuyorum ki, verdiği desteklerden dolayı pişman etmeyeceğim.

Birlikte birçok başarılı ve başarısız deneyler yapıp, bir şeyler öğrendiğim, yalnızca mesai saatleri içerisinde (*Haftaiçi her gün 8.00-17.00 saatleri arasında*) iletken olan ancak mesai saatleri dışında yalıtkan olan çok özel bir ince film geliştirdiğimiz (*yayınladığımızda Nobel almayacak olsak da bilim camiasının konuşacağı bir keşifti*), ancak doktoramda aynı laboratuvarla olamadığım fakat uzaktan da olsa kritik konularda fikirleriyle bana destek olan Yiğitcan UZUN'a teşekkür ederim. Doktoramın son yılında laboratuvara gelen ve yapması gereken her işi en iyi şekilde yapıp, bana destek olan, cam temizliğinden ince film üretimine, fotolitografiden mikrofabrikasyona her işi profesyonellikle yapan Dilara AYGÜN'e teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca desteğini hiç esirgemeyen, Denizli'ye her gittiğimde yaptıkları mükemmel yemekleriyle kilo almama sebep olan, *“Bence seni küçükken sanayiye verseydik daha iyi olurdu. Hiç sanayiden çıkmıyorsun, en azından meslek sahibi olurdun”* diyerek doktora yapmam konusunda cesaretlendirip, motive eden anneme çok teşekkür ederim. Ne zaman modum düşse *“Bence sen yaparsın, saçlarını boşuna dökmüş olma”* diye inanılmaz! motive eden, zor zamanlarımda Denizli'den kalıp İzmir'e günü birlik gelen, şirket ile ilgili işlerimin bir kısmı yaparak üzerimdeki yükü hafifleten, sevgisinden ve bana olan güveninden hiçbir zaman şüphe etmediğim kardeşime çok teşekkür ederim. Doktoraya başladığımda hayatta olmayan ancak bana dürüstlüğü, çalışkanlığı ve sevgisiyle bana örnek olan babama teşekkür ederim.

En mutlu ve en üzgün zamanlarımda yanımda olan hem şirket işleri hem de doktora çalışmalarım dolayısıyla iş yerinde sabahladığım zamanlarda *“bence biz evi teknoparka taşıyalım, böylece hem sürekli çalışırsın hem de seni daha çok görürüm!”* diyerek desteğini hiç esirgemeyen eşim İsmihan KURAN'a tüm kalbimle teşekkür ederim. Tezimi yazdığım şu sıralar bana verdiği haberle beni ayrıca mutlu ettiği için bir kere daha teşekkür ederim.

24 / 11 / 2022

Özkan KURAN

## ÖZGEÇMİŞ

2007 yılında Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü'ne girdi ve 2012 yılında lisans eğitimini tamamladı. Yüksek lisans eğitiminde “*Taramalı YBCO-Squid Mikroskobu Geliştirilmesi*” ve “*Si Yonga Üzerine Süperiletken  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  Josephson Eklemleri Ve Dc-Squid Üretim Teknolojisinin Geliştirilmesi*” projelerinde bursiyer olarak yer aldı. 2015 yılında Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı'nda “*ZnO Tabanlı Transparan İnce Film Transistör Tasarımı ve Üretimi*” başlıklı yüksek lisans tezini tamamladı. Ocak 2016'da aynı bölümde doktora eğitimine başlamış ve Aralık 2022'de tamamlamıştır.

2016 yılında TÜBİTAK desteği ile Mikrofab Ltd. şirketini kurdu ve Arge laboratuvarları için elektriksel, optik ve manyetik test sistemleri geliştirmeye başladı. 2016 – 2022 yıllarında Mikrofab Ltd. şirketinde test, analiz ve üretim sistemleri geliştirmek üzere 4 tane TÜBİTAK proje desteği aldı ve yürütücülüğünü yaptı. Tamamlanan bu projeler ile Arge laboratuvarlarında kullanılmak üzere 20'den fazla laboratuvar ekipmanı (*motorize ve manuel mikromanipülatör, monokromatör, PC kontrollü hızlı tavlama sistemi, elektriksel test karakterizasyon (mobilite, özdirenç ve yük taşıyıcı yoğunluğu), otomatik şırınga, spin coater vb.*) sistemi geliştirdi. Bu cihazlardan bazıları hali hazırda ülkemizdeki ve yurtdışındaki bazı üniversitelerin ve kurumların araştırma laboratuvarlarında kullanılmaktadır. *Maskesiz Litografi Sistemi, Optik Litografi İşlemleri için Maske Hizalayıcı, Sıvı Azot Kriyostati, Akış Reaktörü, Otomatik Pipetleme Sistemi ve Kriyojenik Prob İstasyonu* bu şirkette geliştirilen başlıca sistemlerdir.