



**FOTOSENSÖR UYGULAMALARI İÇİN
GÜNEŞ IŞIĞINA DUYARLI KALAY OKSİT
AKTİF TABAKALI FOTOTRANSİSTÖRLERİN
ÜRETİMİ VE ELEKTRONİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

SEDA AKTAŞ

Doktora Tezi

Eskişehir, 2023

**FOTOSENSÖR UYGULAMALARI İÇİN GÜNEŞ IŞIĞINA DUYARLI KALAY
OKSİT AKTİF TABAKALI FOTOTRANSİSTÖRLERİN ÜRETİMİ VE
ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Seda AKTAŞ

Doktora Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Katıhal Fiziği Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Müjdat ÇAĞLAR

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Aralık 2023

Bu tez çalışması BAP Komisyonu tarafından kabul edilen 20DRP065 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Seda AKTAŞ'ın FOTOSENSÖR UYGULAMALARI İÇİN GÜNEŞ IŞIĞINA DUYARLI KALAY OKSİT AKTİF TABAKALI FOTOTRANSİSTÖRLERİN ÜRETİMİ VE ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI başlıklı çalışması 22/12/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek “Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği”nin ilgili maddeleri uyarınca, Fizik Anabilim dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye	: Prof. Dr. Müjdat ÇAĞLAR	
Üye	: Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU	
Üye	: Prof. Dr. Yasemin ÇAĞLAR	
Üye	: Doç. Dr. Kamuran GÖRGÜN	
Üye	: Doç. Dr. Şerif RÜZGAR	

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Doktora ęrencisi Seda AKTAş, FOTOSENSÖR UYGULAMALARI İÇİN GüNEş IşIğINA DUYARLI KALAY OKSİT AKTİF TABAKALI FOTOTRANSİSTÖRLERİN ÜRETİMİ VE ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİNİN ARAşTIRILMASI başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Daniřmanı

Prof. Dr. Müjdat AęLAR

ÖZET

FOTOSENSÖR UYGULAMALARI İÇİN GÜNEŞ IŞIĞINA DUYARLI KALAY OKSİT AKTİF TABAKALI FOTOTRANSİSTÖRLERİN ÜRETİMİ VE ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Seda AKTAŞ

Fizik Anabilim Dalı

Katıhal Fiziği Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Aralık 2023

Danışman: Prof. Dr. Müjdat ÇAĞLAR

Bu tez çalışmasında, dielektrik tabaka kalınlığının kalay oksit (SnO_2) ince film transistörlerin (TFT) elektriksel performansları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Dielektrik tabaka olarak, farklı kalınlıklarda SiO_2 ve HfO_2 kullanılmıştır. Transistörlerin aktif tabakası olarak kullanılan SnO_2 sol-jel spin kaplama yöntemiyle büyütülmüştür. Tabakaların yüzey morfolojisini analiz etmek için atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Aktif tabakayı oluşturan kalay ve oksijen elementlerinin oksidasyon durumları, $\text{Sn}3d$ ve $\text{O}1s$ 'in bağlanma enerjileri için X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) ile belirlenmiştir. Fabrikasyonu yapılan TFT'lerin mobilite (μ), eşik voltajı (V_{Th}) ve açık kapalı akım oranı ($I_{on/off}$) gibi elektriksel performansını gösteren temel parametreleri karanlık ortamda gerçekleştirilen ölçümler sonucunda hesaplanmıştır. Kullanılan dielektrik tabakaların kalınlığı cihazların elektriksel performansında önemli rol oynamıştır. En yüksek elektriksel performans, SiO_2 dielektrik tabakalı TFT'ler içerisinde $7,10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ mobilite değeri ile 150 nm kalınlığa sahip SiO_2 dielektrik tabakalı TFT'de elde edilmiştir. HfO_2 dielektrik tabakalı TFT'lerde ise $26,71 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ mobilite değeri ile 29 nm kalınlığa sahip HfO_2 dielektrik tabakalı TFT en iyi elektriksel özelliği göstermiştir. Kalınlığa ek olarak dielektrik tabakanın yüzey özellikleri de mobilite değeri üzerinde etkin rol oynamıştır. TFT'lerin farklı aydınlatma şiddetlerinde fotoduyarlılık (P_{ps}), fototepki (R_{pr}) ve spesifik dedektivite (D^*) değerleri hesaplanmış ve tüm TFT'ler fototransistör davranışı sergilemiştir. Elde edilen sonuçlar, SnO_2 TFT'lerin fotosensör uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: Kalay oksit, TFT, Dielektrik malzemeler, Dedektivite, Fototransistör.

ABSTRACT

FABRICATION OF SUNLIGHT SENSITIVE TIN OXIDE ACTIVE LAYER PHOTOTRANSISTORS FOR PHOTSENSOR APPLICATIONS AND INVESTIGATION OF THEIR ELECTRONIC PROPERTIES

Seda AKTAŞ

Department of Physics

Programme in Solid State Physics

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, December 2023

Supervisor: Prof. Dr. Müjdat ÇAĞLAR

In this thesis the effect of dielectric layer thickness on the electrical performance of SnO₂ thin film transistors (TFTs) was investigated. Different thicknesses of SiO₂ and HfO₂ were used as dielectric layers. SnO₂ used as the active layer of the transistors was deposited using the sol-gel spin coating method. Atomic force microscopy and scanning electron microscopy were used to analyze the surface morphology of the layers. The oxidation states of tin and oxygen elements forming the active layer were determined by X-ray photoelectron spectroscopy for the binding energies of Sn3d and O1s. The basic parameters of the fabricated TFTs, such as mobility, threshold voltage, and on-off current ratio, were calculated as a result of measurements in a dark environment. The thickness of the dielectric layers used played an important role in the electrical performance of the devices. Among the TFTs with SiO₂ dielectric layers, the highest electrical performance was obtained in the TFT with a thickness of 150 nm with a mobility value of 7.10 cm²/Vs. In HfO₂ dielectric layer TFTs, HfO₂ dielectric layer TFT with 29 nm thickness showed the best electrical properties with a mobility value of 26.71 cm²/Vs. In addition to the thickness, the surface properties of the dielectric layer also played an effective role on the mobility value. The photosensitivity, photoresponse and specific detectivity values of the TFTs were calculated at different light intensities and all TFTs exhibited phototransistor behavior. The obtained results indicate that SnO₂ TFT can be effectively used in photosensor applications.

Keywords: Tin oxide, TFT, Dielectric material, Detectivity, Phototransistor.

TEŞEKKÜR

Doktora eğitim sürecim boyunca, tüm laboratuvar imkanlarını en etkin şekilde kullanmama olanak sağlayan, bilgi ve deneyimlerini paylaşarak birçok konuda yeterlilik kazanmama öncülük eden, akademik gelişimime önemli katkılarda bulunan, birlikte çalışmaktan gurur ve mutluluk duyduğum kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Müjdat ÇAĞLAR'a, sunduğu rehberlik, destek ve değerli katkıları için çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında bilgi ve deneyimleriyle beni yönlendiren, yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Yasemin ÇAĞLAR'a teşekkür ederim.

Tez izleme jürimde bulunan değerli hocam Doç. Dr. Kamuran GÖRGÜN'e katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olup bana inanan, sevgi, destek ve anlayışlarını hiçbir zaman eksik etmeyen anneme ve babama çok teşekkür ederim.

Sensör teknolojileri öncelikli alanında sağladığı YÖK 100/2000 doktora bursu için Yükseköğretim Kurulu'na teşekkür ederim.

Seda AKTAŞ

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Seda AKTAŞ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLolar DİZİNİ	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
GÖRSELLER DİZİNİ	XV
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XVI
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özeti.....	3
1.2. Tezin Amacı	6
2. TEORİK BİLGİ	7
2.1. Yarıiletkenler.....	7
2.2. Metal Oksitler	9
2.3. Dielektrikler.....	14
2.3.1. Silisyum (IV) oksit (SiO ₂).....	17
2.3.2. Hafniyum (IV) oksit (HfO ₂).....	17
2.4. Transistörler	18
2.4.1. TFT'lerin akım gerilim karakteristikleri.....	23
2.4.2. TFT'lerin çalışma bölgeleri	25
2.4.2.1. Lineer (ohmic) bölge.....	25
2.4.2.2. Kısırılma (pinch-off) bölgesi	26

2.4.2.3. Doyum (saturation) bölgesi	27
2.4.3. TFT performansını etkileyen temel parametreler	27
2.4.3.1. Mobilite	28
2.4.3.2. Eşik voltajı.....	29
2.4.3.3. Açık durum/kapalı durum akım oranı.....	30
2.4.3.4. Alt eşik salınım değeri	30
2.4.4. Fototransistörler	31
3. KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ	35
3.1. X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS)	35
3.2. X-Işını Kırınımı Spektroskopisi (XRD)	37
3.3. UV-Vis Absorpsiyon Spektroskopisi	39
3.4. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)	41
3.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	43
3.6. Elektriksel Karakterizasyon	46
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	49
4.1. Sol-Jel Spin Kaplama Yöntemi	49
4.2. SnO ₂ -TFT'lerin Fabrikasyonu.....	51
4.2.1. n-Si/SiO ₂ /SnO ₂ -TFT'lerin fabrikasyonu	51
4.2.2. p-Si/HfO ₂ /SnO ₂ -TFT'lerin fabrikasyonu	56
5. YAPISAL, OPTİK VE MORFOLOJİK KARAKTERİZASYONLAR.....	58
5.1. SnO ₂ İnce Filminin XPS Analizi	58
5.2. SnO ₂ ve HfO ₂ Tabakalarının XRD Analizi.....	59
5.3. SnO ₂ İnce Filminin Optik Özellikleri.....	60
5.4. SEM ve AFM Analizleri	61
5.4.1. SiO ₂ ve SiO ₂ /SnO ₂ yüzeylerinin AFM analizi	61
5.4.2. HfO ₂ ve HfO ₂ /SnO ₂ yüzeylerinin AFM analizi	65
5.4.3. SiO ₂ /SnO ₂ yarıiletken tabakalarının SEM analizi	67
5.4.4. HfO ₂ /SnO ₂ yarıiletken tabakalarının SEM analizi	68
5.4.5. HfO ₂ dielektrik tabakalarının kalınlıklarının belirlenmesi ve EDS analizi	69
6. ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONLAR.....	72

6.1. n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'lerin Elektriksel Karakterizasyonları	72
6.1.1. n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'lerin kapasitans-gerilim karakteristikleri.....	72
6.1.2. n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'lerin output ve transfer karakteristikleri.....	73
6.1.3. n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'lerin histerezis karakteristikleri.....	76
6.1.4. n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'lerin farklı aydınlatma şiddetlerinde output karakteristikleri	79
6.1.5. n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'lerin farklı aydınlatma şiddetlerinde fotoduyarlılık ve fototepki karakteristikleri.....	82
6.2. p-Si/HfO₂/SnO₂-TFT'lerin Elektriksel Karakterizasyonları	86
6.2.1. p-Si/HfO₂/SnO₂-TFT'lerin kapasitans-gerilim karakteristikleri.....	86
6.2.2. p-Si/HfO₂/SnO₂-TFT'lerin output ve transfer karakteristikleri.....	87
6.2.3. p-Si/HfO₂/SnO₂-TFT'lerin histerezis karakteristikleri	90
6.2.4. p-Si/HfO₂/SnO₂-TFT'lerin farklı aydınlatma şiddetlerinde output karakteristikleri	91
6.2.5. p-Si/HfO₂/SnO₂-TFT'lerin farklı aydınlatma şiddetlerinde fotoduyarlılık ve fototepki karakteristikleri.....	93
7. TARTIŞMA VE SONUÇ	97
KAYNAKÇA.....	101
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 5.1. SiO_2 ve $\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$ yüzeylerinin rms değerleri	62
Tablo 5.2. HfO_2 ve $\text{HfO}_2/\text{SnO}_2$ yüzeylerinin rms değerleri	65
Tablo 6.1. n-Si/ SiO_2 / SnO_2 -TFT'lerin temel transistör parametreleri	75
Tablo 6.2. p-Si/ HfO_2 / SnO_2 -TFT'lerin temel transistör parametreleri	89



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Metal, yarıiletken ve yalıtkanların bant yapısı.	7
Şekil 2.2. Has, n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesinin farklı konumlarının şematik gösterimi.....	9
Şekil 2.3. a) SnO ve b) SnO ₂ 'nin kristal yapısı	13
Şekil 2.4. a) SnO ₂ ve b) SnO'nun bant yapısı	14
Şekil 2.5. Transistörlerin sınıflandırma şeması	20
Şekil 2.6. n-kanallı JFET yapısı.....	21
Şekil 2.7. n-kanallı TFT yapısı	22
Şekil 2.8. Farklı konfigürasyonlarda tasarlanmış TFT'ler	23
Şekil 2.9. TFT'nin output karakteristiği	24
Şekil 2.10. TFT'nin transfer karakteristiği	24
Şekil 2.11. a) TFT'nin lineer bölgede çalışması ve b) lineer bölge akım-gerilim karakteristiği	26
Şekil 2.12. a) İletken kanalın kısırılma noktası oluşumu ve b) karşılık gelen akım-gerilim karakteristiği.....	26
Şekil 2.13. a) TFT'nin doyum bölgesinde çalışması ve b) doyum bölgesi akım-gerilim karakteristiği.....	27
Şekil 2.14. TFT'nin V _{Th} , I _{on/off} oranı ve SS değerinin grafik üzerinde gösterimi	29
Şekil 2.15. İnce film fototransistörün şematik yapısı	32
Şekil 2.16. Rekombinasyon durumları a) Bimoleküler rekombinasyon b) Monomoleküler rekombinasyon	33
Şekil 3.1. XPS cihazının çalışma prensibi	35
Şekil 3.2. Bir kristalde X-Işını kırınımı	38
Şekil 3.3. Yarıiletkenlerde a) direkt ve b) indirekt bant geçişleri.....	40
Şekil 3.4. AFM' de görüntü oluşumunun şematik gösterimi	42
Şekil 3.5. SEM'de görüntü oluşumunun şematik gösterimi	44
Şekil 4.1. Sol-jel spin kaplama yöntemi	49
Şekil 4.2. n-Si/SiO ₂ /SnO ₂ -TFT'lerin üretim süreci	55
Şekil 4.3. p-Si/HfO ₂ /SnO ₂ -TFT'lerin üretim süreci	57
Şekil 5.1. SnO ₂ ince film yüzeyindeki a) Sn3d _{5/2} ve b) O1s için XPS spektrumları.....	58
Şekil 5.2. a) SnO ₂ , b) HfO ₂ filmlerinin XRD spektrumları	59

Şekil 5.3. SnO ₂ filminin absorpsiyon ve %T spektrumları.....	60
Şekil 5.4. SnO ₂ filminin $h\nu-(\alpha h\nu)^2$ grafiği.....	60
Şekil 5.5. Farklı kalınlıklardaki SiO ₂ dielektrik tabakalarının AFM görüntüleri a) 100 nm, b) 150 nm, c) 200 nm, d) 250 nm, e) 300 nm (Sol taraf 2D, sağ taraf 3D)	63
Şekil 5.6. Farklı kalınlıklardaki a) 100 nm, b) 150 nm, c) 200 nm, d) 250 nm, e) 300 nm SiO ₂ üzerine kaplanmış SnO ₂ yarıiletken tabakalarının AFM görüntüleri (Sol taraf 2D, sağ taraf 3D)	64
Şekil 5.7. Farklı kalınlıklardaki a) 1 kat, b) 2 kat, c) 5 kat HfO ₂ dielektrik tabakalarının AFM görüntüleri (Sol taraf 2D, sağ taraf 3D).....	66
Şekil 5.8. Farklı kalınlıklardaki a) 1 kat, b) 2 kat, c) 5 kat HfO ₂ üzerine kaplanmış SnO ₂ yarıiletken tabakalarının AFM görüntüleri (Sol taraf 2D, sağ taraf 3D).....	67
Şekil 5.9. a) 100 nm, b) 150 nm, c) 200 nm, d) 250 nm, e) 300 nm SiO ₂ dielektrik tabakalarının üzerine kaplanmış SnO ₂ yarıiletken tabakalarının SEM görüntüleri	68
Şekil 5.10. a) 1 kat, b) 2 kat, c) 5 kat HfO ₂ dielektrik tabakalarının üzerine kaplanmış SnO ₂ yarıiletken tabakalarının SEM görüntüleri.....	69
Şekil 5.11. a) 1 kat, b) 2 kat, c) 5 kat HfO ₂ dielektrik tabakalarının EDS analizi	70
Şekil 5.12. a) 1 kat, b) 2 kat, c) 5 kat HfO ₂ dielektrik tabakalarının SEM görüntüleri.....	71
Şekil 6.1. Farklı kalınlıklardaki SiO ₂ dielektrik tabakalarının C-V karakteristikleri	72
Şekil 6.2. n-Si/SiO ₂ /SnO ₂ -TFT'lerin output karakteristikleri	74
Şekil 6.3. n-Si/SiO ₂ /SnO ₂ -TFT'lerin transfer karakteristikleri	75
Şekil 6.4. n-Si/SiO ₂ /SnO ₂ TFT'lerin histerezis karakteristikleri	78
Şekil 6.5. n-Si/SiO ₂ /SnO ₂ -TFT'lerin on durumunda farklı aydınlatma şiddetleri altında output karakteristikleri	80
Şekil 6.6. n-Si/SiO ₂ /SnO ₂ -TFT'lerin off durumunda farklı aydınlatma şiddetleri altında output karakteristikleri	81
Şekil 6.7. n-Si/SiO ₂ /SnO ₂ -TFT'lerin on durumunda aydınlatma şiddetlerine bağlı olarak fotoduyarlılık ve fototepki değerlerinin değişimi.....	83
Şekil 6.8. n-Si/SiO ₂ /SnO ₂ -TFT'lerin off durumunda aydınlatma şiddetlerine bağlı olarak fotoduyarlılık ve fototepki değerlerinin değişimi.....	84

Şekil 6.9. n-Si/SiO ₂ /SnO ₂ -TFT'lerin a) on b) off durumunda aydınlatma şiddetlerine bağlı olarak dedektivite değerlerinin değişimi	85
Şekil 6.10. n-Si/SiO ₂ /SnO ₂ -TFT'lerin a) on durumu b) off durumu LogI _{ph} -LogP grafikleri.....	85
Şekil 6.11. Farklı kalınlıklardaki HfO ₂ gate dielektriklerinin C-V karakteristikleri.....	86
Şekil 6.12. p-Si/HfO ₂ /SnO ₂ TFT'lerin output karakteristikleri.....	88
Şekil 6.13. p-Si/HfO ₂ /SnO ₂ -TFT'lerin transfer karakteristikleri.....	89
Şekil 6.14. p-Si/HfO ₂ /SnO ₂ -TFT'lerin histerezis karakteristikleri.....	91
Şekil 6.15. p-Si/HfO ₂ /SnO ₂ -TFT'lerin on durumunda farklı aydınlatma şiddetleri altında output karakteristikleri	92
Şekil 6.16. p-Si/HfO ₂ /SnO ₂ -TFT'lerin off durumunda farklı aydınlatma şiddetleri altında output karakteristikleri	93
Şekil 6.17. p-Si/HfO ₂ /SnO ₂ -TFT'lerin on durumunda aydınlatma şiddetlerine bağlı olarak fotoduyarlılık ve fototepki değerlerinin değişimi	94
Şekil 6.18. p-Si/HfO ₂ /SnO ₂ -TFT'lerin off durumunda aydınlatma şiddetlerine bağlı olarak fotoduyarlılık ve fototepki değerlerinin değişimi	95
Şekil 6.19. p-Si/HfO ₂ /SnO ₂ -TFT'lerin a) on b) off durumunda aydınlatma şiddetlerine bağlı olarak dedektivite değerlerinin değişimi	95
Şekil 6.20. p-Si/HfO ₂ /SnO ₂ -TFT'lerin a) on durumu, b) off durumu LogI _{ph} -LogP grafikleri.....	96

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 2.1. Üretilen ilk nokta temaslı transistörünün orijinal malzemeler kullanılarak ölçeklendirilmiş replikası.....	18
Görsel 3.1. SPECS marka XPS cihazı	36
Görsel 3.2. BRUKER D2 Phaser XRD cihazı	39
Görsel 3.3. Shimadzu UV-Visible Spektrofotometre	41
Görsel 3.4. NT-MDT NANOEDUCATOR II model AFM cihazı	43
Görsel 3.5. Zeiss Ultraplus marka FESEM cihazı	45
Görsel 3.6. KEITHLEY 4200SCS yarıiletken karakterizasyon sistemi	47
Görsel 3.7. SIGNATONE marka mikrokonumlandırma ünitesi ve ASAI SPECTRA marka HAL-320 model solar simülatör.....	48
Görsel 4.1. Laurell marka spin kaplama cihazı.....	52
Görsel 4.2. Protherm marka PTF 12/38/450 model tüp fırın	52
Görsel 4.3. TFT’lerin üst kontakları için kullanılan shadow maskeler.....	53
Görsel 4.4. a) VAKSIS PVD Handy-MT/101T marka metal buharlaştırma sistemi b) metal buharlaştırma kaynağı ve kalınlık okuyucu c) numune tutucu	54

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Alan
BJT	: Bipolar eklem transistör
C	: Kapasitans
C_i	: Birim alan başına düşen kapasitans
d	: Kalınlık
D	: Ortalama kristal boyutu
D^*	: Dedektivite
ϵ_0	: Vakumun dielektrik sabiti
ϵ_r	: Dielektrik sabiti
E_F	: Fermi enerjisi
E_g	: Optik bant aralığı
FET	: Alan etkili transistör
g_m	: Geçiş iletkenliği
I_{DS}	: Drain source akımı
$I_{on/off}$	: Açık durum/kapalı durum akım oranı
I_{ph}	: Fotoakım
JFET	: Eklem alan etkili transistör
k	: Boltzman sabiti
L	: Kanal uzunluğu
MOSFET	: Metal oksit yarıiletken alan etkili transistör
μ	: Taşıyıcı mobilitesi
N_{SS}^{max}	: Arayüzey tuzak durum yoğunluğu
P	: Aydınlatma şiddeti
P_{ps}	: Fotoduyarlılık
R_{pr}	: Fototepki
SS	: Alt eşik salınım değeri
T	: Kelvin ölçeğinde sıcaklık
TFT	: İnce film transistör
$\%T$	: % Geçirgenlik
V_{DS}	: Drain source gerilimi

V_{GS}	:	Gate source gerilimi
V_{Th}	:	Eşik voltajı
q	:	Elektron yükü
W	:	Kanal genişliği
λ	:	Dalga boyu



1. GİRİŞ

Elektronik cihazlar, birçok alanda etkin olarak kullanıldığı için hayatımızda vazgeçilmez bir yere sahiptir. Elektrik akımını kontrol etme, anahtarlama, sinyal yükseltme ve değiştirme özelliklerinden dolayı transistörler, tüm elektronik cihazlarda kullanılan en temel aygıtlardan biridir. Nanoteknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte elektronik cihazlar gelişmeye ve boyut olarak küçülmeye başlamıştır. Elektronik cihazların küçülmesiyle de daha küçük alanda daha yüksek performans gösterebilecek transistörlere ihtiyaç artmaktadır. Bu nedenle transistörlerin daha yüksek verimle çalışmasını sağlayacak alternatifler üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Özel bir alan etkili transistör türü olan ince film transistörler (TFT) bu alanda kritik rol oynamakta ve elektronik cihazların daha hızlı, daha verimli ve daha küçük boyutlarda üretilebilmesine olanak sağlamaktadır. Yarıiletken ince film aktif tabakasına sahip alan etkili TFT'lerin üretiminde kullanılan yöntem ve malzemeler konusundaki çalışmalar, yenilikçi teknolojilere yol açmak amacıyla geliştirilmeye devam etmektedir.

Bir TFT'nin temel bileşenleri; gate elektrotu, dielektrik tabaka, yarıiletken aktif tabaka ve drain source elektrotlarıdır. TFT'ler üç farklı yarıiletken malzeme grubu kullanılarak üretilirler. Bunlar silisyum (Si) türleri, metal oksitler ve organik yarıiletkenlerdir. Her malzeme grubunun avantajları ve dezavantajları, kullanıldıkları uygulamalara ve üretim süreçlerine göre değişiklik gösterir. Yüksek performans, düşük maliyet ve esneklik gibi özellikler hangi malzemenin seçileceğini belirler. Bu malzemeler arasında metal oksitler (Kalay (IV) oksit (SnO_2), Çinko oksit (ZnO), Nikel (II) Oksit (NiO), İndiyum (III) oksit (In_2O_3), Bakır (II) oksit (CuO)...), yüksek kararlılık, farklı kristal yapıları, fiziksel, optik, elektriksel ve kimyasal özellikleri ile yüksek dayanıklılık gibi çeşitli özelliklere sahiptirler. Bu özellikleri sayesinde metal oksitler, enerji depolama cihazları, katalizörler, elektronik bileşenler, dönüştürücüler, optoelektronik cihazlar, membran reaktörleri ve biyolojik uygulamalarda tercih edilmektedirler [1]. Metal oksitler gerek optik özellikleri gerekse elektriksel özelliklerinden dolayı sensör uygulamaları için de oldukça uygunlardır ve son yıllarda sıklıkla kullanılmaktadırlar. Görünür bölgedeki optik geçirgenlikleri, geniş bant aralıkları, yüksek mobiliteleri, yüksek kristallenme oranları gibi üstün fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı metal oksitler, diyotlar [2] alan etkili transistörler [3], gaz sensörleri [4], fotovoltaiik aygıtlar [5] ve biyosensörler [6] gibi pek çok uygulama alanında kullanıma elverişli önemli bir malzeme sınıfıdır. Metal oksitler, farklı kristal

yapılarına sahip olup çeşitli optik ve elektronik özellikler sergilemesi, nanotozlarda ve ince filmlerde elektriksel iletkenliğin ayarlanması açısından büyük önem taşımakta ve optoelektronik uygulamalarda çok yönlü kullanım fırsatları sunmaktadır.

Metal oksitler arasında bulunan SnO_2 , geniş bant aralığına, yüksek iletkenliğe, yüksek kimyasal stabiliteye ve yüksek mobiliteye sahiptir. Bu özellikleri sayesinde SnO_2 , gaz sensörleri [7], güneş pilleri [8], ışık yayıcı diyotlar [9] ve ince film transistörler [10] gibi optoelektronik cihazlarda tercih edilmektedir. Tüm bu özelliklerin yanı sıra ışığa karşı geçirgen olması da SnO_2 'nin özellikle TFT'lerde cazip bir aktif tabaka olarak kullanılmasına olanak sağlar. TFT'lerde yaygın olarak kullanılan a-Si ve poli-Si'ler bu gereksinimi karşılayamadığı için oksit yarıiletkenlere ilgi artmıştır [11].

Metal oksit tabanlı elektronik cihazlar üretmek için birçok fabrikasyon yöntemi kullanılır. Bununla birlikte, oksit malzemelerin yapısı ve morfolojisi yöntemin türüne karar vermede önemli rol oynamaktadır. SnO_2 filmleri sprey piroliz [12], radyo frekansı (RF) magnetron saçtırma [13], atomik katman biriktirme (ALD) [14] ve sol-jel döndürerek (spin) kaplama [15] gibi çeşitli yöntemler kullanılarak elde edilmektedir. Bu yöntemlerden sol-jel spin kaplama, basit olması, vakuma ihtiyaç duymaması, güvenlik ve birçok işlem değişkenine sahip olma gibi avantajları sayesinde oksit malzeme elde etmek için en yaygın kullanılan yöntemlerden biri haline gelmiştir.

TFT'lerin üretiminde yarıiletken aktif malzeme seçiminin yanı sıra, önemli bir diğer kriter de uygun dielektrik malzeme seçimidir. Dielektrik malzemeler, serbest elektronu olmayan yalıtkan malzemelerdir ve dışarıdan bir elektrik alan uygulandığında yüklerin kutuplanabilme özelliğinden dolayı yarıiletken kanal bölgesindeki taşıyıcıların hareketini etkilemektedir. Genellikle, TFT'lerde dielektrik malzeme olarak, Hafniyum (IV) Oksit (HfO_2), Silisyum (IV) Oksit (SiO_2) ve Titanyum (IV) oksit (TiO_2) gibi malzemeler kullanılmaktadır [16–18]. Bunların arasında en çok kullanılan dielektrik malzeme SiO_2 'dir. Bunun temel sebebi silisyumun, oksijenle temas ettiğinde kolayca oksitlenmesiyle SiO_2 tabakasının oluşmasıdır. Bu oksitlenme reaksiyonu, genellikle yüksek sıcaklıklarda daha hızlı gerçekleşmektedir. SiO_2 'nin dezavantajı ise düşük dielektrik sabitine (3,9) sahip olmasıdır [19]. Düşük dielektrik sabitli SiO_2 yalıtkanının kapasitansını arttırmak için kalınlığını azaltmak gerekmektedir. Bununla birlikte, kalınlıktaki azalma, doğrudan tünelleme etkisinden dolayı gate kaçak akımını etkilemektedir [20]. Bu nedenle, SiO_2 'in yerini alacak yüksek dielektrik sabitli alternatif dielektriklere ihtiyaç duyulmaktadır.

Yüksek dielektrik sabitli malzemeler, yüksek geçirgenlik, daha düşük doğrudan tünelleme etkisi, yüksek bariyer yüksekliği, film morfolojisinde düşük pürüzlülük, gate elektrotu ile uyumluluk, silisyum alttaşlar üzerinde kararlılık, düşük kaçak akımı, düşük güç tüketimi ve işlem süreci ile uyumluluk gibi özelliklere sahip olduklarından dolayı tercih edilmektedirler. Ancak, yüksek dielektrik sabitli malzemelerin kullanımı, mobilitede bozulma, tuzak durumları ve eşik voltajında kaymalar, sabit yükler, yüzey uyum sorunu ve üretim maliyeti gibi bazı zorlukları da beraberinde getirebilir [21]. Bu nedenle, SiO₂ hala yaygın olarak kullanılan bir dielektrik malzeme olmaya devam etmekte, özel uygulamalarda ise yüksek dielektrik sabitli malzemeler tercih edilmektedir.

1.1. Literatür Özeti

Mevcut erişilebilir literatürde, TFT'lerde kullanılan aktif tabakalardan biri olan SnO₂'nin üretiminde, sadece birkaç yöntem ön plana çıkmaktadır. Bu yöntemler kullanılarak yapılan çalışmalar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Presley ve arkadaşları [22], SnO₂ TFT'lerin fabrikasyonu için RF magnetron saçtırma yöntemi kullanmışlardır. Gate elektrotu olarak 200 nm kalınlığında indiyum kalay oksit (ITO), dielektrik olarak 220 nm kalınlığında alüminyum oksit (Al₂O₃) ve titanyum dioksitten (TiO₂) oluşan ATO kullanmışlardır. Elde edilen SnO₂ şeffaf TFT'lerde geliştirme (enhancement) ve tükenim (depletion) modlu cihazlar için mobiliteler (μ) değerlerini sırasıyla 0,8 cm²/Vs ve 2,0 cm²/Vs olarak rapor etmişlerdir. Enhancement modlu TFT'nin 10⁵ değerinde açık/kapalı akım oranı ($I_{on/off}$) ile gaz sensörü uygulamaları için yararlı olabileceğini belirtmişlerdir.

Zhai ve arkadaşları [23], SnO₂-TFT'lerin SnO₂ aktif tabakasını 350 °C sıcaklıkta spreyleme yöntemi ile elde etmişlerdir. Dielektrik tabaka olarak 300 nm SiO₂ kullanmışlardır. Üretilen SnO₂ TFT'de, μ değerini 0,37 cm²/Vs, $I_{on/off}$ oranını 10⁶, eşik voltajı (V_{Th}) değerini -2 V ve alt eşik salınım değerini (SS) 2 V/dec olarak rapor etmişlerdir.

Lee ve arkadaşları [24], iki farklı plazma reaktanı kullanılarak plazmayla geliştirilmiş atomik katman biriktirme (PEALD) yöntemi ile farklı sıcaklıklarda SnO₂ aktif tabakaları elde etmişlerdir. Dielektrik tabaka olarak 200 nm kalınlığında SiO₂ kullanmışlardır. TFT'lerin mobilitelerinin SnO₂ filmlerin biriktirme sıcaklığının artmasıyla 2,31 cm²/Vs, 'den 6,24 cm²/Vs'ye arttığını, $I_{on/off}$ oranının 10⁶ ve V_{Th} değerinin

7,465 ile 1,88 V arasında değiştiğini rapor etmişlerdir. Bununla birlikte, 130 °C'yi aşan sıcaklıklarda elde edilen SnO₂'nin taşıyıcı konsantrasyonunun, transistörün anahtarlama yapmasını engelleyecek kadar yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Mai ve arkadaşları [25], TFT'lerin SnO₂ aktif tabakalarını 60 °C'de PEALD yöntemiyle elde etmişlerdir. 4 ile 8 nm arasında değişen SnO₂ film kalınlığının elde edilen TFT'lerin elektriksel özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Dielektrik tabaka olarak 230 nm kalınlığında SiO₂ kullanmışlardır. En iyi elektriksel performans gösteren 6 nm kalınlığında SnO₂ aktif tabakalı TFT için, μ değerini $\sim 12 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, V_{th} değerini -45 V ve $I_{on/off}$ oranını 10^7 olarak rapor etmişlerdir. Bu tür düşük sıcaklıkların, SnO₂'nin esnek elektroniklerle ilgili polimer alt tabakalar üzerine biriktirilmesi için uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Son yıllarda ise sol-jel spin kaplama yöntemiyle üretilmiş ince film transistörler ön plana çıkmaktadır.

Lee ve arkadaşları [26], kurutma sıcaklığının SnO₂-TFT performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Dielektrik tabaka olarak 100 nm kalınlığında SiO₂ kullanmışlardır. 50 °C, 100 °C, 150 °C'de kurutulan SnO₂ filmleri içeren TFT'ler için elde edilen μ değerlerini sırasıyla 7,6 cm²/Vs, 7,3 cm²/Vs ve 7,1 cm²/Vs, SS değerlerini sırasıyla 1,25 V/dec, 1,25 V/dec ve 1,5 V/dec olarak rapor etmişlerdir. Hava ortamına 30 gün maruz kaldıktan sonra TFT'lerin μ değerlerinin 7,6 cm²/Vs'den 6,2 cm²/Vs'ye ve 7,3 cm²/Vs'den 6,2 cm²/Vs'ye azaldığını belirtmişlerdir.

Chang ve arkadaşları [27], yüksek performanslı n-kanallı SnO₂-TFT'ler üretmek amacıyla sodyum hidroksit (NaOH) daldırma aşaması uygulamışlardır. Dielektrik tabaka olarak 150 nm kalınlığında SiO₂ kullanmışlardır. NaOH aşaması uygulanmayan SnO_x-TFT'lerin alan etkili akım modülasyonu göstermediğini belirtmişlerdir. SnO₂-TFT'lerin eşik voltajının çözeltideki SnCl₂ konsantrasyonu ile kontrol edilebildiğini, enhancement ve depletion modlarında çalışabilen SnO₂-TFT'ler ürettiklerini belirtmişlerdir. NaOH uygulaması yapılan TFT'lerin depletion modunda SS ve μ değerlerini sırasıyla 2,31 V/dec ve $\sim 0,10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, enhancement modunda ise $\sim 0,21 \text{ V/dec}$ ve $\sim 6,69 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ olarak rapor etmişlerdir.

Lee ve arkadaşları [28], SnO₂ yarıiletkeni üzerindeki H₂O molekülün emilimini en aza indirmek ve fiziksel boşluklar oluşturarak serbest taşıyıcı tuzaklanmasını önlemek amacıyla Y₂O₃ pasivasyon katmanı kullanarak SnO₂-TFT'ler üretmişlerdir. Dielektrik tabaka olarak 100 nm kalınlığında SiO₂ kullanmışlardır. Y₂O₃ pasivasyon

tabakasız SnO₂ TFT'in μ değeri, SS değeri, V_{Th} değeri ve $I_{on/off}$ oranı sırasıyla $9,6 \pm 1,7$ cm²/Vs, $2,3 \pm 0,3$ V/dec, $-16,0 \pm 2,0$ V ve $1,5 \pm 0,5 \times 10^6$, Y₂O₃ pasivasyon tabakalı SnO₂-TFT'in μ değeri, SS değeri, V_{Th} değeri ve $I_{on/off}$ oranı sırasıyla $5,7 \pm 0,3$ cm²/Vs, $1,1 \pm 0,2$ V/dec, $6,8 \pm 0,4$ V ve $6,1 \pm 0,43 \times 10^7$ olarak rapor edilmiştir. Y₂O₃ pasivasyon tabakalı SnO₂-TFT'lerin, histerezis olmadan önemli ölçüde NBS (negative bias stress) ve PBS (positive bias stress) kararlılığı ve yüksek performans sergiledikleri belirtilmiştir.

Lee ve arkadaşları [29], Y₂O₃ pasivasyon katmanının tavlama süresinin, SnO₂-TFT'ler üzerindeki etkisi incelemiştir. Dielektrik tabaka olarak 100 nm kalınlığında SiO₂ kullanmışlardır. En iyi elektriksel performansın, $7,59$ cm²/Vs μ değeri, $9,16$ V V_{Th} değeri, $0,88$ V/dec SS değeri ve $\sim 10^8$ $I_{on/off}$ oranı ile 15 dakika tavlanan pasivasyon katmanlı SnO₂ TFT'ye ait olduğunu rapor etmişlerdir.

Pal ve arkadaşları [30], lityum katkılı alüminyum oksit (Li-Al₂O₃) dielektrik tabaka üzerine, yüzey modifikasyon katmanı olarak bir amorf karbon filmi uygulayarak SnO₂-TFT'lerin performansını iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Amorf karbon katmanı kullanılmayarak üretilen SnO₂-TFT için, μ değerini $3,2$ cm²/Vs, $I_{on/off}$ oranını $2,5 \times 10^4$ ve SS değerini 559 mV/dec, tuzak durum yoğunluğu (N_{SS}^{Max}) değerini 2×10^{13} , amorf karbon katmanı olan SnO₂-TFT için μ değerini $21,1$ cm²/Vs, $I_{on/off}$ oranını $7,0 \times 10^4$ ve SS değerini 147 mV/dec, N_{SS}^{Max} değerini 6×10^{11} olarak rapor etmişlerdir. SnO₂-TFT'lerin performansını arttırmak için bir amorf karbon gate arayüzü kullanmanın etkili bir yaklaşım olabileceğini belirtmişlerdir.

Acharya ve arkadaşları [31], hem iyi yalıtkan özelliklerine sahip hem de çok yüksek dielektrik sabitli bir perovskit oksit malzeme olan stronsiyum titanat (SrTiO₃) dielektrik tabakalı SnO₂-TFT üretmişlerdir. TFT'nin 2V ve daha yüksek bir voltaj aralığında çalışabilme kapasitesini test etmek amacıyla 7V olmak üzere iki ayrı çalışma voltajında elektriksel karakterizasyonlarını yapmışlardır. TFT'lerin 2V çalışma voltajında μ değerini $0,20$ cm²/Vs, V_{Th} değerini $0,43$ V, $I_{on/off}$ oranını $2,3 \times 10^4$ ve SS değerini $0,29$ V/dec, N_{SS}^{Max} değerini $1,7 \times 10^{13}$ ve 7V çalışma voltajında ise μ değerini $0,16$ cm²/Vs, V_{Th} değerini $0,45$ V, $I_{on/off}$ oranını $2,0 \times 10^2$ ve SS değerini $1,32$ V/dec, N_{SS}^{Max} değerini $9,7 \times 10^{13}$ olarak rapor etmişlerdir. Ayrıca TFT'nin 2V çalışma voltajı altında çok düşük histerezise sahip olduğunu belirtmişlerdir.

1.2. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, farklı dielektrik sabitlerine sahip SiO_2 ve HfO_2 dielektrik tabakalarını kullanarak üretilmiş olan SnO_2 aktif tabakalı alan etkili ince film transistörlerin elektriksel özelliklerini, dielektrik tabakanın kalınlığına bağlı olarak araştırmak ve en iyi elektriksel performans için optimum dielektrik tabaka kalınlığını belirlemektir.

Bu kapsamda ticari olarak satın alınmış farklı kalınlıklarda SiO_2 'ler ve sol-jel spin kaplama yöntemi ile oluşturulan farklı kalınlıklardaki HfO_2 'ler dielektrik tabaka olarak kullanılmıştır. Bu malzemelerin, sol-jel spin kaplama yöntemi kullanılarak, SnO_2 ince filmleri ile kaplanmasıyla TFT'lerin aktif tabakaları oluşturulmuştur.

Sol-jel spin kaplama yöntemiyle oluşturulan SnO_2 ve HfO_2 dielektrik tabakalarının yüzey morfolojisini analiz etmek için atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve yapısal analizini belirlemek için X-Işını Difraktometresi (XRD) kullanılmıştır.

SnO_2 yarıiletken aktif tabakalarının yüzey morfolojisini araştırmak için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmış, UV-VIS Spektrofotometre ile alınan absorpsiyon ve geçirgenlik ölçümleri ile optik özellikleri incelenmiştir. SnO_2 yapı içerisindeki $\text{Sn}3d$ ve $\text{O}1s$ bağlanma enerji durumlarını belirlemek için X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) kullanılmıştır.

HfO_2 dielektrik tabakalarının kalınlıkları SEM ile belirlenmiş ve filmlerde bulunması beklenen elementlerin varlığı, Enerji Dağılımı Spektrometresi (EDS) analizi ile doğrulanmıştır.

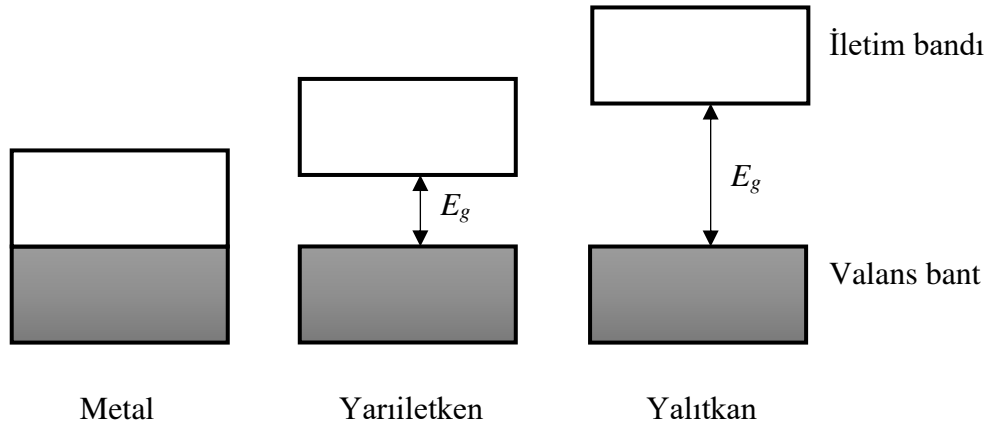
Fabrikasyonu yapılan tüm transistörlerin karanlık ortamda ve farklı aydınlatma şiddetlerinde elektriksel karakterizasyonları gerçekleştirilerek fototransistör özellikleri detaylı olarak araştırılmıştır.

2. TEORİK BİLGİ

2.1. Yarıiletkenler

Malzemeler, elektriksel iletkenlikleri bakımından metaller, yarıiletkenler ve yalıtkanlar olmak üzere 3'e ayrılırlar. Yarıiletkenler, iletkenlikleri metaller ve yalıtkanlar arasında yer alan geniş bir katılar sınıfıdır. Yarıiletkenleri metallerden ayıran en karakteristik özellik, sıcaklık artışı ile iletkenliğin artmasıdır. Bunun aksine, metallerin iletkenliği sıcaklık artışı ile azalır. Oda sıcaklığında metallerin özdirenci 10^{-6} Ωcm , yalıtkanların 10^{14} - 10^{22} Ωcm ve yarıiletkenlerin ise 10^{-3} - 10^9 Ωcm mertebesinde [32].

Atomların bir araya gelmesiyle katılarda enerji bantları oluşur. Elektron enerji durumları, izin verilen enerji bantlarını oluşturan birçok yakın enerji seviyesine ayrılır. Bu bantlar optik bant aralıkları ile ayrılır. Bant aralıklarının konumu katıların özelliklerini belirler. Elektronların bant geçişleri, Pauli dışarlama ilkesine göre belirlenir. Bu ilkeye göre, her bir enerji durumunu farklı spinlere sahip ikiden fazla elektron işgal edemez [33]. Elektronlar önce en düşük enerji seviyelerine yerleşir. Yarıiletkenlerde ve yalıtkanlarda (dielektrik), en düşük enerji seviyesinde yer alan bantlardaki hemen hemen tüm durumlar elektronlar tarafından doldurulurken, daha yüksek enerji seviyesindeki bantlardaki enerji durumları büyük ölçüde boştur. Dolu enerji durumlarına sahip alt enerji bantları valans bantları, boş enerji durumlarına sahip daha yüksek enerji bantları ise iletim bantları olarak adlandırılır. Valans bandı ile iletim bandı arasındaki farka optik bant aralığı (E_g) denir. Valans bandındaki bir elektronun valans bandından iletim bandına geçebilmesi için bant aralığına eşit ya da daha yüksek bir enerjiye ihtiyacı vardır [34].

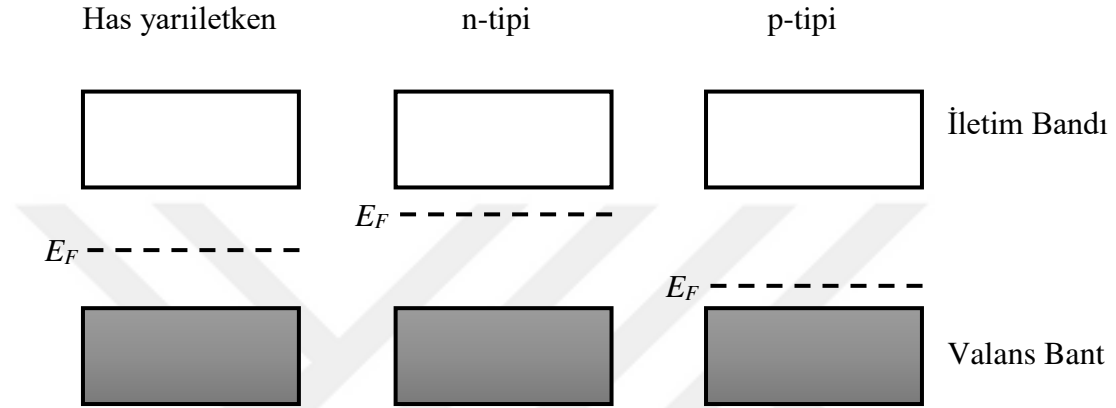


Şekil 2.1. Metal, yarıiletken ve yalıtkanların bant yapısı.

Şekil 2.1’de metal, yarıiletken ve yalıtkanların şematik olarak bant yapısı verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi metaller için herhangi bir bant aralığı mevcut değildir. Yarıiletkenlerde bu bant aralığı değeri yaklaşık 3,5 eV’a kadar değişirken, 3,5 eV’tan daha büyük bant aralığı değerleri yalıtkanlara karşılık gelmektedir. Mutlak sıcaklıkta ($T=0$ K) yarıiletkenler de yalıtkan gibi davranırlar ve elektriği iletmezler. Valans bantta bulunan elektronların iletim bandına geçebilmeleri için en az yasak enerji aralığı kadar bir enerjiye sahip olmaları gerekmektedir. Geçiş yapan elektronların valans bantta bıraktığı boşluklara “hol” adı verilir. Valans bandındaki boşlukların buradaki başka elektronlarla doldurulması ve bu yer değiştiren elektronların da yerlerinde yeni holler oluşturmasıyla valans bandındaki holler hareket etmiş olur. Bu durumun devam etmesiyle iletim bandındaki elektronlar ve valans bandındaki holler serbest taşıyıcı gibi hareket ederek elektriksel iletkenliğe katkıda bulunurlar [35]. Bir yarıiletkenin ısıtılmasıyla valans bandındaki bir elektronunun iletim bandına çıkması ve sonucunda valans bandında bir tane hol oluşması sonucu elektron hol yoğunluğu birbirine eşit olur. Bu yarıiletkenler has yarıiletken olarak adlandırılır.

Yarıiletkenlerin safsızlık atomları eklenerek katkılanması ile kristal yapısı, kristal boyutu, bant aralığı gibi fiziksel, elektriksel ve manyetik özellikleri değiştirilebilmektedir. Bir yarıiletkendeki elektron ve hol konsantrasyonu, yarıiletken örgü içerisine elektron verici (donör) atomların veya elektron alıcı (akseptör) atomların eklenmesi ile değiştirilebilir. Hem donörler hem de akseptörler katkı maddesi olarak adlandırılır. Bir donör atomu, komşu atomlarla bağ kurmak için yarıiletken örgü atomu için gerekenden daha fazla elektrona sahiptir. Bir akseptör atomu, ev sahibi yarıiletkenin komşu atomları ile kimyasal bağlar için gerekenden daha az elektrona sahiptir. Donörlerle katkılanmış bir yarıiletken n-tipi, akseptörlerle katkılanmış bir yarıiletken p-tipi olarak adlandırılır. Örnek olarak Silisyum ele alınırsa, saf Si’nin 4 değerlik elektronu vardır, yani tek bir Si atomunun kimyasal olarak kararlı olabilmesi için aynı anda dört komşusuna bağlanması gerekir. Saf Si, V. grup fosfor (P) atomları ile katkılanırsa, P atomlarındaki beş değerlik elektronundan dördü dört komşu Si atomuyla bağ oluştururken, beşinci değerlik elektronu bağ yapamadığı için boşta kalır. Bu elektron P atomuna zayıf bir şekilde bağlıdır ve az bir enerji ile iletim bandına kolayca geçebilir. Bir P atomu Si örgüsüne serbest bir elektron vererek elektron konsantrasyonunu artırır ve bu nedenle donör olarak adlandırılır. P ile katkılanmış Silisyumun elektron yoğunluğu fazla olduğu için n-tipi bir yarıiletkendir. Diğer taraftan Si, III. grup bor (B)

atomları ile katkılanırsa, dört komşu Si atomuna bağlanmak için yalnızca üç elektron kullanılabilir. B atomu böylece dördüncü bağı işgal edemeyecek ve Si'nin boşta kalan dördüncü bağı kolayca bir elektron kabul edebilecek duruma gelecek ve değerlik bandında hareketli bir hol oluşacaktır. Bu nedenle B, hol konsantrasyonunu artıran, alıcı yani akseptör olarak adlandırılır. B ile katkılanmış Si'nin hol yoğunluğu elektron yoğunluğundan fazla olduğu için yarıiletken p-tipi olarak adlandırılır.



Şekil 2.2. Has, n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesinin farklı konumlarının şematik gösterimi

$T=0\text{ K}$ 'de elektron bulunan enerji seviyelerinin en üst sınırı Fermi enerji seviyesi (E_F) ile ifade edilir. Şekil 2.2'de has, n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyelerinin şematik gösterimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi has yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi yasak enerji aralığının tam ortasında yer alır. n-tipi bir yarıiletkende Fermi seviyesi iletim bandının yakınında, p-tipi yarıiletkende ise valans bandına yakındır.

2.2. Metal Oksitler

Fizik, kimya ve malzeme biliminin farklı yönlerini kapsayan çeşitli özelliklere sahip bir bileşik sınıfı olan metal oksitler, bir metal elementinin oksijen ile kimyasal tepkimeye girmesi sonucu oluşur. Bu tepkime sonucunda, metal atomları ile oksijen arasındaki elektron transferleri nedeniyle metal atomları elektronlarını kaybederek pozitif yüklü iyonlara dönüşürken, oksijen atomları da elektron alarak negatif yüklü iyonlara dönüşürler. Metal atomlarının oksijen atomlarıyla bağ kurması, düzenli bir kristal yapının oluşmasını sağlamaktadır.

Metal oksit malzemelerin çoğu yarıiletken olarak kabul edilse de yapılarına ve bileşenlerine bağlı olarak çeşitli elektronik özellikler sergileyebilmektedirler. Bu özellikleri, çeşitli uygulamalarda kullanılmalarını ve ekonomik açıdan sürdürülebilir olmalarını sağlamaktadır. Yarıiletken metal oksitler, çoğunluk taşıyıcılarının, yani elektronların ve hollerin hareketine bağlı olarak n-tipi veya p-tipi olabilirler. Bu n-tipi ve p-tipi iletkenliğin temel sebepleri doğal donör ve akseptörlerdir. Ara yere sıkışmış metal atomları ve oksijen boşlukları doğal donörler olarak davranırken, ara yere sıkışmış oksijen atomları ve metal boşlukları doğal akseptör kaynağı davranışı sergilemektedir. n-tipi metal oksitler arasında SnO_2 , In_2O_3 , ZnO ve TiO_2 yer alırken, NiO ve CuO p-tipi iletkenliğe sahip metal oksitler arasındadır. Metal oksitlerin en önemli özelliği, elektriksel iletkenliklerinin sıcaklık, uygulanan gerilim veya katkı maddeleri gibi faktörlere bağlı olarak değiştirilebilmesidir. Bu özellikleri, elektronik cihazların tasarımı ve malzeme seçimi açısından oldukça önemlidir. Elektriksel iletkenliklerinin kontrol edilebilir olması, birçok uygulamada özellikle yarıiletken ve optoelektronik cihazların geliştirilmesinde büyük avantaj sağlamaktadır.

Metal oksit tabanlı elektronik cihazlar üretmek için birçok fabrikasyon yöntemi kullanılırken, oksit malzemelerin yapısı ve morfolojisi, yöntemin türüne karar vermede önemli rol oynamaktadır. Metal oksitlerin sentezi için kullanılan yöntemler, fiziksel ve kimyasal yöntemler olmak üzere iki ana kategori altında incelenmektedir. Püskürtme veya elektron ışını buharlaştırma gibi yöntemleri içeren fiziksel yöntemlerde, başlangıç malzemesi sistemli bir şekilde tüketilerek nano boyutlu malzeme oluşumu sağlanmaktadır. Fiziksel yöntemler, ince film oluşturma veya nanoyapıların üretimi gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Sol-jel yöntemi, hidrotermal yöntem, kimyasal buhar biriktirme gibi kimyasal yöntemler ise, kimyasal reaksiyonlar yoluyla yeni malzemelerin sentezini oluşturmak için kullanılmaktadır. Kimyasal yöntemler, metal oksitlerin özelliklerini ve bileşenlerini, özel uygulamalara göre ayarlamak için oldukça güçlü olmaları sebebiyle araştırmacılara ve endüstriyel uygulamalara, istenilen özelliklere sahip metal oksit malzemelerini üretme ve uygulama konusunda büyük esneklik sunmaktadır.

Metal oksitler amorf, polikristal ve tek kristal gibi farklı kristal yapılarda ve aynı zamanda nano boyutta tanecikler içeren ince film ve bulk formunda da kolaylıkla hazırlanabilmektedirler. Her form belirli uygulama gereksinimlerine ve performans beklentilerine göre tercih edilmektedir. Metal oksit filmler; gaz sensörleri, nem

sensörleri, optik sensörler, ısı sensörleri ve biyolojik sensörler gibi çeşitli algılama cihazlarının temel bileşenleri olarak kullanılmaktadır. Bunun için, elektro-fiziksel (bant aralığı, iletkenlik türü, oksijen difüzyonu), termodinamik yüzey özellikleri, elektronik özellikler, yapısal özellikler gibi metal oksitlerin çeşitli parametrelerinin analizi, etkili sensörün seçimi için önemlidir [36,37].

Fotodiyotlar, fototransistörler, lazer diyotlar ve optik fiberler gibi yarıiletken bileşenlerden oluşan optoelektronik aygıtlar, ışık ve elektriğin etkileşimiyle çalışarak veri iletimi, algılama, görüntüleme ve optik iletişim gibi işlevleri gerçekleştirir. Metal oksitlerin, farklı kristal geometrilerine sahip olup çeşitli optik ve elektronik özellikler sergilemeleri, nano yapılarda ve ince film metal oksitlerde elektrik iletkenliğinin ayarlanması açısından büyük önem taşır ve optoelektronik uygulamalarda çok yönlü kullanım fırsatları sunar [38]. Optoelektronik uygulamalarda esneklik, optik geçirgenlik, daha yüksek kararlılık ve maliyet etkinliği özelliklerine sahip uygun bir yarıiletken malzemenin kullanımı oldukça önemlidir. Metal oksitler, optoelektronik ve fotovoltaiik cihazların maliyetini, ağırlığını, hacmini ve mekanik özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle, ince film formundaki bir metal oksit yarıiletken bir alttaş üzerine spin-kaplama ve spreycaplama gibi basit ve ucuz çözelti bazlı teknikler uygulanarak kolaylıkla kaplanabilmektedir [39].

Metal oksitlerin optik özellikleri ve karakteristikleri, bu metal oksitlerin optoelektronik uygulamalara uygunluğunu belirlemek için gereklidir. Optik bant aralığı, bir malzemenin ışığı soğurma eşiği anlamına gelmektedir. Optoelektronik cihazlar, genellikle belirli dalga boylarındaki ışığı absorbe etme veya yansıtma yeteneğine dayalı olduğu için kullanılan metal oksitlerin bant aralığı, uygulamanın gerektirdiği dalga boylarına uygun olmalıdır. Metal oksitlerin, optoelektronik uygulamalarda etkin bir şekilde kullanılabilmek üzere şeffaf iletken oksit (TCO) kategorisine girebilmesi için %80'den fazla optik geçirgenliğe sahip olması gerekmektedir. Metal oksitlerin geniş yelpazesi, onları görünür bölgenin yanı sıra UV bölgesinde de şeffaf hale getirir. Bu nedenle optoelektronik uygulamalar için uygundur [40]. ZnO, indiyum katkılı kalay oksit (ITO) ve SnO₂ gibi metal oksitler TCO ailesine aittir. Bunlar 3,4 eV'tan daha geniş bir bant aralığına sahiptir ve dolayısıyla 350 nm ile yakın kızılötesi bölge arasında geçirgendirler [41]. Optoelektronik cihazlarda kullanılacak metal oksitler, geleneksel yarıiletkenlere kıyasla sıcaklık, voltaj ve radyasyona karşı daha dayanıklıdır. Bu da onları daha iyi performansa sahip gelecekteki cihazlar için ideal bir seçim haline

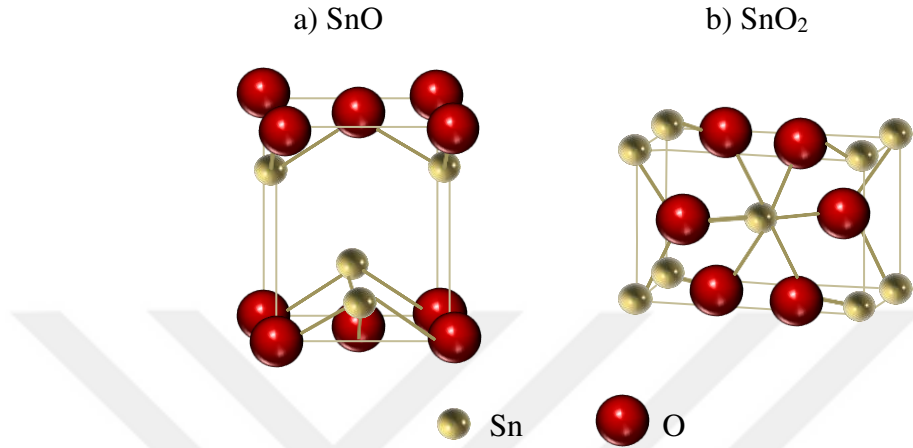
getirmektedir. Özellikle görüntüleme cihazları için, indiyum galyum çinko oksit (IGZO) yarıiletken tabanlı şeffaf ince film transistörlerin büyük başarısından bahsedilebilir [42].

Metal oksitlerin diğer avantajları arasında cihaz yapısının basitliği, pratik uygulamalarda sağlamlık ve çok çeşitli indirgeyici veya oksitleyici gazlara uyarlanabilirlik yer almaktadır. Bu nedenle metal oksitler gaz sensörlerinde en geniş uygulama alanı bulan malzeme sınıfını oluşturmaktadır. Bir gaz sensörü için uygun bir malzemenin seçimi, iyi sensör tepkisi, hava nemine karşı düşük hassasiyet, yüksek seçicilik, düşük histerezis, geniş bir çalışma sıcaklığı aralığı, iyi termal döngü ve ortamda bulunması muhtemel çeşitli kimyasallara maruz kalma karşısında dayanıklılığa dayanmaktadır [43]. Gaz sensörleri için çeşitli metal oksitler üzerinde çalışılmıştır. SnO_2 , In_2O_3 ve Tungsten (III) Trioksit (WO_3) bunların arasında kararlılık açısından avantajlara sahiptir. Bu nedenle bu malzemeler ticari sensör olarak kullanılmaktadır [4]. Metal oksitlerin, kimyasal sensörlerdeki rolleri sadece algılama malzemesi olarak kullanılmakla sınırlı değildir. Aynı zamanda alt tabaka, elektrot, destekleyici yapı, yapı değiştirici, membran ve fiber olarak da başarıyla kullanılmaktadırlar. Öte yandan, düşük seçicilik, metal oksitlere dayalı sensörlerin temel eksikliğidir. Metal oksit bazlı gaz sensörlerinin geniş bir indirgeyici gaz spektrumuna yanıt verdiği görülmekte, bu da sinyalin çeşitli indirgeyici gazların karışımında ilgilenilen belirli bir gaza atanmasını zorlaştırmaktadır [37]. Güçlü oksitleme gücü, iyi kimyasal inertlik, düşük maliyet, toksik olmayan, geniş yüzey alanı ve benzersiz optik özelliği ile nanoyapılı SnO_2 , gaz algılama dahil olmak üzere enerji ve çevre uygulamaları için büyük bir potansiyel sunmaktadır [36].

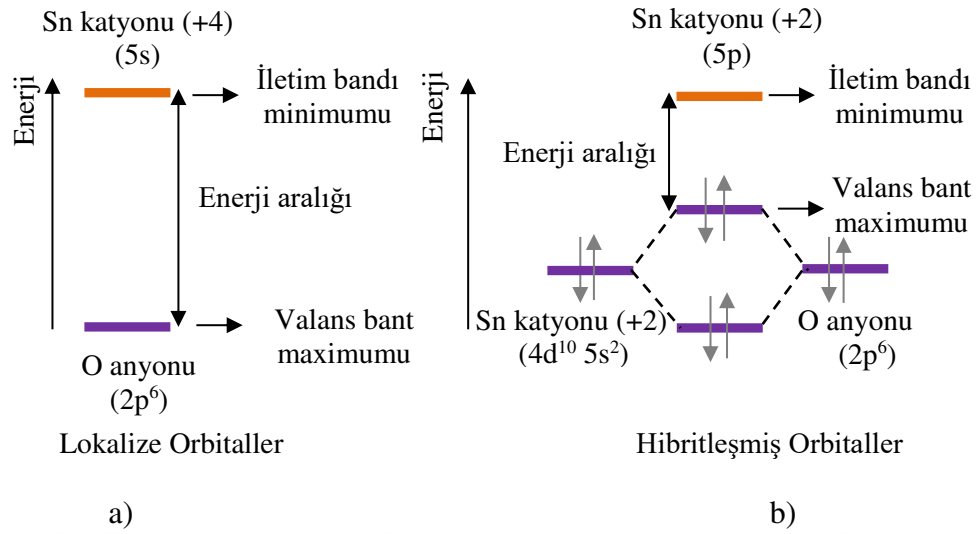
Metal oksitlerin çoğu, mineral kaynaklarının bolluğu nedeniyle çok pahalı değildir ve çeşitli toksik veya nadir bulunan malzemelere göre çevre dostu bir alternatif olabilmektedirler. Organik maddelere kıyasla daha güvenilirler ve nem veya sert iklim koşulları nedeniyle bozulmaya karşı daha dayanıklıdırlar. Tüm bu faydalar göz önünde bulundurulduğunda, metal oksitlerin halihazırda günlük hayatımızda önemli bir rol oynamasının yanı sıra birçok bilimsel çalışmanın ortak konusu olması şaşırtıcı değildir.

Kalay oksit, yaygın olarak kullanılan metal oksit malzemelerdendir. Kalay oksitin Kalay (IV) oksit (stannic oksit) (SnO_2) ve Kalay (II) oksit (stannous oksit) (SnO) olmak üzere iki ayrı bileşiği bulunmaktadır.

Şekil 2.3'te SnO ve SnO₂ nin kristal yapısı verilmiştir. İki değerlikli kalay atomuna sahip olan SnO, tetragonal birim hücreli, katmanlı özel bir kristal yapıya sahiptir. Şekil 2.3a'da görüldüğü gibi her bir Sn atomunun etrafında piramit yapısı oluşturan dört O atomu vardır [44].



SnO, 2,5–3,0 eV'luk direkt bant aralığına ve 0,7 eV'luk indirekt bant aralığına sahiptir [45]. SnO ve SnO₂'nin bant yapısı arasındaki karşılaştırma Şekil 2.4'te verilmiştir. Oksit yarıiletkenlerin, valans bandı maksimumları (VBM) temel olarak lokalize ve anizotropik O2p orbitallerinden oluşur. p-tipi metal oksitlerin çoğunda, (VBM) oluşumunda sadece oksijenin p-orbitalleri yer alır ve bu da taşıyıcı iletimini sınırlar [46]. Ancak, Şekil 2.4b'de görüldüğü gibi SnO'da VBM oluşumunda, Sn5s orbitalleri O 2p orbitallerine katkıda bulunur. Sn5s'in bu katkısı SnO'nun hol mobilitesini önemli ölçüde artırmaktadır [47,48]. Sn5s'in enerji seviyesi VBM yakınındaki O2p'ye daha yakındır ve Sn5p iletim bandı minimumuna (CBM) yakındır. Bu durum hol mobilitesinde artışa yol açarak malzeme yüksek proses sıcaklığı kullanmadan kayda değer hol mobilitesi sunabilir. Bu da SnO'nun p-tipi iletkenliğinin temel nedeni olan arayerde bulunan O atomlarının ve Sn boşluklarının oluşturduğu kusurlara ek olarak hollerin yoğunluğuna katkıda bulunmaktadır [49,50].



Şekil 2.4. a) SnO_2 ve b) SnO 'nun bant yapısı

Kalay oksitin en çok bulunan bileşiklerinden olan SnO_2 , Şekil 2.3b'de görülen birim hücrenin iki kalay ve dört oksijen atomu içerdiği tetragonal rutil yapıya sahiptir. Her bir kalay atomu, düzenli bir oktahedronun köşelerine yerleştirilmiş altı oksijen atomunun merkezinde yer alırken, her bir oksijen atomu bir eşkenar üçgenin köşelerinde üç kalay atomu ile çevrilidir [51]. Doğrudan optik bant geçişli bir bant aralığına sahip olan SnO_2 , ~3,6 eV'luk geniş bir bant aralığına sahiptir. SnO_2 , yapısında var olan ve donör gibi davranış sergileyen araya sıkışmış Sn atomları ve O boşluklarından dolayı n-tipi iletkenlik özelliği gösterir.

SnO_2 'nin SnO 'ya göre yükseltgenme eğilimi daha düşüktür ve kimyasal olarak daha kararlı yapıdadır. Bu nedenle, endüstriyel uygulamalarda kullanılmak için SnO_2 daha sık tercih edilir. SnO_2 , yüksek elektriksel iletkenlik ($10^3 \Omega\text{cm}$) [52] ve geniş bant aralığının yanı sıra görünür bölgede yüksek optik geçirgenliğe sahip bir malzemedir. Bu özellikler, ince film transistörler, güneş pilleri, foto diyotlar ve şeffaf bir yarıiletken veya elektrotun gerekli olduğu diğer aygıtlar için kritik faktörlerdir [53] ve SnO_2 'nin TFT'lerde tercih edilmesinin başlıca sebepleridir.

2.3. Dielektrikler

Yalıtkanlar olarak da bilinen dielektrikler, zayıf elektriksel iletkenliğe sahip olmalarına rağmen elektrik alan etkisini uzun süre koruyabilen ve elektrik yükünü depolayabilen malzemelerdir. Bu malzemeler elektromanyetik enerjinin yayılmasına,

yavaşlamasına, emilmesine, birikmesine ve dönüşümlere uğramasına izin verir. Dielektrikler malzemelerde elektronlar birbirlerine sıkı bir şekilde bağlı olduğundan elektriksel iletim için serbest elektronları yoktur. Dielektriklerin öz dirençleri çok yüksek olduğundan elektrik akımını geçirmeleri zordur ancak elektrik alanın etkisiyle kutuplanma özelliği gösterirler. Dielektriklerin temel özelliği elektriksel polarizasyondur. Dielektriklerin elektriksel özellikleri ile ilgili, polarizasyon ve elektrik iletimine ek olarak, dielektrik kayıplar, artan dış elektrik alan ile zaman içinde elektriksel özellik değişimi ve güçlü elektrik alan altında yalıtım özelliğinin korunması önemli noktalardır.

Dielektriklerde sıcaklıktan veya dielektriklerdeki serbest yük konsantrasyonundaki farklılıktan kaynaklanan akım, genellikle çok küçük olduğu için yük transferi esas olarak dış elektrik alanda gerçekleşir. Polarizasyon, elektriksel alan etkisi altında tüm yüklerin kayması iken, yüklerin sadece çok küçük bir kısmı iletkenliğe katkıda bulunabilir. Ayrıca, polarizasyon sırasında dielektrik ve metalik elektrotlar arasında yük değişimi gerçekleşmez, oysa iletkenlik durumunda böyle bir değişim gereklidir.

Dielektriklerin çeşitli elektriksel, termal ve mekanik özellikleri tersinir ve tersinmez olarak sınıflandırılabilir. Tersinir özellikler söz konusu olduğunda, bir malzemenin ilk durumu, dış elektrik alanının kaldırılmasından sonra neredeyse tamamen eski haline getirilebilir. Elektriksel polarizasyon, tersinir elektriksel özelliklere örnek olarak verilebilirken, termal tersinir özelliklere örnek olarak ısı kapasitesi; mekanik özelliklere örnek olarak elastik deformasyon verilebilir. Tersinmez olaylarda ise, neden ortadan kaldırıldıktan sonra bile etkinin sonucu devam etmektedir. Dielektriklerin elektriksel özellikleri göz önüne alındığında, tersinmez özellikler dielektrik kayıpları ve elektriksel bozulmadır. Geri döndürülemez termal olaylar, malzeme ısıtıldıktan sonra erime veya buharlaşmadır; mekanik geri döndürülemez olaylar, malzemenin gerilme veya sıkıştırma altında tahrip olmasını içerir [54].

İnce film transistörlerde, transistörün performansını ve çalışma stabilitesini etkileyen en önemli parametrelerden biri uygun dielektrik malzeme seçimidir. Yalıtkan olan dielektrik tabaka, iletken kanal ile gate elektrotunu birbirinden ayırır. Gate elektrotuna uygulanan elektrik alan dielektrik tabakada depolanarak kanaldaki istenmeyen elektrik akışını engeller. Bu da transistörün kontrollü şekilde açılıp kapanmasına olanak sağlar. Yüksek elektrik alan şiddetine dayanıklılık, tuzak olarak

hareket edebilecek safsızlıkları en az seviyede içirme, çevresel etkenlere karşı kararlı yapıda olma ve uygulanacak işlem adımlarına uyum sağlayabilme, TFT’lerde kullanılacak bir dielektrik malzemede bulunması gereken en temel özelliklerdir.

d kalınlığındaki bir dielektrik tabakanın kapasitans değeri;

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2.1)$$

Eşitlik 2.1’de verilmektedir. Burada $\epsilon_0 = 8,8542 \times 10^{-12}$ F/m vakumun dielektrik sabiti, ϵ_r yalıtkan malzemenin dielektrik sabiti, A iletkenin yüzey alanı ve d yalıtkanın kalınlığıdır. Dolayısıyla, transistör kanalında belirli miktarda yük elde etmek için ya dielektrik tabakanın kalınlığı azaltılmalı ya da daha yüksek dielektrik sabitine sahip bir dielektrik kullanılmalıdır.

Dielektrik sabiti, yalıtkanın elektrik enerjisini bir elektrik alanda depolama yeteneğinin ölçüsüdür. Dielektrik tabakanın dielektrik sabiti, kapasitansı belirler. Yüksek dielektrik sabitli malzemelerin kapasitansı daha yüksektir. Dielektrik tabakanın kalınlığı ile kapasitansı ters orantılıdır. İnce bir dielektrik tabaka daha yüksek kapasitans değerine sahipken, daha kalın dielektrik tabakanın kapasitans değeri daha düşüktür. Yüksek dielektrik sabitli malzemelerde, düşük dielektrik sabitli malzemelere göre orta kalınlıktaki tabakalarla daha yüksek kapasitans elde edilebilir. Yüksek kapasitanslı dielektrik malzemeler, daha fazla elektrik yükü depolanmasını sağlayarak transistörün daha hızlı ve hassas tepki vermesini sağlar. Bununla birlikte daha düşük sızıntı akımı ve iyi termodinamik kararlılık gibi diğer kriterler de dikkate alınmalıdır.

Dielektrik malzemenin üretim yöntemi, kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü ve izolasyon kalitesi sızıntı akımını etkilemektedir. Kalın bir dielektrik tabaka daha fazla yalıtım sağlayabileceği için sızıntı akımının daha az miktarda olması düşünülmektedir. Ancak kalın dielektrik tabaka kullanımı genellikle daha yüksek çalışma voltajı gerektirir. Uygulanan yüksek gerilim, dielektrik tabakadan geçmek için daha büyük elektrik alan oluşturur ve elektronların dielektrik tabakayı aşmalarını kolaylaştırarak sızıntı akımında artışa sebep olabilir.

İnce film transistörlerde, yük birikimi ve taşınımı, dielektrik ile yarıiletken arasındaki arayüzeyde ve çok yakınında gerçekleşmektedir. Bu nedenle, arayüzeyin ve dielektriğin özellikleri cihaz özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Bir transistörün elektriksel performansını belirleyen μ , V_{Th} , SS değeri gibi temel cihaz parametreleri sadece yarıiletken tabakaya değil, aynı zamanda yalıtkanın kimyasal

yapısına ve dielektriğin özelliklerine de bağlıdır [55]. Tüm bu faktörler göz önünde bulundurulduğunda istenilen elektriksel performans özelliklerini elde etmek için, uygun dielektrik malzeme seçimi ve dielektrik tabaka kalınlığının optimize edilmesi alan etkili transistörler için büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada dielektrik tabaka olarak kullanılan SiO_2 ve HfO_2 'in bazı temel özellikleri aşağıda anlatılmaktadır.

2.3.1. Silisyum (IV) oksit (SiO_2)

TFT'lerde en yaygın olarak kullanılan dielektrik malzeme olan SiO_2 , 3,9 dielektrik sabitine ve ~ 9 eV optik bant aralığına sahiptir [56]. Silisyum oksit, sertlik, korozyon direnci, dielektrik, optik geçirgenlik gibi özelliklerinden dolayı malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek için ince bir film olarak yaygın şekilde kullanılır. Silisyum oksit filmleri elde etmek için termal buharlaştırma, püskürtme, plazma ile geliştirilmiş kimyasal buhar biriktirme (PECVD), atmosferik basınçlı plazma biriktirme, sol-jel yöntemi ve oksidasyon yöntemi gibi birçok yöntem kullanılmaktadır [57].

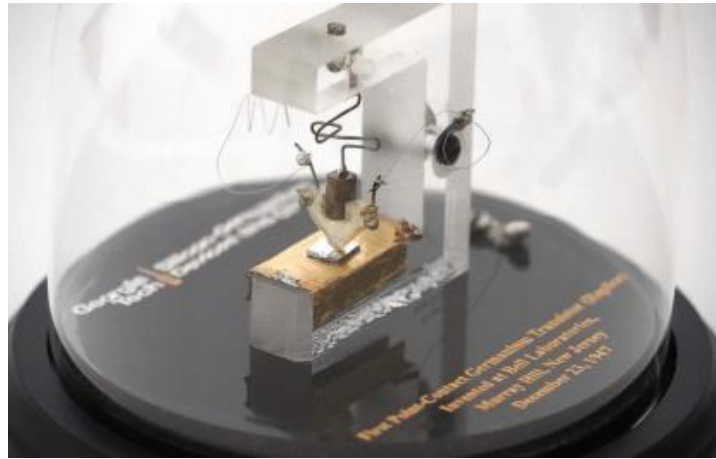
Bir silisyum tabaka yüksek sıcaklıklarda oksitleyici bir ortamla karşılaştığında, SiO_2 yüzeyde kimyasal olarak oluşmaktadır. Oksitleyici ortam genellikle buhardır ve süreç ıslak oksidasyon olarak bilinmektedir. Saf oksijen gazı kullanılırsa, işlem kuru oksidasyon olarak adlandırılmaktadır. Yüksek izolasyon dirençli ve düşük geçirgenlikli bir malzeme olmasının yanı sıra yüksek kaliteli ve pürüzsüz, termal büyütme ile oluşturulmuş oksit kaplı silisyum alttaşların hazır olarak temin edilebilmesi de dielektrik tabaka olarak tercih edilmesini sağlamaktadır. Ticari olarak satın alınan SiO_2 'ler yüksek saflıkta hazırlandığı için dielektrik sabitleri sabittir ve kalınlıkla değişmez.

2.3.2. Hafniyum (IV) oksit (HfO_2)

HfO_2 , yüksek dielektrik sabiti (25), yüksek oluşum ısısı (~ 271 kcal/mol) ve (~ 5.68 eV) geniş bant aralığı gibi birçok üstün özelliğe sahiptir [58]. Sıcaklığa bağlı olarak kristal yapısı değişen HfO_2 monoklinik, tetragonal veya kübik yapıda bulunabilir. SiO_2 'den daha yüksek dielektrik sabitine sahip olması ve silisyum alttaş ile temas halinde termal ve kimyasal olarak kararlı olması nedeniyle, yüksek performanslı yarıiletken cihazlarda tercih edilmektedir. Bu özellikleri sebebiyle HfO_2 , SiO_2 'nin yerini almaya aday bir dielektrik malzemedir [59].

2.4. Transistörler

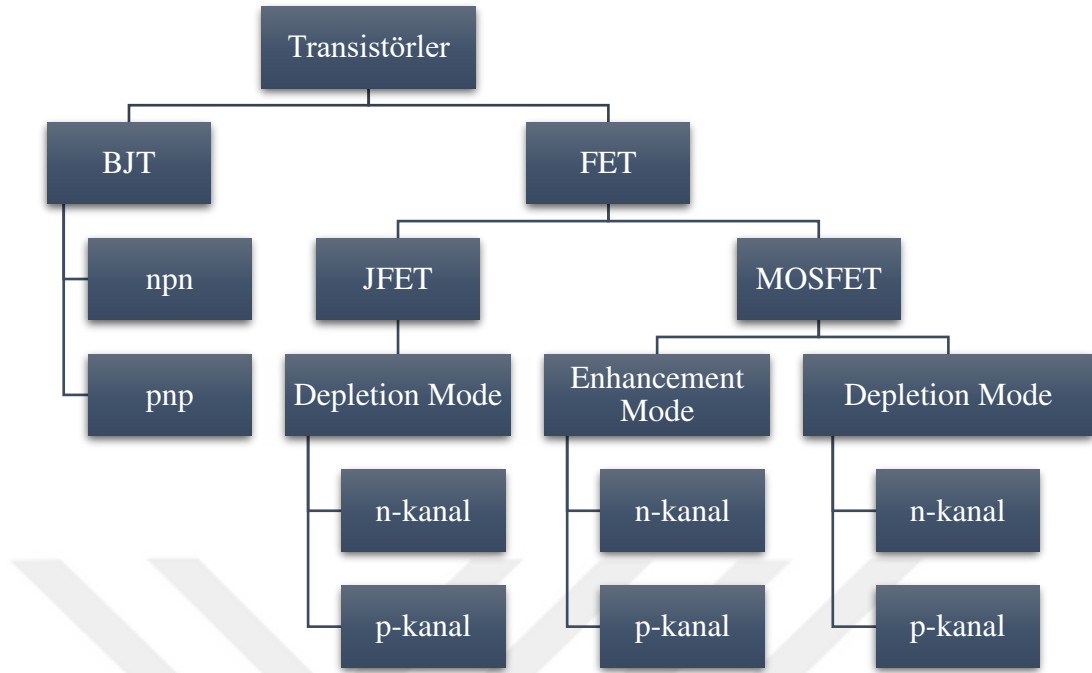
Mobil iletişim araçları, bilgisayarlar, dijital saatler gibi kullandığımız tüm elektronik cihazların vazgeçilmez en temel bileşeni olan transistörlerin önemi, teknoloji geliştikçe artmaktadır. Günümüzdeki teknolojik ilerlemenin temel taşlarından biri olarak kabul edilen, replika görseli Görsel 2.1’de verilen ilk transistör 1947 yılında Bell Laboratuvarlarında John Bardeen ve Walter Brattain tarafından üretilmiştir [60]. TFT’ler ise, silisyum teknolojisinin gelişmesiyle birlikte üretilmiştir ve ince film tabakalarının yardımıyla yapılandırılmıştır. 100 yıla yakın bir geçmişe sahip olan TFT’lerle ilgili ilk buluş 1925 yılında gerçekleşmiş ve 1930 yılında J.E. Lilienfeld ve O. Heil tarafından patenti alınmıştır [61,62]. Ancak o dönemlerde bu ilk raporlar, konsept patentler olduğu için cihazların üretimi hakkında bilgiye ulaşılamamaktadır. Bilgilerine ulaşılabilen ilk TFT, 1962 yılında RCA Labs’da Weimer tarafından vakum tabanlı buharlaştırma ve gölge maskeleme kullanılarak cam alt tabaka üzerinde silisyum monoksit dielektrikli ve Au elektrotlu, mikrokristalin kadmiyum sülfür (CdS) n-tipi TFT olmuştur [63]. İki yıl sonra 1964 yılında Klansens ve Koelmans tarafından ilk oksit TFT olan SnO_2 TFT, cam üzerine fotolitografik teknikler kullanılarak üretilmiştir. Ancak TFT’nin elektriksel performansı ile ilgili ayrıntılı bilgi bulunmamaktadır [64]. Oksit TFT’ler 1996 yılında potansiyel ferroelektrik bellek TFT’leri olarak tekrar dikkat çekmiştir. Prins ve arkadaşları tarafından, darbeli katman biriktirme yoluyla biriktirilen antimon katkılı bir kalay oksit kullanılarak ilk şeffaf oksit TFT üretilmiştir [65]. 2003 yılında oksit TFT, yüksek elektron mobilitesi sağlayacak olan ZnO ile yeniden ilgi görmeye başlamıştır. Bu TFT ekran arka panellerinde kullanılan a-Si için potansiyel bir alternatif olarak sunulmuştur [66].



Görsel 2.1. Üretilen ilk nokta temaslı transistörünün orijinal malzemeler kullanılarak ölçeklendirilmiş replikası [67]

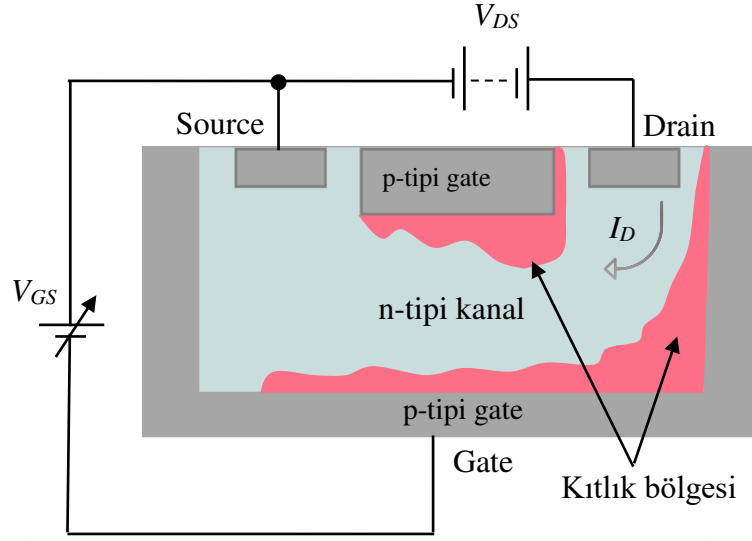
Transistör, elektronik devrelerde elektrik sinyalinin gücünü yükseltmek ve değiştirmek amacıyla kullanılan bir devre elemanıdır. Elektronik devrelerdeki ana bileşenlerden biri olan transistörler, diğer bileşenlerin işlevlerini yerine getirmesi için gerekli olan doğru gerilim ve akımı sağlayarak elektronik cihazların daha verimli, güvenilir ve kullanışlı olmasını sağlamaktadırlar. Transistörlerin daha küçük boyutlu ve daha az güç tüketen alternatiflerinin geliştirilmesi, günümüzde elektronik cihazların küçültülerek taşınabilir hale getirilmesine olanak sağlamıştır. Transistörler, birçok elektronik cihazda çeşitli amaçlar için tercih edilmektedir. Zayıf sinyalleri güçlendirmek için yükselteç olarak radyo alıcıları, iletişim cihazları ve ses sistemlerinde, anahtarlama özelliği kullanılarak dijital mantık devrelerinde, sıcaklık, ışık ve manyetik alan gibi fiziksel değişkenleri algılamak için sensörlerde kullanılmaktadır.

Şekil 2.5'te transistörlerin sınıflandırma şeması verilmiştir. Transistörler, bipolar eklem transistörler (BJT) ve alan etkili transistörler (FET) olmak üzere temelde iki çeşittir. Transistörlerin üç tane elektrotu bulunur. Bu elektrotlar BJT'ler için base, emitter ve collector olarak adlandırılır. Yarıiletkenlerin bulunduğu konuma bağlı olarak BJT'ler, iki n-tipi yarıiletkenin (emitter ve collector) arasında p-tipi yarıiletkeninin (base) yer aldığı npn ve iki p-tipi yarıiletken (emitter ve collector) arasında n-tipi yarıiletkenin (base) yer aldığı pnp olmak üzere iki çeşittirler. BJT'nin çalışması, base akımını kullanarak emitter-collector arasındaki akımın kontrol edilmesi prensibine dayanmaktadır. BJT'lerde base, emitter ve collector olan elektrotlar, FET'lerde gate, drain ve source olarak adlandırılmaktadır. FET'ler, eklem alan etkili transistör (JFET), metal oksit yarıiletken alan etkili transistör (MOSFET) olmak üzere olmak üzere ikiye ayrılır.



Şekil 2.5. Transistörlerin sınıflandırma şeması

Şekil 2.6’da n-kanallı bir JFET yapısı verilmiştir. n-kanallı ve p-kanallı olmak üzere ikiye ayrılan JFET’lerin, akım yönleri ile polarlama gerilimlerinin ters olması dışında çalışma prensipleri aynıdır. JFET, iletken kanal bölgesinin direncini kontrol etmek için pn eklemlerini kullanır. Şekil 2.6’da görülen JFET, gate oluşturmak için kullanılan iki p-tipi bölge arasında bulunan n-tipi bir kanaldan oluşmuştur. Herhangi bir harici gerilim uygulanmadığında drain ve source elektrotlarını birbirine bağlayan bir kanal mevcuttur. Gate-source uçlarına ters yönde bir gerilim uygulandığında, p-n ekleminde kıtlık bölgesi oluşur, bu bölgede serbest taşıyıcılar yoktur. Kıtlık bölgesi, genellikle simetrik olmayan bir şekle sahiptir ve çoğunlukla kanalın sonundaki drain’e doğru kalınlaşır. Bu durum, drain üzerindeki voltajın, kanal boyunca meydana gelen voltaj değişiminden dolayı source üzerindeki voltajdan daha pozitif olması sebebiyle ortaya çıkar. Bu durum, özellikle drain’e yakın olan bölgelerde daha yüksek bir potansiyel oluşturur, bu da kıtlık bölgesi tabakasının kalınlaşmasına neden olur. Uygulanan gate source gerilimin artmasıyla kıtlık bölgesi genişleyerek, kanalın daralmasına ve akımın azalmasına, kanal direncinin ise artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle JFET, n-kanallı veya p-kanallı olabilir ancak yapısı nedeniyle depletion modda çalışan bir cihazdır.



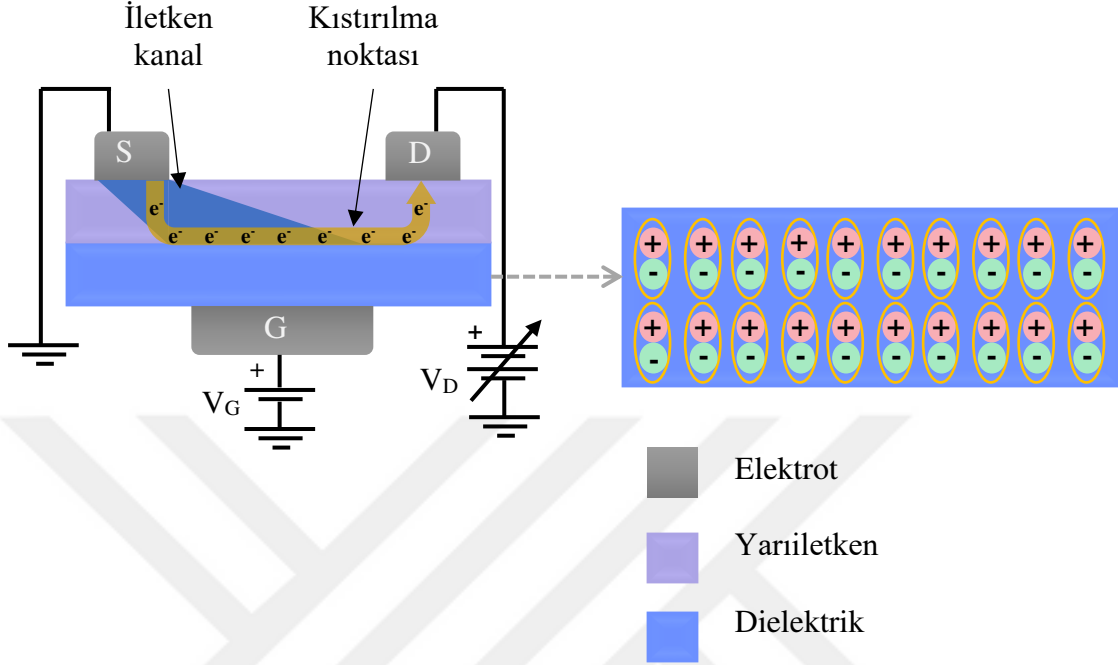
Şekil 2.6. n-kanallı JFET yapısı

MOSFET'lerde gate, ince bir yalıtkan tabaka (genellikle SiO_2) ile transistörün diğer kısmından ayrılmıştır. Kanaldaki akımın, elektron hareketliliğinden kaynaklandığı n-kanallı MOSFET ve hollerden kaynaklandığı p-kanalı MOSFET olmak üzere iki türü bulunmaktadır. Enhancement ve depletion olmak üzere iki modda çalışırlar.

İnce film teknolojisi kullanılarak üretilen ve alan etkili transistör olan TFT'lerin çalışma prensibi, MOSFET yapısına dayanır. MOSFET'lerde, genellikle yarıiletken tabaka olarak silisyum tabanlı malzemeler kullanılırken, TFT'lerde aktif tabaka olarak farklı yarıiletken malzemeler kullanılabilmektedir. Özellikle metal oksitler veya organik yarıiletkenler, TFT'lerin aktif tabakalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

TFT'ler, yalıtkan tabaka (dielektrik tabaka), yarıiletken tabaka ile source, drain ve gate olmak üzere 3 elektrottan oluşan özel bir alan etkili transistör türüdür. n-kanallı bir TFT için, source elektrotu topraklanarak gate elektrotuna pozitif bir V_{GS} gerilimi uygulandığında, Şekil 2.7'de görüldüğü gibi yarıiletken kanalda akım elde etmek için, dielektrik tabakada gate'e bağlı yük polarizasyonu oluşur. Bu polarizasyon sonucunda serbest yük taşıyıcıları yani elektronlar, yarıiletkenin dielektrik tabakaya yakın kısmında yarıiletken aktif tabaka içerisinde birikmeye başlar. Biriken yükler metal source ve drain elektrotları arasında yarıiletkenin bu kısmını daha iletken hale getirerek iletken kanalı oluşturur. Gate elektronuna uygulanan gerilime bağlı olarak kanaldaki yük miktarı değişir. Transistörün gate elektrotuna uygulanan gerilim ile, drain source elektrotları arasında oluşan yarıiletken kanaldaki akımının bu şekilde kontrol edilmesine alan etkisi

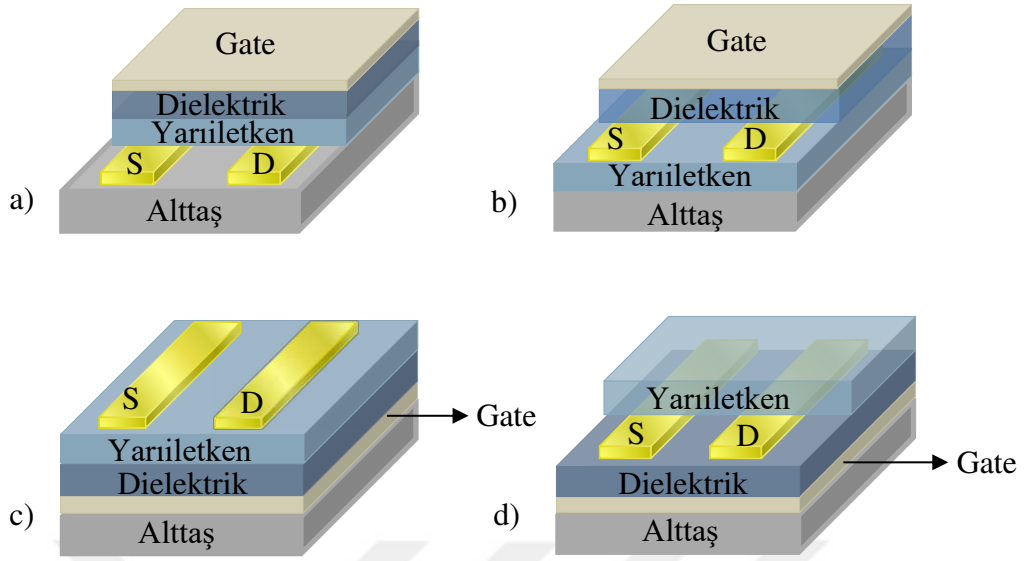
denir [68]. TFT'lerin tercih edilmelerinin en önemli nedenleri, yüksek hızlı anahtarlama ve hassas kontrol sağlamalarıdır.



Şekil 2.7. n-kanallı TFT yapısı

Transistörler drain source ve gate elektrotlarının bulundukları konumlara göre Şekil 2.8'de gösterildiği gibi farklı konfigürasyonlarda tasarlanabilmektedir. Aynı malzemelerden oluşan ancak farklı konfigürasyonlara sahip transistörlerin elektriksel performansları değişiklik gösterebilmektedir. TFT'nin hangi konfigürasyonda üretileceği, ince filmlerin biriktirme koşullarına ve kullanılacakları uygulamalara bağlı olarak seçilmektedir. Buna göre isimlendirmeler aşağıdaki gibidir:

- a) Bottom contact / top gate (BC/TG)
- b) Top contact / top gate (TC/TG)
- c) Top contact /bottom gate (TC/BG)
- d) Bottom contact / bottom gate (BC/BG)



Şekil 2.8. Farklı konfigürasyonlarda tasarlanmış TFT'ler

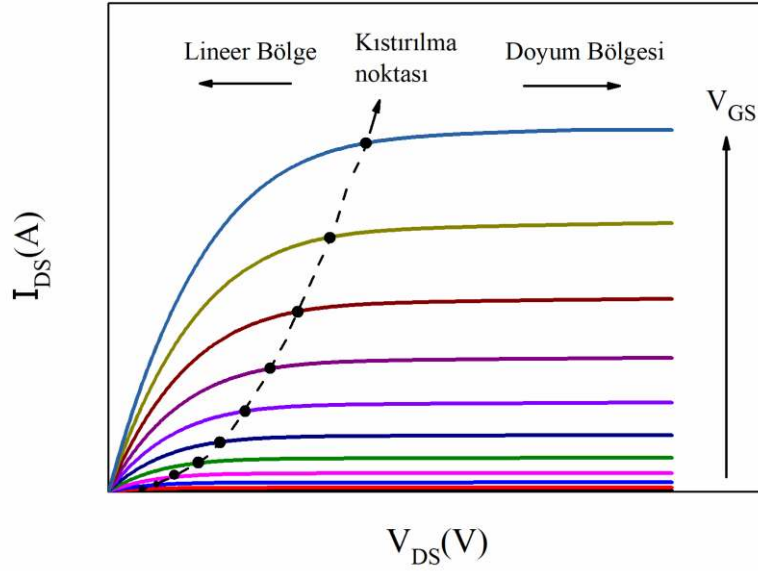
Şekil 2.8'de farklı konfigürasyonlarda tasarlanmış TFT'lerin şematik yapısı görülmektedir. Şekil 2.8a'da drain ve source elektrotları yarıiletken malzemenin altında, gate elektrotu ise dielektrik malzemenin üzerinde konumlanmaktadır. Bu TFT konfigürasyonu bottom contact/top gate (BC/TG) olarak adlandırılır. Drain ve source elektrotlarının yarıiletken malzemenin üzerinde, gate elektrotunun ise dielektrik malzemenin üzerinde yer aldığı top contact/top gate (TC/TG) konfigürasyonu ise Şekil 2.8b'de gösterilmiştir. Şekil 2.8c'de drain ve source elektrotları yarıiletken malzemenin üzerinde, gate elektrotu dielektrik malzemenin altında bulunmaktadır. Bu konfigürasyondaki TFT'lere top contact /bottom gate (TC/BG) olarak adlandırılır. Drain ve source elektrotlarının yarıiletken malzemenin, gate elektrotunun ise dielektrik malzemenin altında konumlandığı bottom contact /bottom gate (BC/BG) olarak adlandırılan TFT konfigürasyonu Şekil 2.8d'de görülmektedir.

Bu tez çalışmasındaki transistörler, sensör uygulamaları için daha uygun olduğundan TC/BG yapısında tasarlanmıştır.

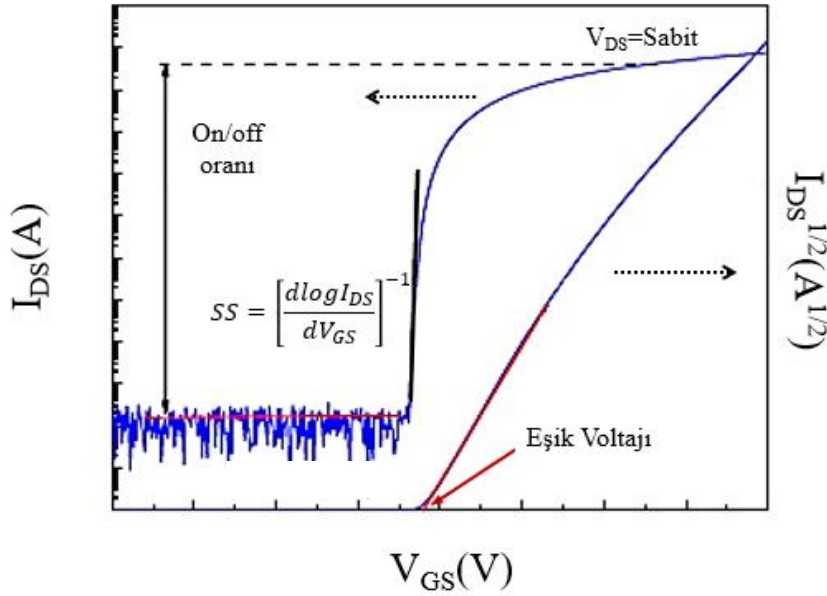
2.4.1. TFT'lerin akım gerilim karakteristikleri

Bir TFT'nin performansı, elektriksel karakterizasyonu yapılarak değerlendirilir. Bunun için, iki farklı akım gerilim ölçümü ile alınır. Bunlardan biri sabit gate source gerilimi (V_{GS}) altında, drain source (I_{DS}) akımının drain source gerilimine (V_{DS}) bağlı olarak değişiminin incelendiği çıkış (output) karakteristiğidir. Şekil 2.9'da bir TFT'nin

output karakteristiği verilmiştir. Bu grafik transistörün hangi voltaj değerinde ve hangi bölgede (lineer veya doyum) çalıştığını gösterir. Transistörler uygulanan V_{GS} gerilimine bağlı olarak düşük V_{DS} değerlerinde lineer bölgede, yüksek V_{DS} değerlerinde doyum bölgesinde çalışır.



Şekil 2.9. TFT'nin output karakteristiği



Şekil 2.10. TFT'nin transfer karakteristiği

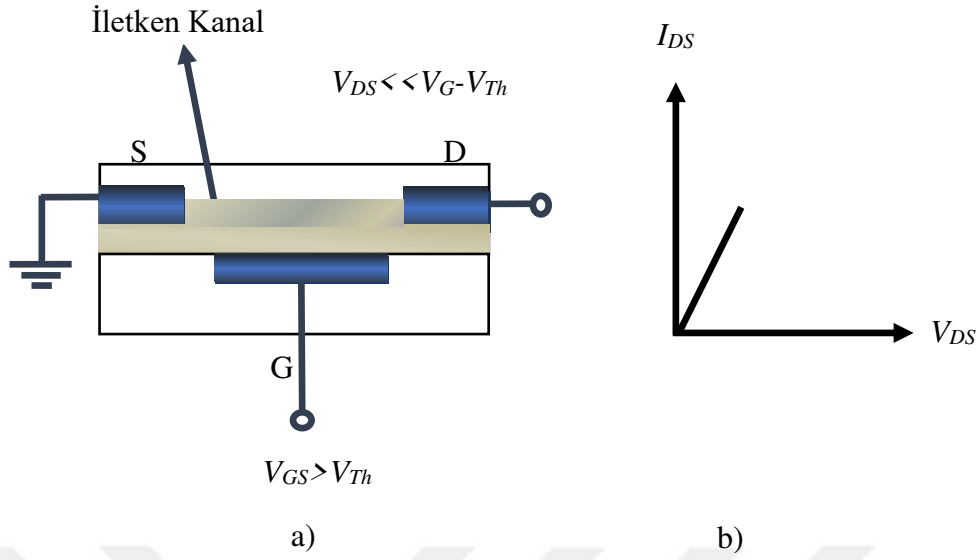
Şekil 2.10'da bir TFT'nin transfer karakteristiği verilmiştir. Transfer karakteristiği output grafiğinden belirlenen sabit bir V_{DS} gerilimi altında, I_{DS} akımının V_{GS} gerilimine bağlı değişimini gösterir. Bu grafikten yararlanılarak transistörün elektriksel performansını belirleyen μ değeri, V_{Th} değeri, $I_{on/off}$ oranı ve SS gibi temel parametreleri bulunur.

2.4.2. TFT'lerin çalışma bölgeleri

Transistörün gate elektroduna uygulanan gerilim, gate-source elektrodu arasındaki potansiyel farkı temsil eder ve V_{GS} gerilimi olarak adlandırılır. V_{GS} gerilimi, transistörün V_{Th} değeri üzerinde bir değere ulaştığında ($V_{GS} > V_{Th}$), yük yoğunluğu düzgün olarak dağılmış olan iletken kanal oluşur ve transistör aktif hale gelir. Oluşan kanalın elektriksel iletkenliği, TFT'lerin çalışma prensibi olan gate elektrotuna uygulanan elektrik alan etkisiyle yönetilir. V_{GS} geriliminin artmasıyla elektrik alan etkisiyle kanaldaki yük yoğunluğu artar. Bu, kanalın daha fazla yük taşıyıcı hareketliliğine olanak sağladığı, iletkenliği ve akımı artırdığı anlamına gelir. Kanaldaki yük yoğunluğu ile kanalın direnci ters orantılıdır. Daha düşük dirence sahip olan kanal, daha iyi iletkenlik göstererek daha yüksek akım geçirir. Kanaldaki yük yoğunluğu ve direnci, transistörün çalışma bölgesini belirler.

2.4.2.1. Lineer (ohmic) bölge

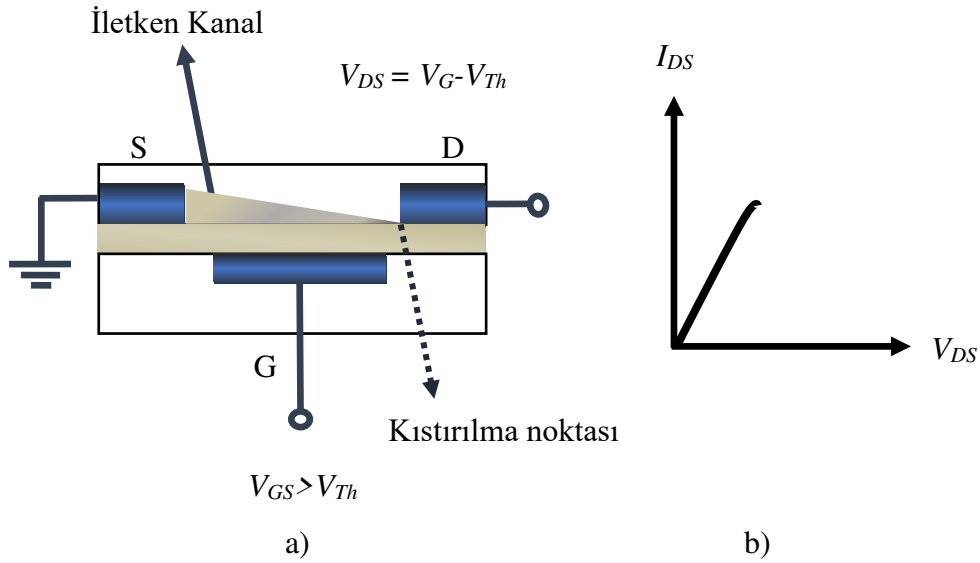
Şekil 2.11a bir TFT'de, V_{DS} geriliminin $V_G - V_{Th}$ 'dan küçük olduğu durumda iletken kanalın oluşumunu göstermektedir. Uygulanan V_{DS} gerilimine bağlı olarak I_{DS} akımının doğrusal bir şekilde değiştiği bölge, lineer bölge olarak adlandırılır. Transistörün lineer bölgede çalışması, kontrol elektrotu olan gate üzerine uygulanan gerilimin, transistörün kanal direncini azaltmaya yeterli olmadığı durumu ifade eder. Bu durumda uygulanan gerilim ve kanaldaki akım, Şekil 2.11b'de görüldüğü gibi Ohm yasasına uygun davranır. V_{DS} arttıkça, kanaldaki akım artışı kanal daralana kadar devam eder.



Şekil 2.11. a) TFT'nin lineer bölgede çalışması ve b) lineer bölge akım-gerilim karakteristiği

2.4.2.2. Kısırılma (pinch-off) bölgesi

V_{DS} geriliminin, $V_G - V_{Th}$ değerine eşit olana kadar artırılması, TFT'nin kanaldaki taşıyıcı konsantrasyonunda azalmaya ve Şekil 2.12a'da gösterildiği gibi kanalın, drain yakınındaki bölgede daralmasına neden olur. Kanalın drain yakınındaki bir kısmını yok edecek kadar yüksek V_{DS} gerilimi altında akım doyuma ulaşır ve lineer bölgeden doyum bölgesine geçiş noktası kanalın kısırılma noktası olarak adlandırılır (Şekil 2.12b).

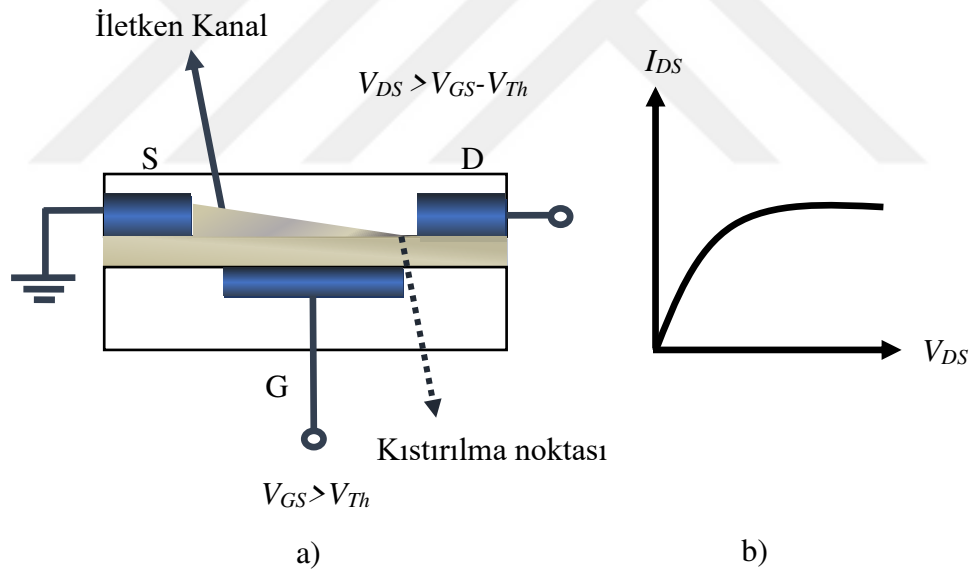


Şekil 2.12. a) İletken kanalın kısırılma noktası oluşumu ve b) karşılık gelen akım-gerilim karakteristiği

2.4.2.3. Doyum (saturation) bölgesi

Bir TFT’de V_{DS} geriliminin, $V_G - V_{Th}$ gerilimi arasındaki farktan daha yüksek olduğu durumda kıştırılma noktasının source elektrotuna doğru kaymasıyla depletion bölgesinde genişleme, dolayısıyla kanal uzunluğunda kısalma meydana gelir.

Şekil 2.13’te doyum bölgesinde çalışan bir TFT’nin kanal yapısının şematik gösterimi ve akım-gerilim karakteristiği verilmiştir. Şekil 2.13a’da görüldüğü gibi tükenme bölgesi genişliği kanal uzunluğundan küçük olduğu sürece, kıştırma noktası ile source arasında kanal direnci sabit kalır. Bu nedenle V_{DS} gerilimindeki artış, akımda lineer bölgedeki gibi bir artışa neden olmaz. Kanaldaki taşıyıcı yoğunluğu maksimum seviyede olduğu için drain source akımının Şekil 2.13b’de görüldüğü gibi sabit bir değere ulaştığı bu durumda, TFT doyum bölgesinde çalışmaktadır. Kanaldaki taşıyıcı hareketliliği ve hızı ulaşılabilir en üst seviyede olmasından dolayı bu bölgede transistör maksimum performans sağlamaktadır.



Şekil 2.13. a) TFT'nin doyum bölgesinde çalışması ve b) doyum bölgesi akım-gerilim karakteristiği

2.4.3. TFT performansını etkileyen temel parametreler

Transistörün elektriksel performansını etkileyen temel parametreler şunlardır;

- Mobilité
- Eşik Voltajı
- Açık/Kapalı Akım Oranı
- Alt eşik salınım değeri

Elde edilen bu parametreler transistörün performansı hakkında bilgi edinmeye yardımcı olur. Bu parametrelerin nasıl hesaplandığı aşağıda sırasıyla açıklanmaktadır.

2.4.3.1. Mobilite

Uygulanan elektrik alan başına ortalama yük taşıyıcı hızı, mobilite olarak tanımlanmaktadır. Mobilite, TFT'nin elektriksel performansının değerlendirmesinde en önemli parametrelerden biridir. Yüksek mobilite, yarıiletken malzemenin elektrik akımını daha iyi iletebildiği anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, yüksek mobilite, bir yarıiletken cihazın daha iyi performans sergilemesinin bir göstergesidir.

Mobilite, TFT'lerin farklı akım-gerilim karakteristiklerine sahip olduğu lineer ve doyum bölgesi olmak üzere iki farklı çalışma bölgesinden hesaplanabilir. Düşük drain voltaj değerlerinde ($V_{DS} < (V_{GS} - V_{Th})$), drain akımının lineer olarak değiştiği bölgede akım-gerilim ilişkisi

$$I_{DSlin} = \frac{W}{L} \mu C_i (V_{GS} - V_{Th}) V_{DS} \quad (2.2)$$

ifadesi ile verilmektedir. Burada I_{DSlin} ; lineer bölgedeki drain akımını, W ; kanal genişliğini, L ; kanal uzunluğunu, μ ; mobiliteyi, C_i ; dielektrik tabakanın kapasitansını, ifade etmektedir. Uygulanan V_{GS} gerilimine bağlı olarak I_{DS} akımının nasıl değiştiğini ifade eden geçiş iletkenlik ile lineer bölgedeki mobilite arasındaki ilişki

$$|g_m|_{linear} = \left(\frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} \right)_{V_{DS}=sabit} = - \frac{\mu W C_i}{L} V_{DS} \quad (2.3)$$

ile verilmiştir. Output grafiğinin lineer bölgesinden belirlenen sabit bir drain source voltaj değerinde alınan $\sqrt{I_{DS}} - V_{GS}$ transfer karakteristiğinin eğimi kullanılarak Eşitlik (2.2)'den elde edilen lineer bölgedeki mobilite değeri (μ_{lin})

$$\mu_{lin} = - \frac{L}{W C_i V_{DS}} \left(\frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} \right) \quad (2.4)$$

Eşitlik 2.4 ile hesaplanır. Transistörün doyum bölgesinde ($V_{DS} > (V_{GS} - V_{Th})$) akım-gerilim ilişkisi

$$I_{DSsat} = \frac{W}{2L} \mu C_i (V_{GS} - V_{Th})^2 \quad (2.5)$$

şeklindedir. Output grafiğinin doyum bölgesinden belirlenen sabit bir drain source voltaj değerinde alınan $\sqrt{I_{DS}} - V_{GS}$ transfer karakteristiğinin eğimi kullanılarak hesaplanan doyum mobilitesi (μ_{sat})

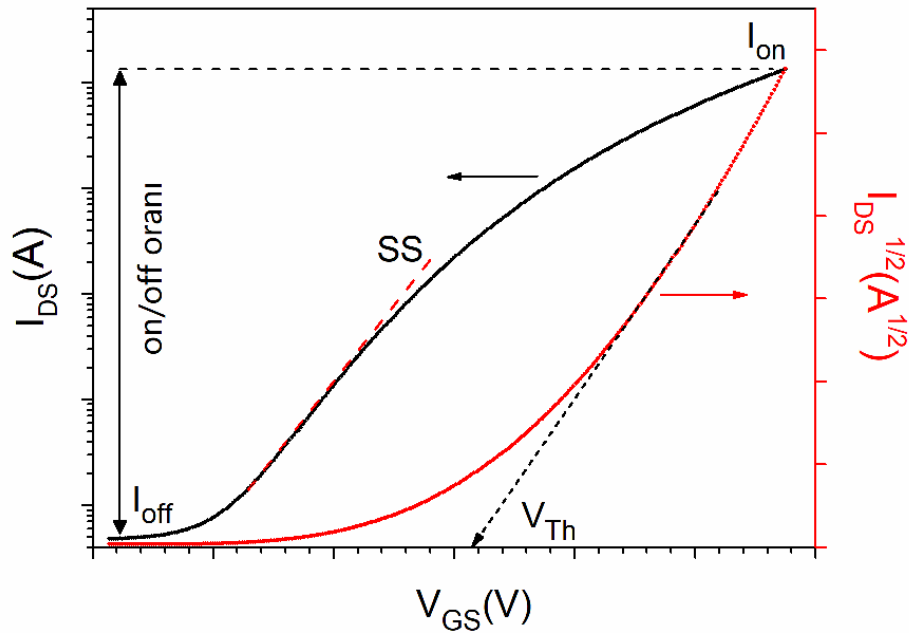
$$\mu_{sat} = \frac{2L}{WC_i} \left(\frac{d\sqrt{I_{DS}}}{dV_{GS}} \right)^2 \quad (2.6)$$

ile verilir.

Bu tez çalışmasındaki mobilite değerleri, yüksek yük taşıyıcı yoğunluğuna sahip olan doyum bölgesindeki değerler kullanılarak hesaplanmıştır.

2.4.3.2. Eşik voltajı

V_{Th} , transistörün çalışması yani kanaldan akımın geçmeye başlaması için gerekli minimum voltaj değeridir. Şekil 2.14'te de bir TFT'nin transfer karakteristiği verilmiştir. V_{Th} , Şekil 2.14'te belirtildiği gibi $I_{DS}^{1/2}$ 'nin V_{GS} ile değişimini gösteren transfer eğrisinden, akımın linear olarak arttığı doğrunun V_{GS} eksenini kestiği noktadan Eşitlik (2.5) kullanılarak elde edilir.



Şekil 2.14. TFT'nin V_{Th} , $I_{on/off}$ oranı ve SS değerinin grafik üzerinde gösterimi

TFT'nin enhancement modunda veya depletion modunda çalışıyor olmasına bağlı olarak V_{Th} değeri negatif veya pozitif değer alabilmektedir. n-kanallı bir TFT için bu değer pozitif olması, $V_{GS}=0V$ olması durumunda transistörlerin kapalı olduğunu ve iletken kanalın oluşabilmesi için pozitif gate voltajı gerektiğini göstermektedir. Depletion modunda ise $V_{GS}=0V$ 'da iken kanaldan bir miktar akım geçmektedir ve transistörün açık durumdan kapalı duruma geçmesi için negatif gate voltajı uygulanması gerekmektedir.

V_{Th} , kullanılan yarıiletken ve dielektriğe büyük ölçüde bağlıdır. Yerleşik dipoller, safsızlıklar, arayüzey durumları ve özellikle yük tuzakları eşik voltajını etkilemektedir [69].

2.4.3.3. Açık durum/kapalı durum akım oranı

Şekil 2.14' te görüldüğü gibi, transistörün açık durumdaki (on) drain akım değerinin kapalı durumdaki (off) drain akım değerine oranına, $I_{on/off}$ oranı denir. Transistör kapalı durumdayken akım geçmez, ancak belirli bir sızıntı akımı vardır, bu akım I_{off} değeridir. Transistörün açık olduğu durumda ulaştığı maksimumu akım değeri ise I_{on} değeridir. $I_{on/off}$ parametresi cihazın akımı ne boyutlarda yükselttiğini belirler ve transistörün iyi bir anahtarlama karakteristiğine sahip olması gerektiğinden dolayı bu parametrenin yüksek bir değerde olması istenmektedir.

2.4.3.4. Alt eşik salınım değeri

TFT'lerin önemli parametrelerden biri olan SS değeri, eşik voltajının altındaki bölgede akım üzerindeki elektrik alan etkisini ve yalıtkan tabaka ile yarıiletken tabaka arasındaki ara yüzey tuzaklarının varlığını göstermektedir.

SS değeri,

$$SS = \left[\frac{d \log I_{DS}}{dV_{GS}} \right]^{-1} \quad (2.7)$$

eşitliği kullanılarak Şekil 2.14'te görüldüğü gibi $\log(I_{DS})-V_{GS}$ grafiğinin eğiminden elde edilir. TFT'nin off konumundan on konumuna geçme hızını belirleyen SS değerinin, anahtarlama hızını ve güç tüketimini etkilediği için düşük olması gerekmektedir.

SS değeri, dielektrik/aktif tabaka arayüzeyinde tuzaklanan yük taşıyıcıların yoğunluğunun (N_{SS}^{Max}) hesaplanmasında kullanılır.

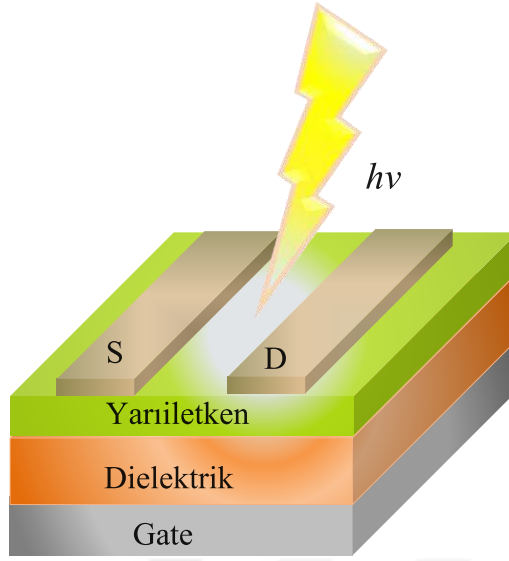
$$N_{SS}^{Max} = \left[\frac{SSxloge}{\frac{kT}{q}} - 1 \right] \frac{C}{q} \quad (2.8)$$

burada k , T ve q sırasıyla Boltzmann sabitini, Kelvin ölçeğinde oda sıcaklığını ve elektron yükünü temsil etmektedir. Düşük SS değeri, tuzaklanan yüklerin az olması anlamına gelmektedir.

2.4.4. Fototransistörler

Sensörler; gaz, sıcaklık, ışık, basınç gibi çevresel değişkenleri elektrik sinyallerine dönüştüren cihazlardır. Optik sensörler, gaz, sıcaklık, ışık, basınç gibi çevresel değişkenleri elektrik sinyallerine dönüştüren cihazlardır. Optik sensörler, belirli bir elektromanyetik spektrum aralığında ışığı tespit etme yeteneğine sahiptirler. Işığın dalga boyunu, frekansını veya polarizasyonunu algılayarak fotoelektrik etki yoluyla elektrik sinyaline dönüştürürler. Fotodiyot, güneş pili ve fototransistörler gibi optik sensörlere örnek gösterilebilen aygıtlar, ışık şiddetine göre dirençlerinin artması veya azalması prensibine göre çalışmaktadırlar.

Fototransistörler ise, iletken kanaldaki elektrik akımını ışık ile kontrol eden yarıiletken cihazlardır. Şekil 2.15'te ince film bir fototransistörün şematik yapısı verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi yarıiletken yüzeyine, optik bant aralığı enerjisine eşit veya daha yüksek enerjili bir ışık düşürüldüğünde, elektronların valans bandından iletim bandına geçiş yapmasıyla fotojenerasyon süreci başlar. Yarıiletken tarafından absorbe edilen fotonlar malzemede yüksek enerjili elektron ve hollerin oluşmasını sağlar. Yük taşıyıcıların kanaldaki hareketi sonucu TFT'nin drain source akımı artmaya başlar. Gate elektrotuna uygulanan gerilim kanaldaki taşıyıcı yoğunluğunu etkilerken, ışığın oluşturduğu ek yükler gate gerilimi olmadan da kanaldaki akımı etkileyebilir. Bu durum TFT'lerde ışığın, drain, source ve gate elektrotları dışında ek bir terminal olarak görev yapabileceği anlamına gelmektedir. Fototransistörler, transistörlere göre ışığa duyarlı oldukları ve daha yüksek hızda tepki verebildikleri için optoelektronik cihazlarda ve sensörlerde tercih edilmektedirler.



Şekil 2.15. İnce film fototransistörün şematik yapısı

Fototransistörlerin ışık altındaki davranışlarını belirleyen iki temel parametre foto duyarlılık ve fototepkidir. İnce film fototransistörler için foto duyarlılık değeri (P_{ps}), foto akımın (I_{ph}) karanlık ($I_{karanlık}$) akımına oranı olarak tanımlanır.

$$P_{ps} = \frac{I_{ph}}{I_{karanlık}} = \frac{I_{aydınlık} - I_{karanlık}}{I_{karanlık}} \quad (2.9)$$

burada $I_{aydınlık}$ aydınlatma altındaki drain akımıdır.

Fototepki (R_{pr}) ise fotoakımın aydınlatma şiddetine oranıdır.

$$R_{pr} = \frac{I_{ph}}{P_{opt}} = \frac{I_{aydınlık} - I_{karanlık}}{P.A} \quad (2.10)$$

Eşitlik 2.10'da P_{opt} kanala düşen ışığın gücü, P birim alan başına aydınlatma şiddeti, A ise iletken kanalın alanıdır.

Fototepkinin yanı sıra, fototransistörler için bir diğer önemli performans parametresi, cihazın zayıf bir sinyali algılama kapasitesini tanımlayan spesifik dedektivitedir (D^*). Dedektivite değerinin yüksek olması fototransistörün daha düşük ışık seviyelerini algılama yeteneğinin daha iyi olduğunu gösterir. Bu parametre, fototransistörlerin düşük ışık seviyelerindeki performansını değerlendirmede kullanılır ve fotodetektörlerin hassasiyetini ölçmede önemlidir. Dedektivite değeri, farklı aydınlatma şiddetlerinde aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir. Birimi Jones'tur ve $1 \text{ Jones} = 1 \text{ cm Hz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ 'dir.

$$D^* = \frac{A^{1/2}R}{(2qI_{karanlık})^{1/2}} \quad (2.11)$$

Işık altında transistörün fototepki mekanizması aşağıdaki bağıntı ile analiz edilebilir.

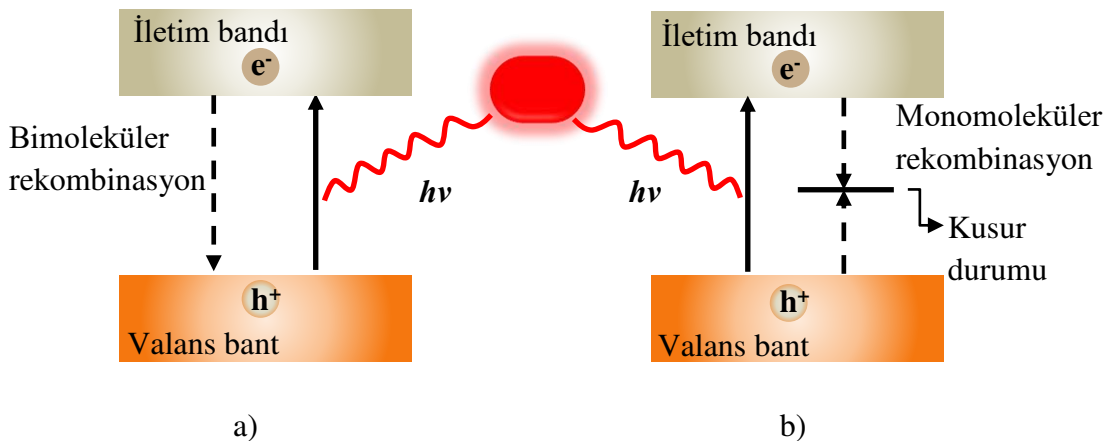
$$\frac{I_{photo}}{I_{dark}} = AP^\gamma \quad (2.12)$$

burada A bir sabiti, γ üstel güç faktörünü ifade etmektedir.

Fotojenerasyon süreciyle yük taşıyıcıların oluşumu ve rekombinasyon süreciyle yük taşıyıcıların kaybı fotoakımı etkiler. Fotoakımın incelenmesi, rekombinasyon süreçlerinin daha iyi anlaşılmasını sağlar. Bu tür bir işlem, γ üstel güç faktörünü belirlemek için ışık yoğunluğuna karşı fotoakım grafiği çizilerek aşağıdaki eşitlik ile analiz edilebilir.

$$I_{ph} \propto P^\gamma \quad (2.13)$$

Güç faktörü değeri γ , TFT'lerin aktif tabakalarındaki rekombinasyon mekanizmasına karşılık gelen bir terimdir. Fotoiletim mekanizmasının tipi, γ sabitinin değerine göre belirlenebilir. Şekil 2.16'da rekombinasyon durumlarının şematik gösterimi verilmiştir. $0,5 \leq \gamma \leq 1$ değerlerinde olmasına göre transistörlerin rekombinasyon durumları bimoleküler rekombinasyon ve monomoleküler rekombinasyon ile açıklanabilir [70].



Şekil 2.16. Rekombinasyon durumları a) Bimoleküler rekombinasyon b) Monomoleküler rekombinasyon

Bimoleküler rekombinasyon, ışıkla uyarılma sonucu oluşan yüksek enerjili elektron ve hollerin yüksek yoğunluklu bölgede rekombinasyonu sonucu oluşur. Monomoleküler rekombinasyon ise yarıiletkendeki yük taşıyıcıların, tuzak durumlarında veya yüzey kusurlarında etkileşime girmesi sonucu oluşur. Rekombinasyon durumları fototransistörün performansını etkilemektedir. Bir fototransistör için istenilen durum yüksek hızlı, yüksek ışık hassasiyetli ve düşük rekombinasyon oranına sahip olmasıdır.

$\gamma > 1$ durumunda ise, fotoakım artışı bir süper lineerlik eğilimi gösterir. Bu, fototransistörün ışık yoğunluğundaki bir artışa daha hızlı ve daha güçlü yanıt verdiği anlamına gelir. Fotoakımın bu süper doğrusal davranışı, farklı enerji değerlerine sahip boşluk içi rekombinasyon merkezlerinin varlığına bağlanabilir. Aydınlatma şiddeti arttıkça, quasi Fermi seviyelerindeki kaymalar bu rekombinasyon merkezlerinin doluluk oranını değiştirecek ve rekombinasyon oranı düşerek daha uzun taşıyıcı ömürlerine ve gelişmiş bir süper lineer foto tepkiye yol açacaktır [71–74].

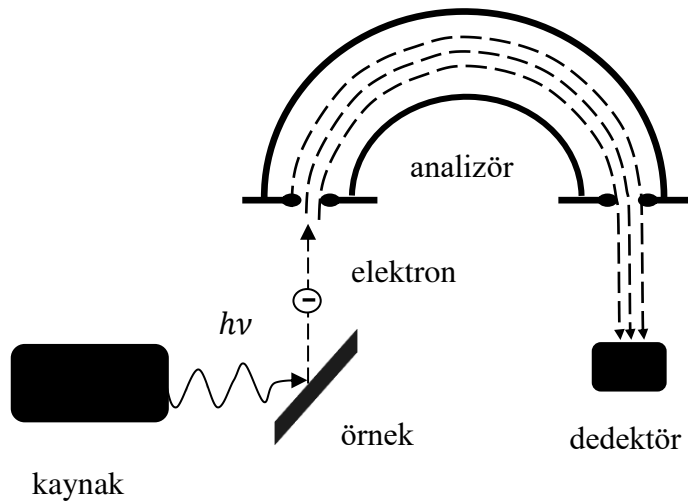
3. KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ

Tez kapsamında üretilen transistörlerin hem aktif tabakasının hem de dielektrik tabakaların karakterizasyon işlemleri için farklı cihazlar ve dolayısıyla farklı yöntemler kullanılmıştır. Kullanılan bu yöntemler aşağıda anlatılmaktadır.

3.1. X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS)

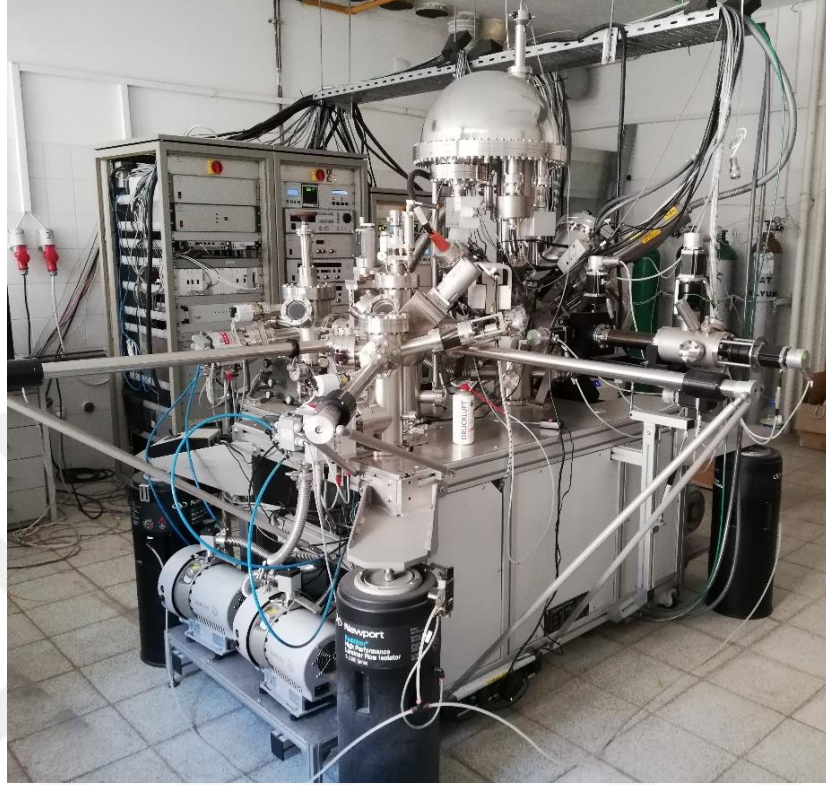
X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS), malzeme yüzeyinde bulunan atomların kimyasal durumunu incelemek için kullanılan bir yüzey analiz tekniğidir. Bu teknik, X-ışını numune yüzeyi ile etkileşime girdiğinde, kopan elektronların kinetik enerjisinin ölçülmesi prensibine dayanır. Elde edilen ölçümler, numune yüzeyindeki atomların türü, kimyasal bağ yapısı ve elektronik durumları hakkında bilgi sağlar.

XPS cihazları yüksek vakum ortamında çalışan, X-ışını kaynağı, analiz odası ve dedektör içeren bir sistemden oluşmaktadır. Şekil 3.1’de XPS cihazının çalışma prensibi şematik olarak gösterilmiştir. Bir malzeme üzerine, monokromatik bir X-ışını kaynağından (Al-K α , Mg-K α gibi) gelen X-ışını demeti, 0-10 nm kalınlığındaki yüzeydeki atom ya da molekülleri uyararak elektronların koparılmasına neden olmaktadır. Koparılan fotoelektronlar, elektronları enerji ve yönlerine göre ayıran yarı küresel bir analizör tarafından algılanmaktadır. Fotoelektronların kinetik enerjileri ölçülerek malzemenin yüzeyindeki atomların kimyasal bileşimi ve elektronik durumu belirlenmektedir.



Şekil 3.1. XPS cihazının çalışma prensibi

Bu çalışmada, SnO₂ aktif tabakasının oksidasyon durumları Görsel 3.1’de görülen FLEXPS SPECS marka XPS cihazı kullanılarak incelenmiştir.



Görsel 3.1. SPECS marka XPS cihazı

Spektrum ölçümünde uyarım kaynağı olarak 1486,6 eV'luk Al anot ve 300 W'ta çalışan monokromatik X-ışını kullanılmıştır. Elementlerin bağlanma enerjilerinin kalibrasyonu ve doğrusallığını sağlamak amacıyla, Sn ve O'nun XPS piklerinin kalibrasyonu için 284,6 eV'deki C1s XPS pik pozisyonundan yararlanılmıştır. Analiz sırasında şarj etkisini azaltmak için şarj nötrleştirici (FG 22/35 tipi) kullanılmıştır. Seçilen tarama parametreleri ile enerji çözünürlüğü 0,2 eV'dir. Ölçüm sırasında 3,5x1 mm²'lik örnek alanı analiz edilmiştir. Spektrometrede ölçüm almadan önce örnekler 3 saat boyunca Hipace 80 turbo pompa ile 1,75x10⁻⁷ mbar'lık vakum altında yükleme odasında bekletilmiştir. Daha sona transfer odasına taşınarak Hipace 300 turbo pompa ile 8x10⁻⁸ mbar'lık vakum ortamında 2 saat boyunca bekletilmiştir. En son örnekler XPS ölçümlerinin alınacağı analiz odasına aktarılmıştır. Bu odanın vakumu 1,9x10⁻⁹ mbar seviyesindedir ve bu vakum seviyesi hem iyon pompa hem de Pfeiffer Hipace 300 turbo pompa ile elde edilmiştir. Elde edilen veriler CasaXPS Versiyon 2.3 yazılımı ile işlenmiştir.

3.2. X-Işını Kırınımı Spektroskopisi (XRD)

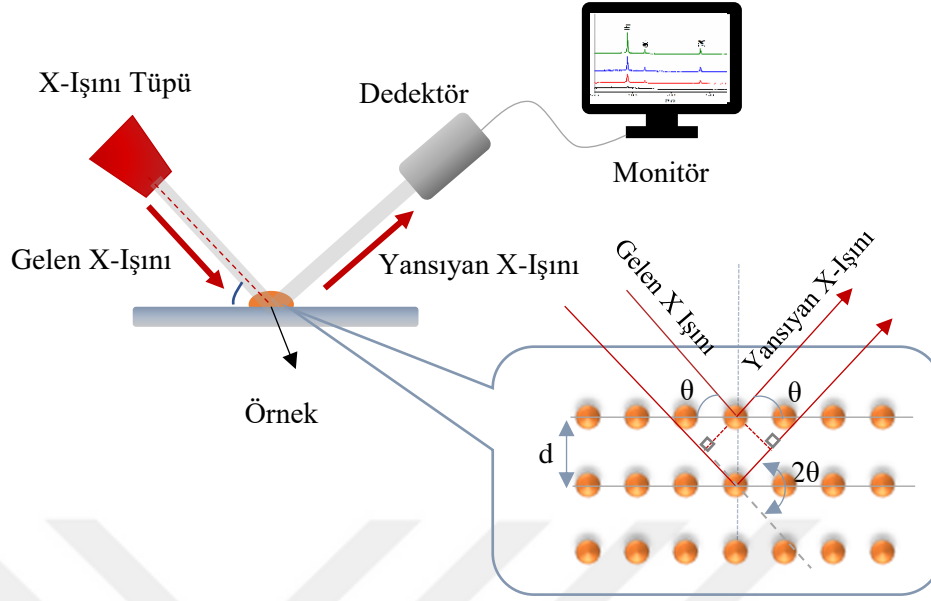
X-ışını kırınımı (XRD), bir malzemenin kristal yapısını incelemek için yaygın olarak kullanılan tahribatsız bir karakterizasyon tekniğidir. Bu teknik, kristallerin X-ışınlarını karakteristik bir şekilde kırma yeteneğine dayanmaktadır ve kristal fazların yapısının hassas bir şekilde incelenmesine olanak tanımaktadır. Kaydedilen kırınım desenleri, bir numunenin çeşitli mikro ve makro yapısal özellikleri ile ilgili bilgi içermektedir. Pik konumu ile kafes parametreleri ile kalitatif faz analizi araştırılabilmektedir. Pik şiddetine dayanarak, kristal yapı hakkında bilgilerin yanı sıra kantitatif faz analizleri de elde edilebilmektedir. Ayrıca pikler, mikro gerilmeler ve kristal boyutları hakkında bilgi vermektedir [75].

Kristal yapı tespiti için gönderilen tek dalga boyuna sahip X-ışınları, çoğunlukla soğurulurken bir kısmı da kırınım ve saçılmaya uğrar. Kristali oluşturan atomların düzenine bağlı olarak, farklı düzlemlerde kırınım olur. Bu düzlemlerden saçılan X-ışınları arasında faz farkları meydana gelir. Faz farkları, X-ışınının dalga boyunun tam katlarına eşit olduğunda, yapıcı girişim gerçekleşir ve kırınım deseni difraksiyon pikleriyle belirginleşir. Eşit olmadığında ise dalgalar arasındaki sönümleme yıkıcı girişime yol açar. Farklı açılarda gerçekleştirilen kırınım, elde edilen spektrumda yapıcı ve yıkıcı girişimlerin kırınım desenini oluşturur.

Şekil 3.2’de bir kristalde X-ışını kırınımı şematik olarak gösterilmiştir. X-ışını demeti bir kristalin yüzeyine düştüğünde o kristaldeki atomların paralel düzlemleri tarafından saçılırlar. Üst düzlemin atomları tarafından saçılan ışın ile ikinci düzlem tarafından saçılan ışın aynı fazdadır. Dalga boyu λ olan X-ışınları, düzlemler arasındaki uzaklığı d olan atom yüzeyine θ açısı ile geldiğinde eğer yansıyan X-ışınları arasındaki yol farkı λ dalga boyunun tam katları ise, yansıyan X-ışınları birleşerek yapıcı girişim oluştururlar. Yansıyan ışınların arasındaki yol farkı $2d\sin\theta$ olur ve Eşitlik 3.1 Bragg Yasası olarak adlandırılır.

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (n = 1,2,3 \dots) \quad (3.1)$$

Burada n yansımanın mertebesini veren bir tamsayıdır.



Şekil 3.2. Bir kristalde X-Işını kırınımı

Bragg yasasına bağlı XRD tekniği ne kadar güçlü olursa olsun, incelenecek malzeme ultra ince filmler gibi küçük hacimli olduğunda zorluklar ortaya çıkar. Bragg geometrisinde gelen ışın açısı o kadar yüksektir ki, X-ışını genellikle üst ultra ince filminden geçerek alt tabakaya ulaşır. Sonuç olarak, kırınım desenleri alt tabakadan kaynaklanan güçlü sinyaller içerir ve üst ince filminden gelen zayıf sinyalleri baskılar, bu da ultra ince filmin analizini zorlaştırır. Bu durumda, etki edilen derinliği azaltmak için çok küçük bir geliş açısının seçildiği grazing incidence konfigürasyonunu (GIXRD) kullanmak daha iyi bir yaklaşım olacaktır.

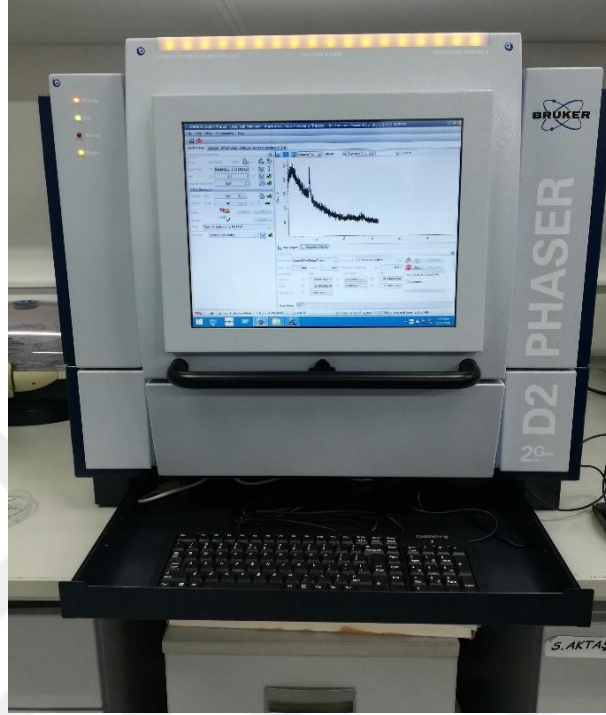
Ortalama kristal boyutları Eşitlik 3.2’de verilen Scherrer denklemi kullanılarak en şiddetli pike göre hesaplanmıştır.

$$D = \frac{0,94\lambda}{\beta \cos \theta_B} \quad (3.2)$$

burada λ kullanılan X-ışınının dalga boyu, β maksimum yarı pik genişliği (FWHM) ve θ_B Bragg kırınım açısıdır.

Bu tez çalışmasında, sol-jel spin kaplama yöntemiyle elde edilen SnO₂ ve HfO₂ filmlerinin yapısal karakterizasyonları Görsel 3.2’de verilen BRUKER D2 Phaser marka ve modelindeki XRD cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. XRD spektrumları, oda sıcaklığında monokromatik CuK α ($\lambda=1,54059\text{\AA}$) ışını kullanılarak $20^\circ \leq 2\theta \leq 60^\circ$ aralığında alınmıştır.

XRD spektrumlarının analizi için DIFFRAC EVA programı kullanılmıştır. Elde edilen verilerin değerlendirilmesinde Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS) kütüphanesindeki veri kartlarından yararlanılmıştır.



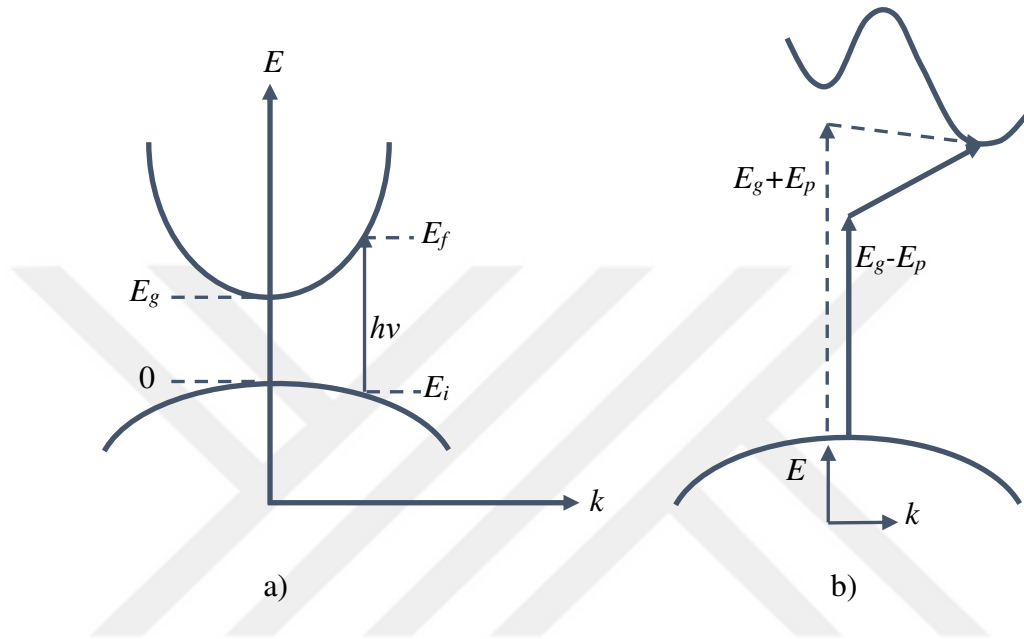
Görsel 3.2. BRUKER D2 Phaser XRD cihazı

3.3. UV-Vis Absorpsiyon Spektroskopisi

Yarıiletkenlerin optik özelliklerini belirlemede en yaygın olarak kullanılan yöntem optik absorpsiyon yöntemidir. Bu yöntem, yarıiletkenin temel durumdaki elektronlarının, gönderilen elektromanyetik dalganın enerjisini absorbe etmesiyle ilgilidir. Elektronlar, yeterli enerjiyi aldıklarında, valans bandından iletim bandına geçerler. Böyle bir geçiş, iletim bandındaki elektron sayısını ve valans bandındaki hollerin sayısını bir artırır; bu nedenle buna elektron-hol çiftinin oluşması denir. Bunun tersi, yani bir elektronun iletim bandından valans bandına geçişinden dolayı enerjinin salınması da meydana gelebilir. Böyle bir geçiş, iletim bandındaki elektronların sayısını ve valans bandındaki hollerin sayısını bir azaltır (elektron-hol çiftinin rekombinasyonu). Oluşum ve rekombinasyon olayları elektromanyetik alandan farklı bir dış etmenden enerji absorpsiyonu veya bu etmene enerji salınımı ile de meydana gelebilir [76].

Kristaldeki titreşimler, izinli bantlardaki elektron ve hollerin uyarılmaları, eksiton oluşumu, valans bandı ile iletim bandı arasındaki yerleşik seviyelerin uyarılmaları gibi

diğer durumlar da absorpsiyon olayının gerçekleşmesine neden olabilir. Bu çeşitli mekanizmalar, yarıiletkenin optik özellikleri üzerinde farklı etkilere yol açar. Her durumda, yarıiletkene gönderilen fotonlar, enerjileriyle elektronları daha yüksek enerji seviyelerine taşır. Bu geçişler, yarıiletkenin optik özellikleri hakkında önemli bilgiler sağlar.



Şekil 3.3. Yarıiletkenlerde a) direkt ve b) indirekt bant geçişleri

Şekil 3.3’de bir yarıiletkenin direkt ve indirekt bant geçişleri şematik olarak gösterilmiştir. Bir yarıiletkende valans bandı maksimumu ve iletim bandı minimumunun her ikisi de aynı k (dalga vektörü) değerinde ise direkt bant geçişi meydana gelir. İletim bandındaki elektronlar, $k=0$ ’daki minimum iletim bandı enerjisine yerleşme eğilimindedir. Benzer şekilde, valans bandındaki holler de en üst valans bandı enerjisinde toplanma eğilimindedir. Bu özelliğe sahip bir yarıiletken Şekil 3.3a’da görüldüğü gibi direkt bant aralığına sahiptir. Şekilde E_i , başlangıç durumdaki enerji seviyesini, E_f son durumdaki enerji seviyesini göstermektedir. İki bant arasındaki izinli geçişler momentumda herhangi bir değişiklik olmaksızın gerçekleşmektedir.

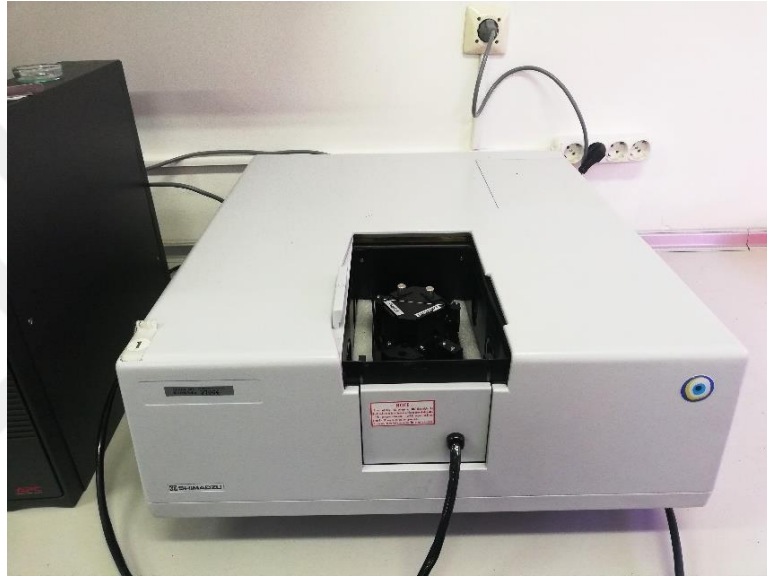
Şekil 3.3b’de görüldüğü gibi maksimum valans bandı enerjisi ve minimum iletim bandı enerjisi aynı k değerinde olmayan bir yarıiletkene indirekt bant aralıklı yarıiletken denir. Elektronlar iletim ve valans bantları arasında bir geçiş yaptığında, enerji korunur fakat momentumun korunumu yasasına da uyulmalıdır. İndirekt bant aralıklı geçişlerde, momentumunun korunması için Şekil 3.3b’de görüldüğü bir fononun emisyonu veya

absorpsiyonunu içeren bir etkileşim gereklidir [33]. Şekilde fononun enerjisi E_p ile ifade edilmiştir.

Direkt bant geçişli bir yarıiletkenin α - $h\nu$ arasındaki bağıntı

$$(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^n \quad (3.3)$$

ile verilir. Burada α absorpsiyon katsayısını, A sabit bir değeri ve $h\nu$ absorbe edilen ışığın enerjisini sembolize eder. n ise sabit olup direkt bant geçişleri için $\frac{1}{2}$ değerini almaktadır.



Görsel 3.3. Shimadzu UV-Visible Spektrofotometre

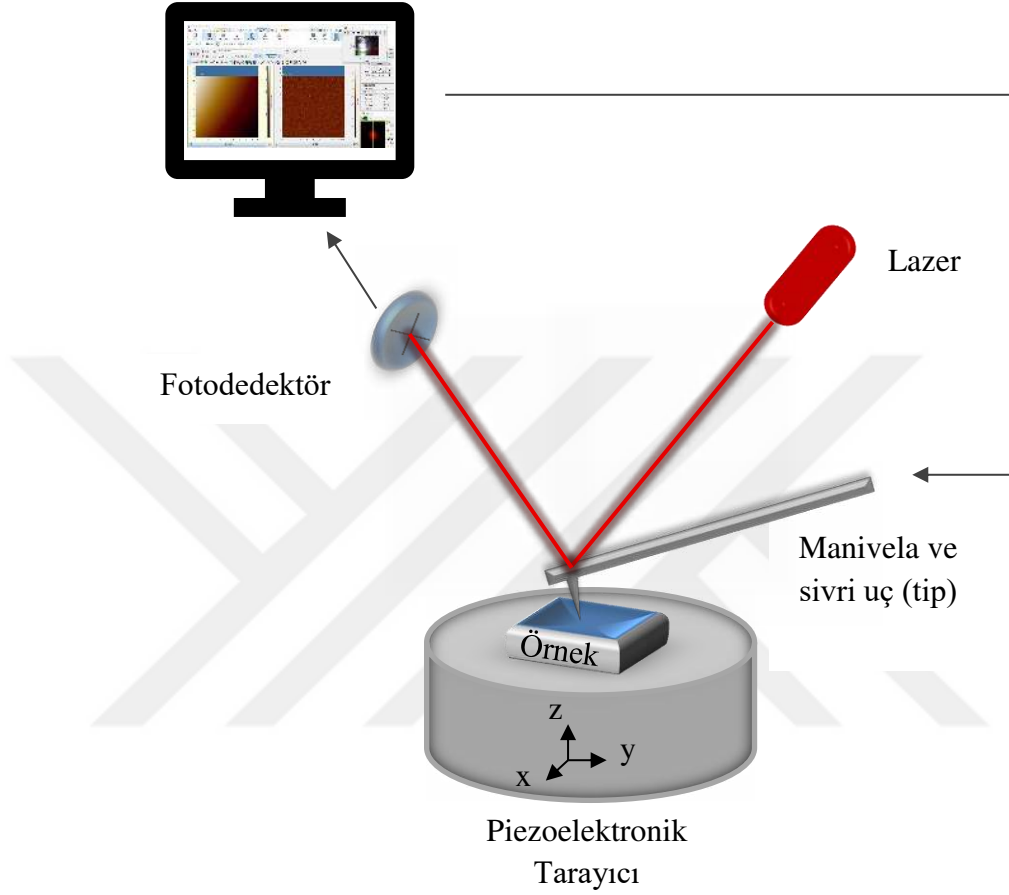
Bu tez çalışmasında, elde edilen SnO_2 filminin optik karakterizasyonları Görsel 3.3’de Schimadzu marka UV 2450 model spektrofotometre kullanılarak yapılmıştır.

3.4. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

Atomik kuvvet mikroskobu (AFM), birbirine yeterince yaklaştırıldığında tip ucu ile numune yüzeyi arasındaki atomik kuvvetten yararlanarak, yüzey topografyasını yüksek çözünürlükte ve atomik ölçekte haritalandırmak için kullanılmaktadır. Hem iletken hem de yalıtkan yüzeyleri inceleyebilmesi ve vakum gerektirmeyen bir sistem olması bu yöntemin en büyük avantajlarındanır.

Şekil 3.4’te AFM’ de görüntü oluşumunun şematik gösterimi verilmiştir. Sivri uç (tip) ile numunenin tipe en yakın atomu arasındaki Van der waals ve Coulomb kuvvetlerinin oluşturduğu çekici ve itici kuvvet, tipin bağlı bulunduğu konsolun

(cantilever) negatif ya da pozitif bükülmesini sağlar. Bu bükülmeler sonucu konuma duyarlı fotodiyot tarafından algılanan lazer ışınındaki değişimlere bağlı olarak yüzeydeki girinti ve çıkıntılar kaydedilerek görüntüler elde edilir.



Şekil 3.4. AFM' de görüntü oluşumunun şematik gösterimi

Tipin yüzeye olan uzaklığı ile etki eden kuvvet arasındaki ilişkiye bağlı olarak AFM, kontak mod, yarı kontak mod veya temassız modda görüntüleme yapar. Atomlar arası itici kuvvetlerin etkin olduğu kontak modunda, tip yüzeye çok yakın olduğu için yüzeye hasar verme riski bulunmaktadır. Yarı kontak modda, atomlar arası itici veya çekici kuvvetler devrededir. Tip ile yüzey arasında belirli bir uzaklık olmasına rağmen titreşim genliğine bağlı olarak tip yüzeye temas edebilir. Temassız modda ise ya itici kuvvetler ya da çekici kuvvetler etkindir. Titreşim genliği daha küçük olduğu için tip yüzeye temas etmez.

Bu çalışmada, SiO_2 , HfO_2 ve SnO_2 yüzeylerinin morfolojik karakterizasyonu için Görsel 3.4'te görülen NT-MDT NANOEDUCATOR II model AFM cihazı

kullanılmıştır. Görüntüler temassız modda alınmıştır. NT-MDT marka yüksek çözünürlüklü yarı kontak ya da temassız modlarda kullanım için tasarlanmış, NSG01 serisine ait 3,4x1,6x0,3 mm boyutlarında, 0,01-0,025 Ω cm dirence sahip n-tipi silisyum tip kullanılmıştır. Ayrıca tip, lazer sinyali artırarak için Altın yansıtıcı yan kaplamaya sahiptir. AFM cihazı akustik ve titreşim izolasyonu için bir kabin içerisinde yer almaktadır.



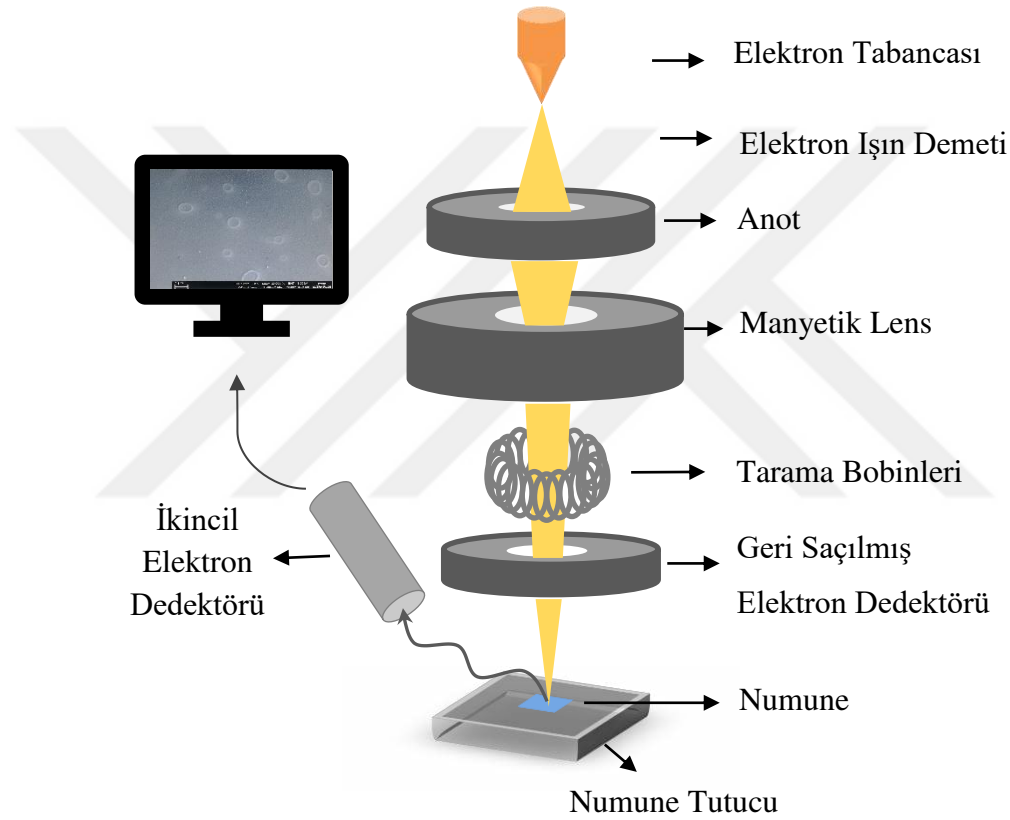
Görsel 3.4. NT-MDT NANOEDUCATOR II model AFM cihazı

3.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), bir elektron demeti ile numune yüzeyini tarayan ve yansıyan elektronları kullanarak yüzeyleri çok yüksek çözünürlükte görüntüleyen bir mikroskoptur. Yüzey morfolojisini incelemek için kullanılmaktadır.

Şekil 3.5'te şematik gösterimi verilen SEM, elektron kaynağı, elektromanyetik lensler, numune hücresi, yüksek gerilim kaynağı, detektörler ve görüntü işleme sistemi gibi bileşenlerden oluşur. Elektron kaynağı olarak kullanılan elektron tabancası, yüksek enerjili elektronlar üreterek bu elektronların anot vasıtasıyla numuneye doğru

hızlanmasını sağlar. Gönderilen elektronlardan ince bir elektron demeti elde edebilmek ve elektron demetini numune üzerine odaklamak için farklı çapta aparatlara sahip objektif mercekleri ile numune yüzeyinin elektron demeti tarafından taranmasını sağlayan tarama bobinleri bulunmaktadır. Elektron demeti ile numunenin etkileşimi sonucu numunenin yüzeyindeki elektronik yapının değişiklikleri, tarama elektronlarının numunedeki atomlarla etkileşimi sonucu oluşan sinyaller ile dedekte edilir. Toplanan sinyaller, mikroskop yazılımı ile işlenerek detaylı görüntüler oluşturulur.



Şekil 3.5. SEM’de görüntü oluşumunun şematik gösterimi

SEM’de, farklı çözünürlüklerde görüntüleme yapabilen, farklı özelliklere sahip dedektörler kullanılmaktadır. Bu dedektörler arasında yüzeyden saçılan elektronları toplayan ikincil elektron dedektörleri (SE), geri saçılan elektron dedektörleri (BSE), nitel ve nicel analiz ile elementlerin dağılım haritalaması yapılmasını sağlayan Enerji Dağılım X-Işını Spektrometresi dedektörü (EDS), elektron ışınlarından yayılan sinyalleri toplayan elektromanyetik bir lens ile entegre edilmiş In-lens dedektörü, 30kV’a kadar geçirimli elektron mikroskobu (TEM) görüntüleri alınmasını sağlayan

Taramalı geçirimli elektron dedektörü (STEM) ve numunenin kristalografik yapısını incelemek için elektron geri saçılma difraksiyon dedektörü (EBSD) bulunmaktadır.

SEM’de katı veya toz numuneler incelenebilir ancak numunelerin iletken olması gerekmektedir. İletken olmayan numunelerin yüzeylerinin ince bir tabaka şeklinde metal ile kaplanması gerekmektedir. SEM’in, yüksek çözünürlük, büyük odaklama aralığı ve veri toplama hızı gibi avantajların yanı sıra vakumlu bir sistem olması, numune hazırlama aşamalarının hassasiyet gerektirmesi ve yüksek maliyet gibi dezavantajlara da sahiptir.



Görsel 3.5. Zeiss Ultraplus marka FESEM cihazı

Bu çalışmada, her iki dielektrik tabaka üzerine kaplanmış SnO₂ filmlerinin yüzey morfolojilerinin belirlenmesi ve HfO₂ dielektrik tabakalarının kalınlık tespiti için Görsel 3.5’te verilen Zeiss Ultraplus marka FESEM (Field Emission Scanning Electron Microscopy) cihazı kullanılmıştır. Kalınlığı belirlenecek numuneler uygun boyutlarda kesildikten sonra SEM numune tutucuya dikey olacak şekilde yerleştirilerek sabitlenmiştir. Elektron kaynağı olarak Field Emission Gun (FEG) kullanılarak, 10⁻⁶ Torr vakum seviyesinde numuneler incelenmiştir.

3.6. Elektriksel Karakterizasyon

Keithley 4200 SCS/CVU yarıiletken karakterizasyon sistemi, transistörler ve diyotlar gibi yarıiletken aygıtların akım-voltaj ($I-V$) ve kapasitans-voltaj ($C-V$) özelliklerini karakterize etmek için kullanılan gelişmiş bir ölçüm sistemidir. Cihazın güç kaynağı üniteleri (SMU), $I-V$ karakterizasyonu için kullanılmaktadır. Akım kaynağı, gerilim kaynağı, direnç ölçümü gibi farklı çalışma modları ile donatılmış her bir SMU, yüksek hassasiyetle akım ve gerilim ölçebilmektedir. 4200-SCS modeli, dört adet SMU birimine sahiptir ve yapılacak ölçümün gerekliliğine bağlı olarak istenilen sayıda SMU birimi kullanılabilir. Cihazın ölçebildiği maksimum voltaj değeri 210 V, maksimum akım değeri ise 100 mA'dır. Kapasitans-voltaj ünitesi (CVU) ise $C-V$ karakterizasyonu için kullanılmaktadır. Bu birim, yarıiletken cihazların kapasitans değişimini, gerilime bağlı olarak yüksek hassasiyetle ölçebilmektedir.

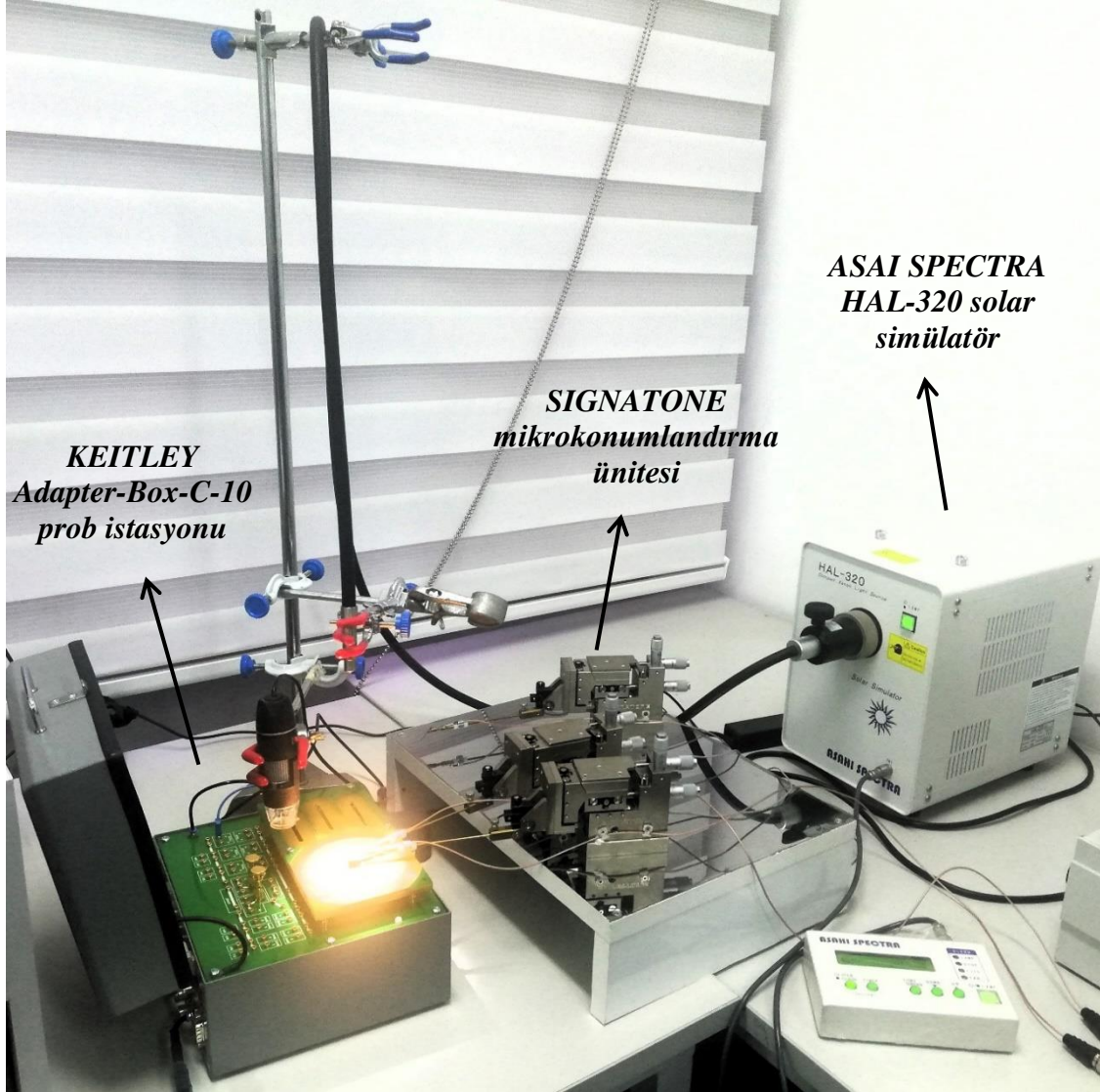
Özellikle nanoteknoloji ve mikroelektronik uygulamalarında, ölçüm cihazları ve aksesuarlarının hassasiyeti büyük bir öneme sahiptir. Keithley 4200 SCS/CVU sisteminde triax (üç katmanlı izoleli) kablolar kullanılmaktadır. Triax kablolar, iç ve dış iletkenler arasında ek bir izolasyon tabakası içererek sinyalleri elektromanyetik alanlar gibi dış etkilere korumaktadır. Bu da ölçümlerin güvenilirliğini artırmaktadır. Yüksek hassasiyetli ölçümlerde, zayıf sinyallerin doğru bir şekilde ölçülmesine yardımcı olmak için ise 2 adet Preamplifier kablo bulunmaktadır. Preamplifier kablolar, akımı pikoamper mertebesinde femtoamper mertebesine yükselterek sinyalleri daha güçlü hale getirmekte ve cihaz tarafından daha hassas şekilde işlenebilmesine olanak tanımaktadır.



Görsel 3.6. KEITHLEY 4200SCS yarıiletken karakterizasyon sistemi

Bu çalışmada TFT'lerin $I-V$ ve $C-V$ ölçümlerinden oluşan elektriksel karakterizasyonları, KEITHLEY marka Adapter-Box-C-10 prob istasyonuna bağlı Görsel 3.6'da verilen KEITHLEY 4200 SCS/CVU yarıiletken karakterizasyon sistemi kullanılarak yapılmıştır. Görsel 3.7'de, ölçümlerde kullanılan SIGNATONE marka yüksek hassasiyetli xyz yönelimli, yaylı klipsli prob ucu bağlantılı prob tutucu ve tungsten prob uçları gösterilmiştir. Tungsten, iyi bir elektriksel iletken olmasının yanı sıra dayanıklı ve aşındırmaya karşı dirençlidir. Bu uçlar, elektriksel temasın güvenilir ve hassas bir şekilde yapılmasını sağlamakta bu da cihazların performansının doğru bir şekilde ölçülmesine yardımcı olmaktadır. Ölçümlerde. Keithley tarafından sunulan, sistem ile etkileşimde bulunarak ölçümleri yapılandırma ve ölçüm sonuçlarını grafiksel olarak görüntüleme imkânı sağlayan Keithley Interactive Test Environment (KITE) yazılımı kullanılmıştır. TFT'lerin fotoduyarlılık ve fototepki ölçümleri, Görsel 3.7'de verilen, 350-1100 nm dalga boyunda 300 W gücünde Xenon lambaya bağlı ASAI

SPECTRA marka HAL-320 model fiber optik solar simülatör kullanılarak 30 ile 100 mW/cm² arasında değişen ışık şiddetleri altında incelenmiştir.



Görsel 3.7. SIGNATONE marka mikrokonumlandırma ünitesi ve ASAI SPECTRA marka HAL-320 model solar simülatör

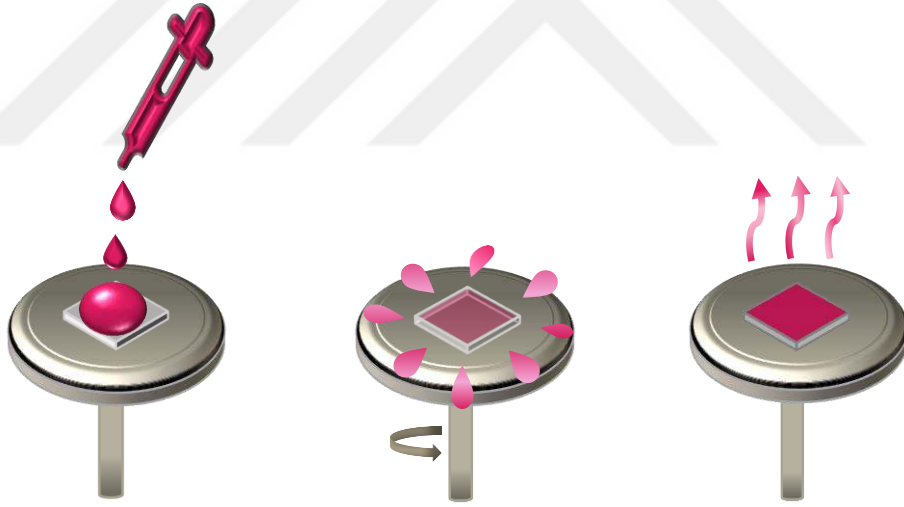
4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Sol-Jel Spin Kaplama Yöntemi

Kimyasal bir proses olan sol-jel yöntemi, başlangıç malzemesi olarak kullanılan çözelti yani solün jelleştirilmesi ve çözücülerin uzaklaştırılması ile katı bir malzeme hazırlanması esasına dayanır. Kaplamalar bir alt tabaka (alttaş) üzerine “sol”ün daldırma (dip coating), damlatma (drop casting) veya döndürerek (spin coating) kaplama teknikleri ile gerçekleştirilir.

Bu tekniklerden daldırarak kaplama işlemi, hazırlanan çözeltiye alttaşın sabit bir hızla daldırılması ve aynı hızla çıkarılarak kurutulması esasına dayanmaktadır. Bir diğer yöntem olan damlatarak kaplama yöntemi, çözeltinin alttaş üzerine damlatılması sonucu yayılması ve ısıtılarak kurutulması prensibine dayanmaktadır.

Sol-jel spin kaplama yöntemi ise; Şekil 4.1’de görüldüğü gibi damlatma, döndürme ve buharlaştırma olmak üzere 3 aşamada gerçekleştirilir.



Şekil 4.1. Sol-jel spin kaplama yöntemi

Döndürerek kaplama tekniğinin ilk aşaması çözeltinin alttaşla damlatılmasıdır. Bu işlem dinamik ve statik olmak üzere iki şekilde uygulanmaktadır. Statik yöntemde dönecek olan yüzeye vakumla sabitlenmiş olan alttaş üzerine, mikropipet kullanılarak belirli miktarda çözelti damlatılır. Damlatılacak çözelti miktarı alttaşın büyüklüğü ile orantılı olarak değişir. Daha sonra çözeltinin homojen olarak alttaşla kaplaması için alttaş, belirlenen sürede belirli bir hızla döndürülür. Merkezci kuvvetin etkisiyle çözeltinin fazla olan kısmı alttaş üzerinden atılırken, kalan kısım çözeltinin

viskozitesine ve yüzey gerilimine bağı olarak yüzeyde birikir. Dinamik yöntemde ise çözelti dönmekte olan alttaş üzerine damlatılır. Bu yöntemde numune yüzeyinde biriken çözelti miktarı statik yönleme göre daha azdır. Alttaşın ısıtılma işlemi tabi tutulması ile çözücüler buharlaştırılarak uzaklaştırılırken, istenilen malzeme katı film olarak yüzeyde kalır. İstenilen film kalınlığına ulaşmada döndürme hızı, süresi ve çözelti viskozitesi gibi temel parametreler büyük önem taşımaktadır.

Kalınlığı nanometre ile mikrometre arasında değişen ince filmlerin, hızlı ve kolayca biriktirilmesine olanak sağlayan sol-jel spin kaplama yönteminin, vakumlu bir sisteme göre ekonomik olması, kimyasal reaksiyonların kinetik kontrolünü sağlayarak malzemenin yapısal özelliklerini değiştirilebilir hale getirmesi ve çok sayıda işlem değişkenine sahip olması yöntemin tercih edilmesini sağlamaktadır. Malzemenin özellikleri, çözeltinin pH'sı, konsantrasyonu, yaşlandırılması, çözücü ve polimerin doğası, ısıtılma işlemi ve işlem sırasında eklenen diğer katkı maddeleri gibi çeşitli işlem parametreleri ile kontrol edilebilir. Ancak kullanılan kimyasal çeşitlerine göre sağlığa zararlı olabilmesi, alttaş üzerine uygulanan sol hacminin az miktarı alttaş üzerinde kalırken, büyük bir kısmının döndürme işlemi sırasında saçılması gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlarla birlikte, kurutulduktan sonra ürün büzülebilmekte yani hızlı veya dengesiz kurutma ile istenmeyen çatlaklar veya homojen olmayan yapılar oluşturabilmektedir. Bunun yanı sıra, öncüllerinin farklı reaksiyonları nedeniyle, çözelti oluşumu sırasında belirli oksitlerin çökmesi mümkündür ve hidroksil gruplarının veya gözenekliliğin kontrol edilmesi zordur. Kimyasal süreçlerin veya malzeme üretiminin optimize edilmesi, bu tür zorlukların üstesinden gelmede önemlidir. Yine de sol-jel yöntemi, özellikle nano malzemeler, optik malzemeler, katalizörler ve biyomalzemeler gibi birçok farklı alanda başarıyla kullanılmaktadır. Sonuç olarak, sol-jel yöntemi ile çalışırken bu zorluklar ve kontrol gereklilikleri göz önünde bulundurulmalıdır. İyi bir kontrol, istenen malzeme özelliklerinin elde edilmesine yardımcı olabilir ve bu yöntemin birçok farklı uygulamada başarıyla kullanılmasını sağlayabilir. Bu çalışmada ince film transistörlerin fabrikasyonunda bu yöntem kullanılmıştır. Oluşturulan tabakaların film kalınlıkları ve yüzey morfolojilerinin kontrolü, cihaz performansını doğrudan etkilediği için büyük önem taşımaktadır.

4.2. SnO₂-TFT'lerin Fabrikasyonu

Bu tez çalışmasında, TC/BG konfigürasyonunda TFT'lerin fabrikasyonu yapılmıştır. Dielektrik tabaka olarak n-Si/SiO₂ ve p-Si/HfO₂, yarıiletken aktif tabaka olarak SnO₂ kullanılmıştır. İlk seride dielektrik tabaka olarak, ticari olarak satın alınmış farklı kalınlıklarda SiO₂'ler, diğer seride ise sol-jel spin kaplama yöntemiyle üretilmiş farklı kalınlıklarda HfO₂'ler kullanılmıştır. Tüm TFT'lerin SnO₂ yarıiletken aktif tabakaları sol-jel spin kaplama yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Son olarak finger geometrisinde drain source metal kontakları metal buharlaştırma sisteminde oluşturulmuştur.

4.2.1. n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'lerin fabrikasyonu

n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'lerin üretiminde öz direnci $5 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$ olan n-Si (100) alttaşlar üzerine termal buharlaştırma yöntemiyle oluşturulmuş 100 nm, 150 nm, 200 nm, 250 nm ve 300 nm kalınlıklarda SiO₂ dielektrik tabakaları kullanılmıştır. Bu SiO₂ dielektrik tabaka kaplı alttaşlara, SnO₂ aktif tabaka kaplanmadan önce kimyasal bir temizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde, alttaşlar sırasıyla aseton, etanol ve deiyonize su ile 15'er dakika ultrasonik banyoda temizlenmiş ve daha sonra azot gazı ile kurutulmuştur.

TFT'lerin SnO₂ yarıiletken aktif tabakaları sol-jel spin kaplama yöntemi ile elde edilmiştir. Bunun için 0,03 M çözelti, Kalay II klorür dihidratın (SnCl₂.2H₂O) (%98 saflıkta, ChemSolute marka) çözünen, etanolün (C₂H₅OH) ($\geq$ %99,8 saflıkta, Honeywell marka) çözücü olarak kullanılması ile hazırlanmıştır. Çözelti, oda sıcaklığında 2 saat boyunca manyetik karıştırıcıyla açık havada karıştırılmıştır. Daha sonra Görsel 4.1'de verilen Laurell marka WS-650MZ-23NPP/A1/AR1 model spin kaplama cihazı kullanılarak, n-Si/SiO₂ alttaşların üzerine statik yöntem ile 3000 rpm'de 50 saniye döndürülerek kaplanmıştır.



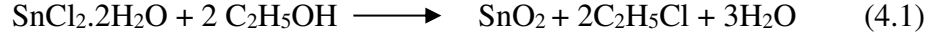
Görsel 4.1. Laurell marka spin kaplama cihazı

Her kattaki kaplama işlemi sonucunda filmler, 0-1100 °C aralığında çalışma sıcaklığına sahip Görsel 4.2’de görseli bulunan Protherm marka PTF 12/38/450 model tüp fırında 150 °C’de 10 dakika kurutulmuş ve bu işlem 5 kez tekrarlanmıştır. Son aşamada filmler 500 °C’de 1 saat tavlانarak transistörün yarıiletken aktif tabakasını oluşturan SnO₂ ince filmleri elde edilmiştir.



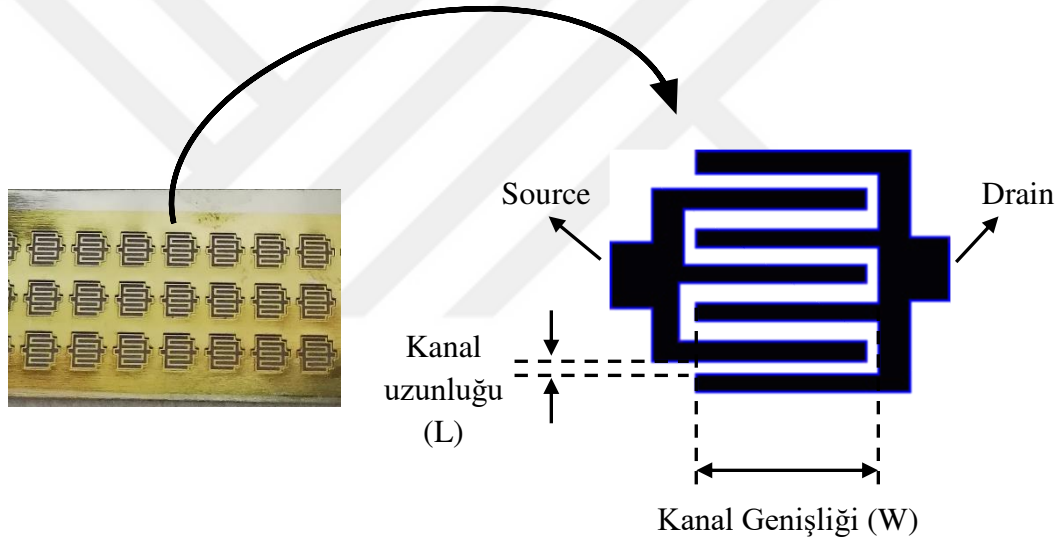
Görsel 4.2. Protherm marka PTF 12/38/450 model tüp fırın

SnO₂ oluşumunun kimyasal reaksiyonu aşağıda verilmiştir.



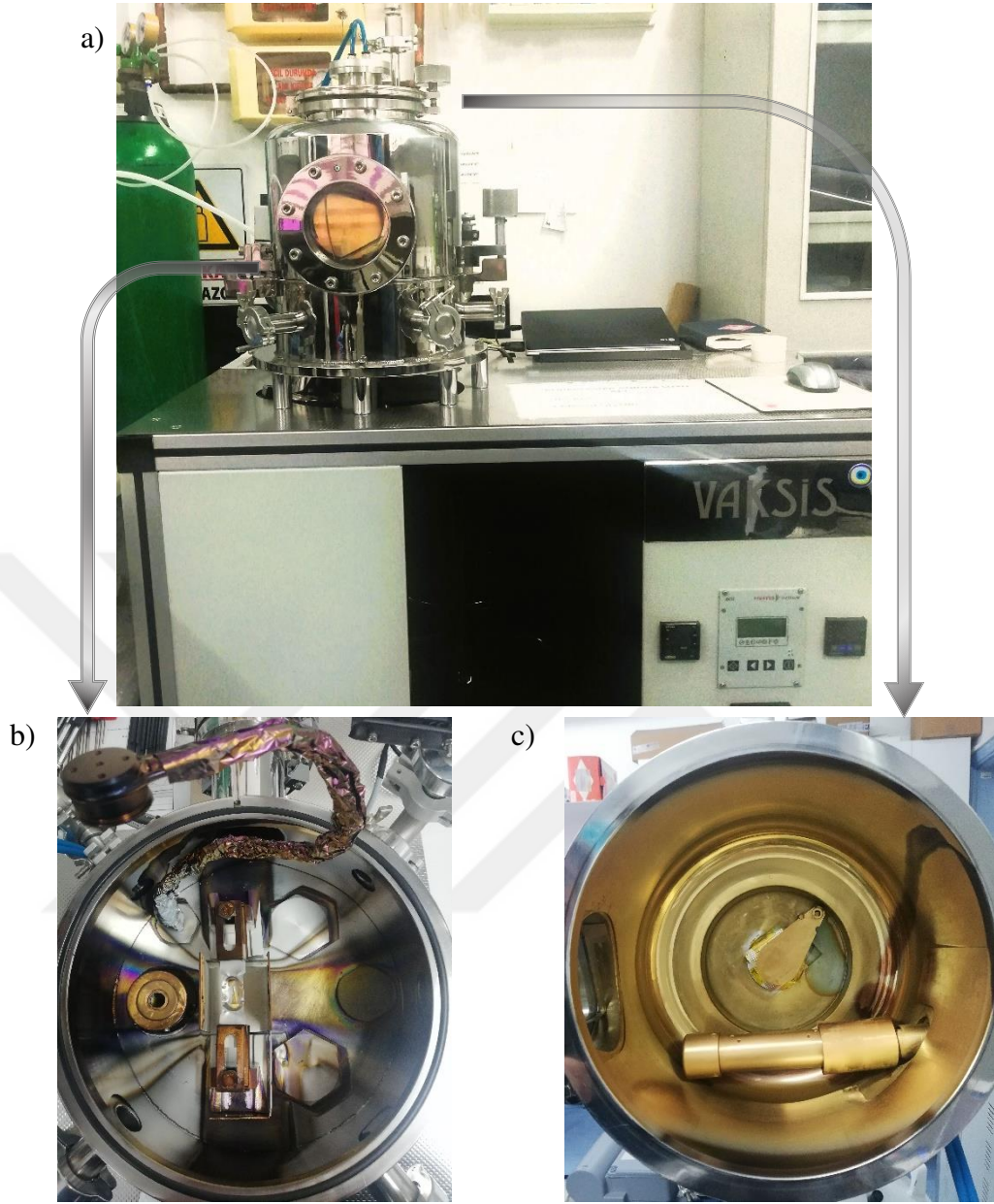
Bu reaksiyondan da görüldüğü gibi SnCl₂·2H₂O ve C₂H₅OH'un karıştırılması ile SnCl₂·2H₂O etanolle tepkimeye girmekte ve sonuçta SnO₂ oluşurken, aynı zamanda C₂H₅Cl (etil klorür) ve H₂O (su) da açığa çıkmaktadır. İnce filmlerin ısıtma işlem görmesi sonucunda alkol ve su buharlaşmakta ve SnO₂ ince filmleri oluşmaktadır.

TFT'lerin drain ve source kontaklarının oluşturulması için interdigitated-finger (iç içe geçmiş parmak) geometrisine sahip shadow (gölge) maskeler kullanılmıştır. Bu maskelerin görseli Görsel 4.3'te verilmektedir. Maskelerin kanal genişliği ve kanal uzunluğu sırasıyla 1000 µm ve 100 µm'dir.



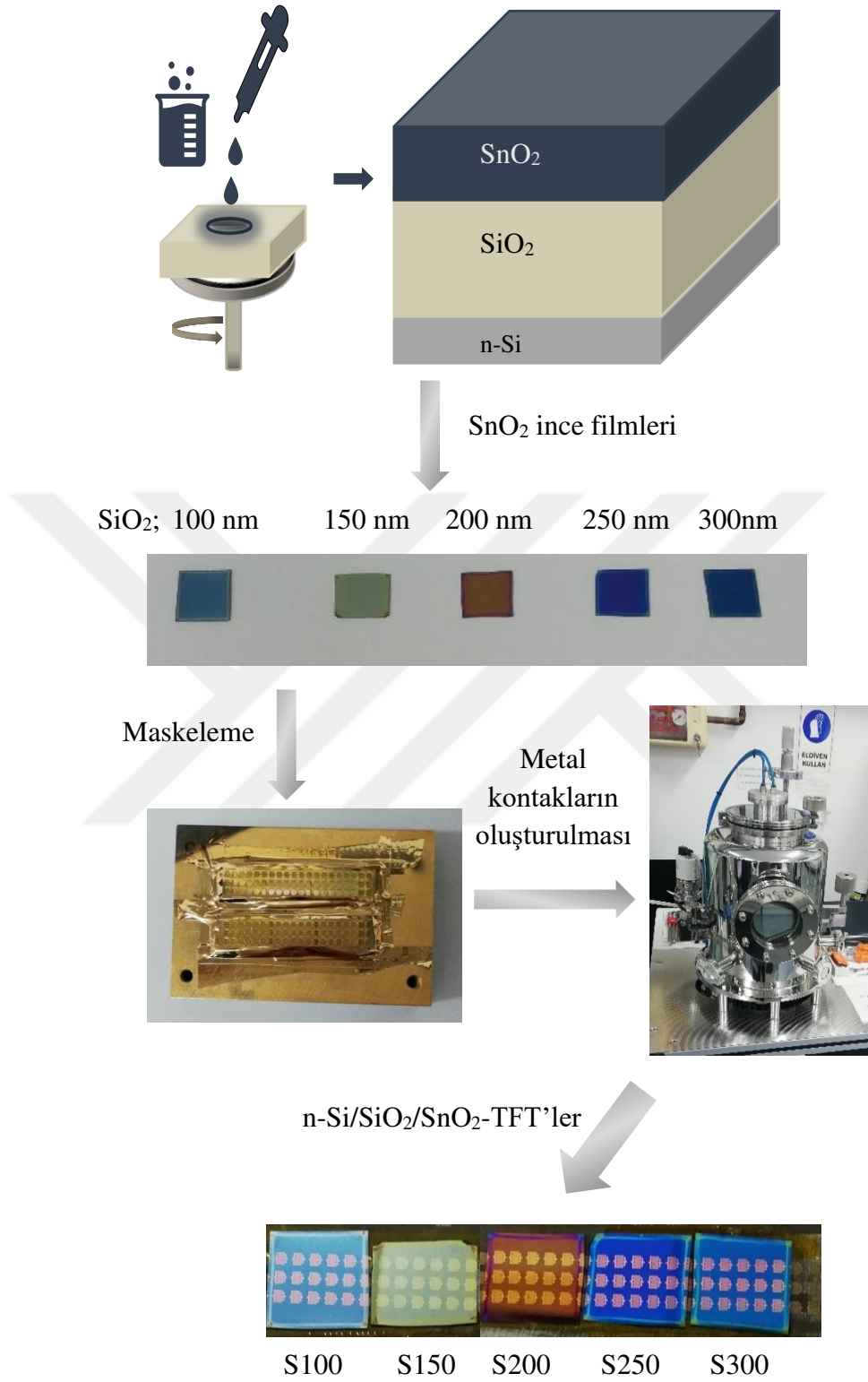
Görsel 4.3. TFT'lerin üst kontaktları için kullanılan shadow maskeler

120 nm kalınlığındaki metal kontaklar, SnO₂ aktif tabakası üzerine yüksek saflıkta altının (Au), ~5x10⁻⁵ Torr basınçta tungsten kaşık kullanılarak, yüksek akımda (110 A) Görsel 4.4'te gösterilen VAKSIS PVD Handy-MT/101T vakumda metal buharlaştırma sistemi ile buharlaştırılmıştır. Buharlaştırma sistemini oluşturan temel bileşenlerden metal buharlaştırma kaynağı, kalınlık okuyucu ve numune tutucu Görsel 4.4b ve c'de görülmektedir.



Görsel 4.4. a) VAKSIS PVD Handy-MT/101T marka metal buharlaştırma sistemi b) metal buharlaştırma kaynağı ve kalınlık okuyucu c) numune tutucu

Filmlerin arka yüzeyleri dremel ile fiziksel olarak temizlendikten sonra 1/10 oranında seyreltilmiş HF çözeltisi ile kimyasal olarak temizlenmiş, ardından ultra saf su ile silinerek yüksek saflıkta azot gazı ile kurutulmuştur. Daha sonra yoğunluğu $1,63 \text{ g/cm}^3$, katı faz içeriği ise %57,5 ile %59 aralığında değişen fırçalı G 3692 Acheson Silver DAG 1415 marka gümüş pasta ile gate kontağı oluşturulmuştur. İlk seride üretilen transistörler sırasıyla dielektrik tabakanın kalınlığına bağlı olarak S100, S150, S200, S250 ve S300 olarak adlandırılmıştır. SiO_2 dielektrik tabakalı SnO_2 TFT'lerin üretim süreci Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. *n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'lerin üretim süreci*

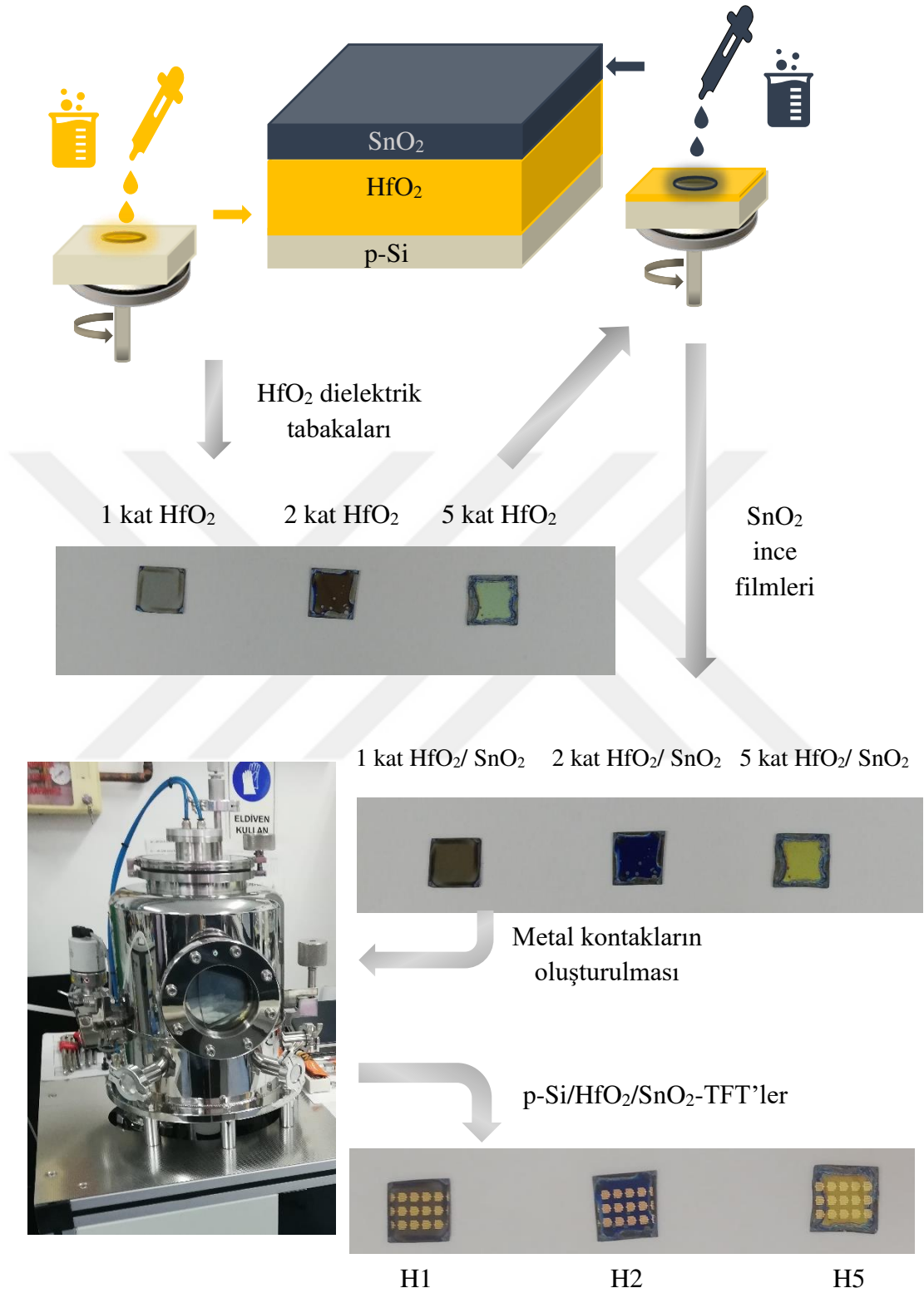
4.2.2. p-Si/HfO₂/SnO₂-TFT'lerin fabrikasyonu

HfO₂ dielektrik tabakasına sahip TFT'ler tek kristal bor katkılı p-Si alttaşlar üzerine oluşturulmuştur. Kullanılan p-Si'ler (100) yönelimine ve 1-10 Ωcm öz direncine sahiptir.

HfO₂ dielektrik tabaka oluşturulmadan önce p-Si'lerin arka yüzeyine ohmik kontak oluşturmak için Alüminyum (Al) metali vakumda buharlaştırılmış ve azot (N₂) atmosferinde 3 dakika boyunca 570 °C'de tavlınmıştır. HfO₂ dielektrik tabaka oluşturulmadan önce üst yüzey 1/10 oranındaki HF çözeltisi ile temizlenmiş, ardından ultra saf su ile durulanmıştır. Daha sonra yüksek saflıkta azot gazı ile kurutularak kaplamaya hazır hale getirilmiştir.

Çözünen olarak Hafniyum (IV) klorür (HfCl₄), çözücü olarak etanol (C₂H₅OH) kullanılarak 0,2 M'lık çözelti hazırlanmıştır. Çözelti homojen hale geldikten sonra üzerine 0,1 M nitrik asit ve deiyonize su ilave edilerek, azot (N₂) ortamında 50 °C'de 2 saat karıştırılmıştır. Daha sonra çözelti, 0,22 µm şırınga ucu filtre ile süzölmüştür. Kaplamadan hemen önce, p-Si alttaşlar Harrick Scientific marka plazma temizleyicide argon plazma ortamında temizlenmiştir. Temizlenen alttaşlar üzerine hazırlanan çözeltiler damlatılarak 3000 rpm döndürme hızında 30 sn döndürülerek kaplanmıştır. 1 kat, 2 kat ve 5 kat kaplama yapılarak, 3 farklı kalınlıkta elde edilen HfO₂ filmleri her kaplamadan sonra, çözücü ve organik kalıntıları gidermek için 150 °C'de 5 dakika süreyle fırında kurutulmuş, son aşamada ise kül fırında 600 °C'de 1 saat süreyle tavlınmıştır. TFT'lerin yarıiletken tabakaları, farklı dielektrik tabaka kalınlıklarına sahip Al/p-Si/HfO₂ alttaşların, sol-jel spin kaplama yöntemiyle SnO₂ ince filmleri ile kaplanması, Bölüm 4.1'de anlatılan şekilde oluşturulmuştur.

Al/p-Si/HfO₂/SnO₂-TFT'lerin, 130 nm kalınlığındaki Au drain-source elektrotları, sırasıyla 1000 mikron ve 100 mikron kanal genişliği ve kanal uzunluğuna sahip maskeler kullanılarak ~10⁻⁵ Torr basınçta PVD sisteminde, termal buharlaştırma yöntemiyle oluşturulmuştur. Üretilen transistörler sırasıyla H1, H2 ve H5 olarak adlandırılmıştır. HfO₂ dielektrik tabakalı SnO₂-TFT'lerin üretim süreci Şekil 4.3'te verilmiştir. TFT'lerin dielektrik tabaka kalınlıkları SEM'den alınan görüntülerden H1, H2 ve H5-TFT'ler için sırasıyla 29 nm, 56 nm ve 136 nm olarak belirlenmiş, görüntüler Bölüm 5.4.5'te verilmiştir.



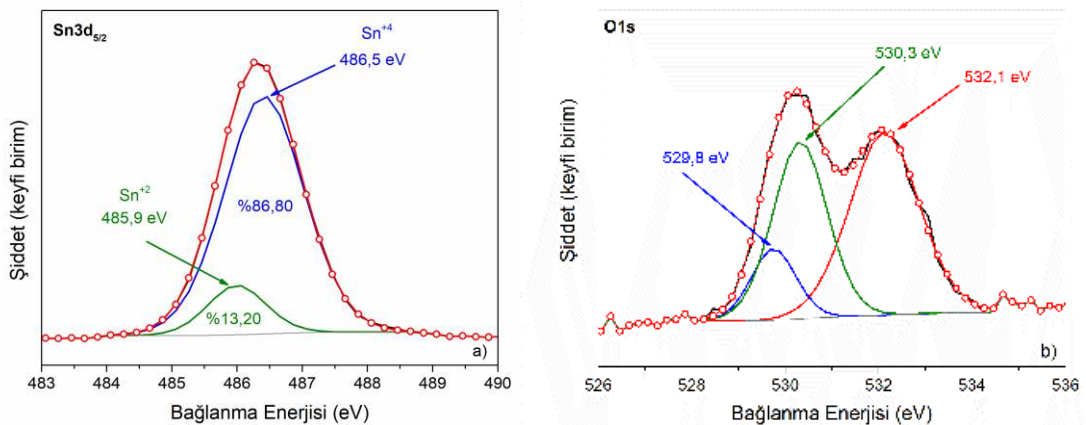
Şekil 4.3. $p\text{-Si}/\text{HfO}_2/\text{SnO}_2\text{-TFT}$ 'lerin üretim süreci

5. YAPISAL, OPTİK VE MORFOLOJİK KARAKTERİZASYONLAR

Yarıiletken aktif tabaka olarak kullanılan SnO_2 ince filmlerini oluşturan elementlerin oksidasyon durumlarını belirlemek için XPS yöntemi kullanılmıştır. SnO_2 ince filmlerinin $\%T$ oranını ve optik bant aralığını belirlemek amacıyla geçirgenlik ve absorpsiyon ölçümleri alınmıştır. SnO_2 ve HfO_2 tabakalarının yapısal analizi XRD ile yapılmıştır. SnO_2 ince filmleriyle kaplamadan önce SiO_2 ve HfO_2 dielektrik tabakalarının ve kaplama sonrası SnO_2 yarıiletken tabakalarının yüzey morfolojisi AFM ile incelenmiştir. Ayrıca SnO_2 yarıiletken tabakalarının yüzey morfolojisi SEM analizleriyle de incelenmiştir. HfO_2 dielektrik tabakalarının kalınlıkları SEM ile belirlenmiş, içeriğindeki elementlerin analizi EDS dedektörü ile yapılmıştır.

5.1. SnO_2 İnce Filminin XPS Analizi

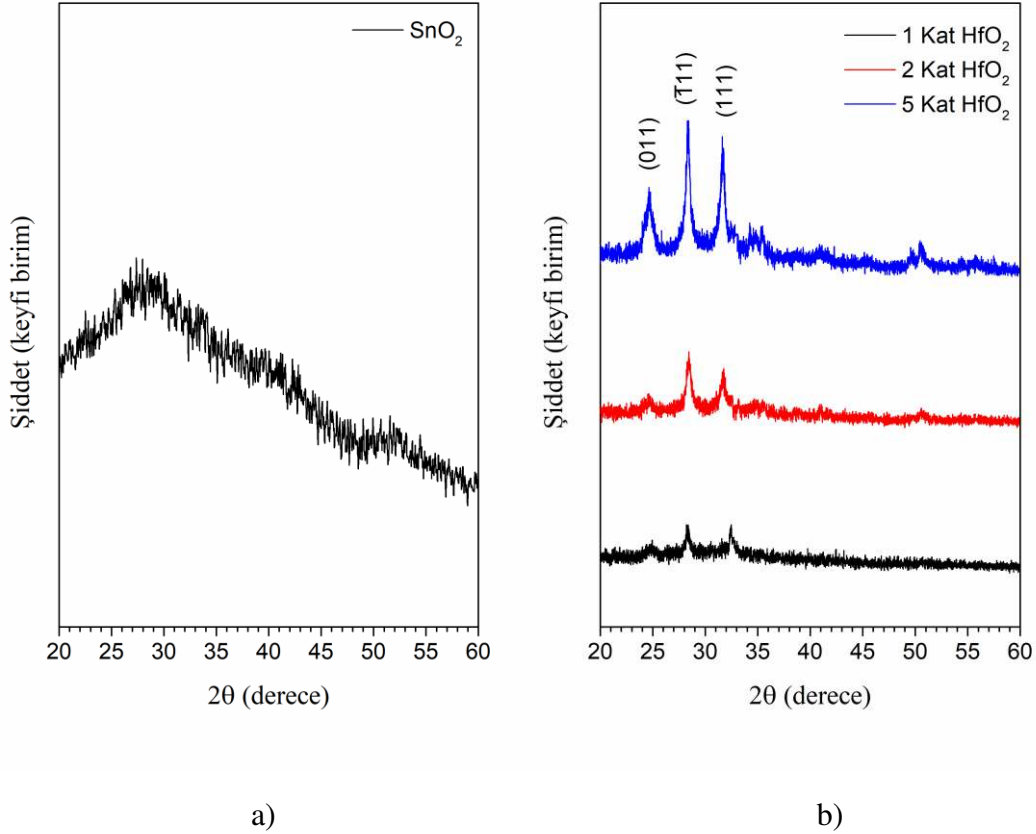
SnO_2 filmlerinde, Sn ve O'nun oksidasyon durumlarını belirlemek için XPS analizi yapılmıştır. 284,6 eV'deki C1s pikine göre kalibre edildikten sonra O1s ve $\text{Sn}3d_{5/2}$ için elde edilen spektrumlar Şekil 5.1'de verilmiştir. $\text{Sn}3d$ enerji seviyesi için Şekil 5.1a'da gözlemlenen Gaussian dağılımları, sırasıyla %13,20 ve %86,80 ile Sn^{+2} ve Sn^{+4} oksidasyon durumlarının varlığını doğrulamaktadır. Bu nedenle, her iki oksidasyon durumunun varlığı SnO ve SnO_2 fazlarının bir arada var olduğunu ve SnO_2 fazının baskın olduğunu göstermektedir. Şekil 5.1b'de O1s'e ait bağlanma enerjisinin Gaussian dağılımlarına bağlı olarak 529,8 eV, 530,3 eV ve 532,1 eV değerlerinde üç farklı bağlanma enerjisi görülmektedir. 529,8 eV ve 530,3 eV'deki pikler sırasıyla O- Sn^{+2} ve O- Sn^{+4} e atfedilmektedir. Bağlanma enerjisi 532,1 eV olan üçüncü bileşen, yüzeydeki kimyasal olarak absorbe edilmiş oksijen atomlarına atfedilebilir [77,78].



Şekil 5.1. SnO_2 ince film yüzeyindeki a) $\text{Sn}3d_{5/2}$ ve b) O1s için XPS spektrumları

5.2. SnO₂ ve HfO₂ Tabakalarının XRD Analizi

SnO₂ aktif tabakasının ve HfO₂ dielektrik tabakalarının XRD spektrumları Şekil 5.2’de verilmiştir. SnO₂ filmi, kalınlığının ve molaritesinin düşük olması nedeniyle Şekil 5.2a’de görüldüğü gibi amorf yapıya sahiptir.

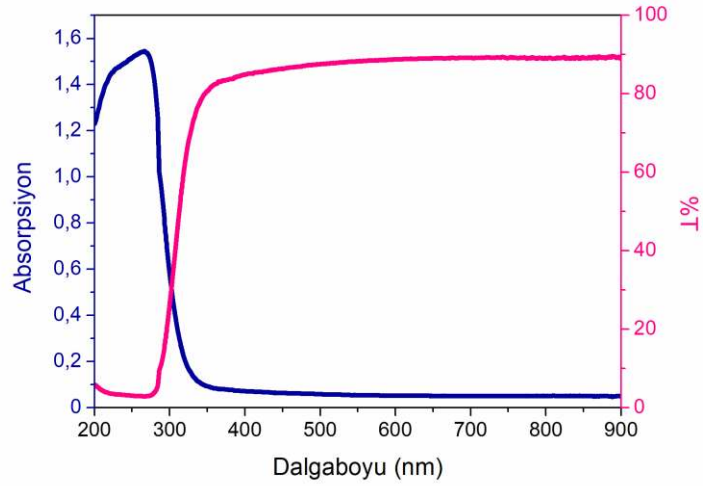


Şekil 5.2. a) SnO₂, b) HfO₂ filmlerinin XRD spektrumları

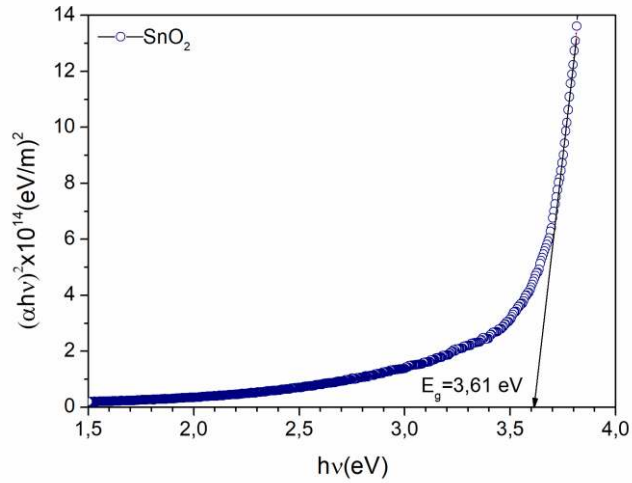
1 kat, 2 kat ve 5 kat HfO₂ filmlerine ait X-ışını kırınım desenleri ile ilgili piklere ait miller indisleri Şekil 5.2b’de belirtilmiştir. HfO₂ filmlerinin (001), ($\bar{1}11$) ve (111) düzlemlerine karşılık gelen piklere sahip olması, filmlerin polikristal yapıya sahip olduğunu göstermektedir. XRD spektrumundaki tüm pikler HfO₂ monoklinik yapıya aittir (JCPDS card No: 06-0318). Şekil 5.2b’de görüldüğü gibi kalınlıktaki artışla birlikte kristal yapıda iyileşme gözlenmiştir. 5 kat HfO₂ filmine ait piklerin diğerlerine göre şiddetlerinin büyük ve genişliklerinin dar olması kristallenmenin daha iyi olduğu anlamına gelmektedir. 1 kat, 2 kat ve 5 kat HfO₂ filmlerine ait kristal boyutları, Scherrer denklemi kullanılarak sırasıyla 20 nm, 21 nm ve 26 nm olarak hesaplanmıştır. HfO₂ filmlerinde kristal boyutu kalınlığın artmasıyla artış göstermiştir.

5.3. SnO₂ İnce Filminin Optik Özellikleri

Cam alttaş üzerine elde edilen SnO₂ filminin görünür geçirgenlik (%T) ve absorpsiyon spektrumları analiz edilerek, filmin ortalama %T ve E_g değeri belirlenmiştir. Şekil 5.3'te SnO₂ filminin %T ve absorpsiyon spektrumu verilmiştir. Spektrum incelendiğinde SnO₂ filminin görünür bölgede ortalama %88 geçirgenliğe sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 5.3. SnO₂ filminin absorpsiyon ve %T spektrumları



Şekil 5.4. SnO₂ filminin $h\nu-(\alpha h\nu)^2$ grafiği

Yarıiletkenin bant aralığının belirlenmesinde optik absorpsiyon yöntemi kullanılmıştır. Şekil 5.4'te SnO₂ filminin $h\nu-(\alpha h\nu)^2$ grafiği verilmiştir. Elde edilen

grafiklinin lineer kısmının $h\nu$ eksenini kestiği noktaya karşılık gelen enerji değerinden optik bant aralığı 3,61 eV olarak bulunmuştur ve bu değer literatürle uyumludur [79,80].

5.4. SEM ve AFM Analizleri

n-Si/SiO₂ dielektrik tabakalarının, sol-jel spin kaplama yöntemi ile elde edilen p-Si/HfO₂ dielektrik tabakalarının ve SnO₂ yarıiletken aktif tabakalarının yüzey morfolojisi AFM ile analiz edilmiştir.

Dielektrik tabakaların yüzey görüntülerinin alınması için üzerinin iletken tabaka ile kaplanması gerektiği ve bu mümkün olmadığı için tüm TFT'lerin sadece SnO₂ yarıiletken aktif tabakalarının yüzey görüntüleri SEM ile incelenmiştir.

Ayrıca HfO₂ dielektrik tabakalarının kalınlıkları SEM'den alınan görüntüler ile belirlenmiş, içeriğindeki elementlerin analizi ise SEM cihazına entegre EDS dedektörü ile yapılmıştır.

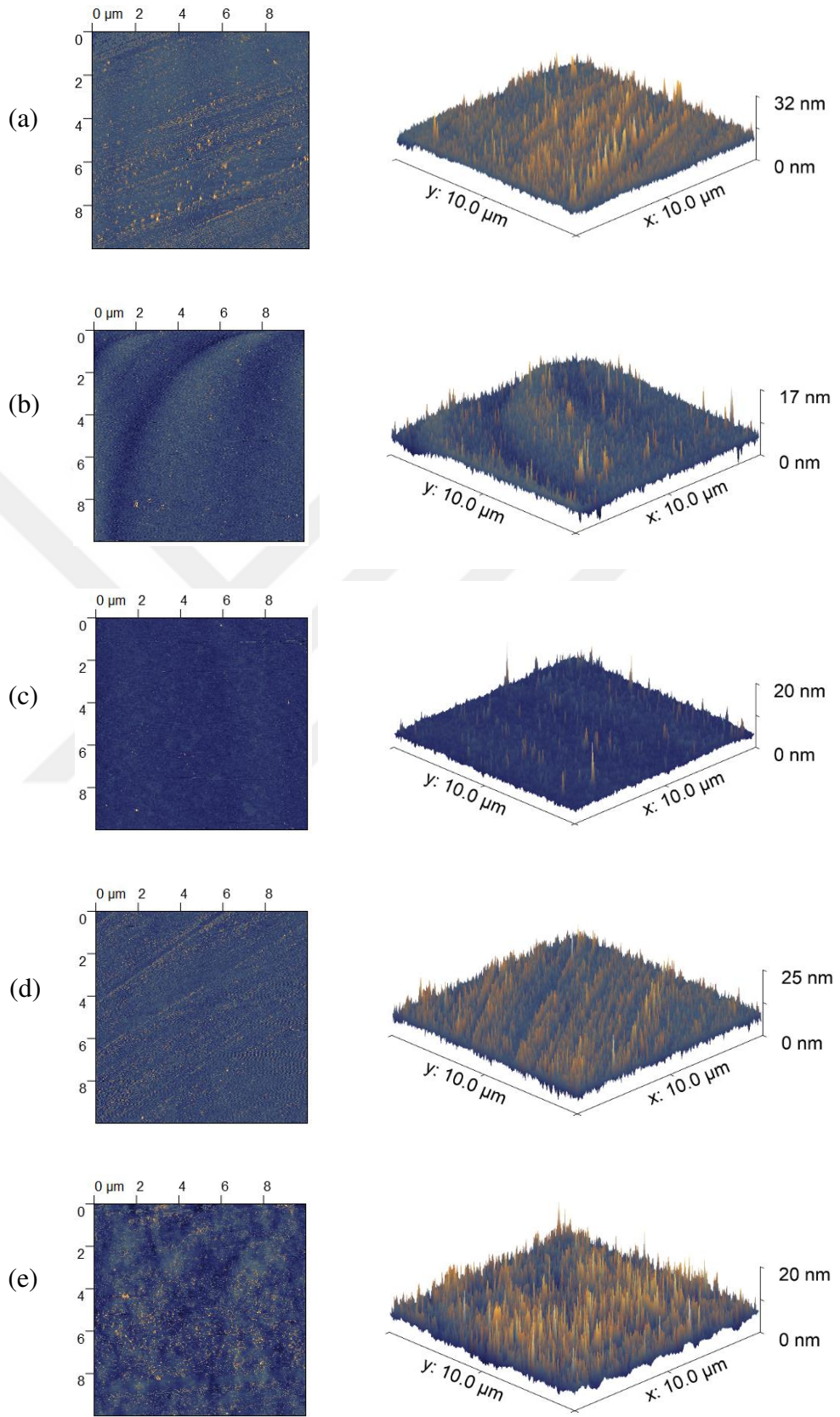
5.4.1. SiO₂ ve SiO₂/SnO₂ yüzeylerinin AFM analizi

SiO₂ yüzeylerinin 2 boyutlu (2D) ve 3 boyutlu (3D) AFM görüntüleri Şekil 5.5'te verilmiştir. SiO₂ yüzeylerinin AFM görüntülerinin alınmasının temel nedeni üzerine kaplanan SnO₂ yüzeylerindeki kusurlarda etkisini gözlemlemektir. SiO₂ tabakalarının yüzey pürüzlülük değerleri (rms) Tablo 5.1'de verilmiştir. Yüzeyler homojen olup, rms değerleri 0,69 nm ile 1,99 nm arasında değişmektedir.

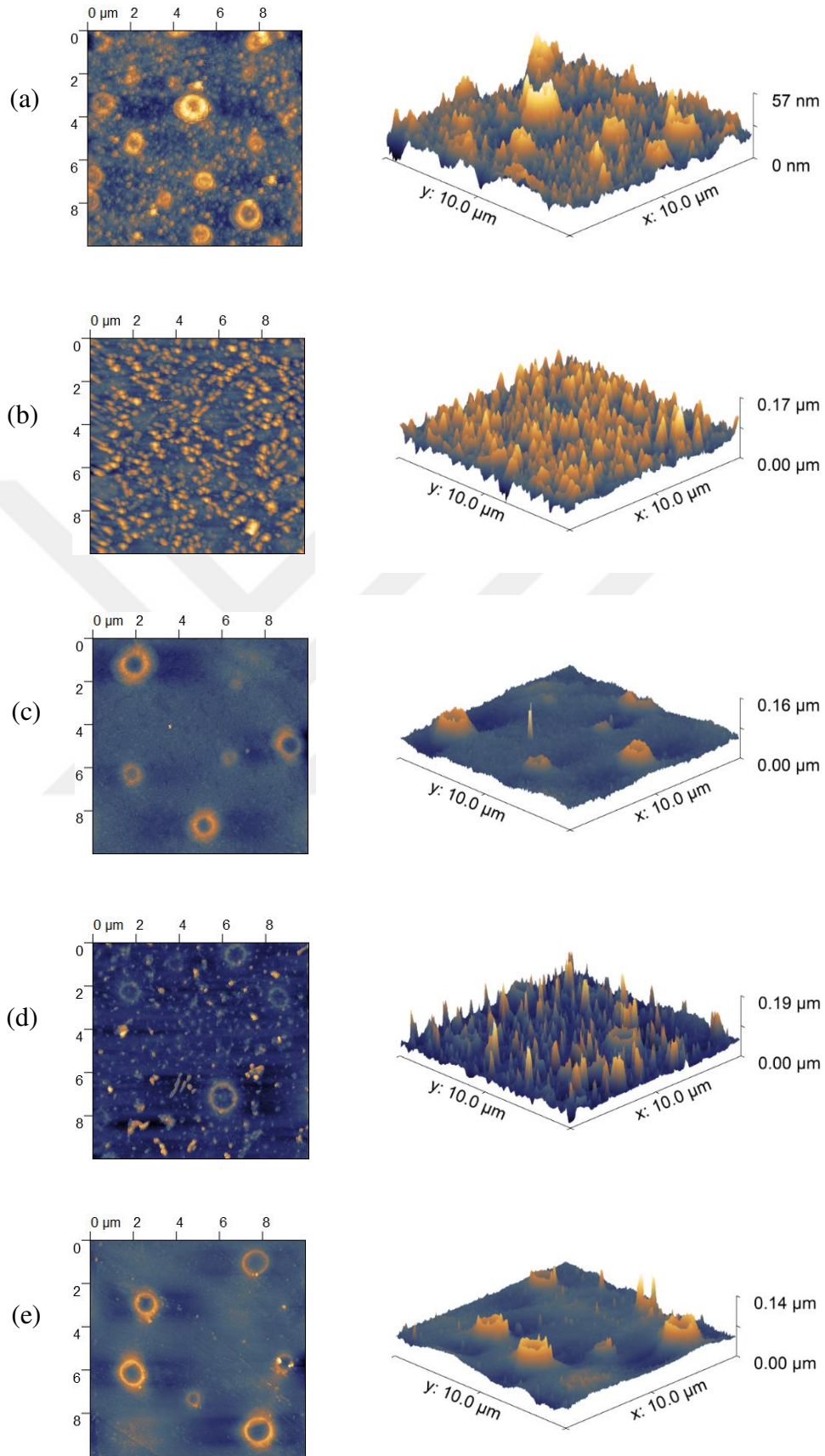
SiO₂ üzerine, sol-gel spin kaplama yöntemiyle oluşturulmuş SnO₂ aktif tabakalarının AFM analizinden elde edilen 2D ve 3D görüntüleri Şekil 5.6'da verilmiştir. SnO₂ tabakalarının rms değerleri de Tablo 5.1'de verilmiştir. Yüzeylerin rms değerleri 6,5-19 nm arasında değişmektedir. S150 numunesi dışındaki tüm yüzeylerde volkan şeklindeki boşluklar görülürken, en homojen yüzeyin S150 numunesine ait olduğu görülmektedir. Yüzeyde gözlenen bu morfolojik yapı, çalışmamızda kullandığımız sol-jel yöntemi ile biriktirilen ince filmlerde görülebilen bir durum olup, literatürde benzer örnekleri bulunmaktadır [81–83]. Yüzeydeki bu etki, biriktirme işlemi sırasındaki sıcaklıktan, çözeltinin konsantrasyonundan veya hızlı çözücü buharlaşması nedeniyle çözeltinin viskozitesinin artmasından kaynaklanmaktadır. En homojen yüzeye sahip olan S150-TFT, SiO₂ dielektrik tabakalı TFT'ler arasında en iyi elektriksel performansı göstermiştir.

Tablo 5.1. SiO_2 ve $\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$ yüzeylerinin rms değerleri

SiO_2	<i>rms (nm)</i>	$\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$	<i>rms (nm)</i>
100 nm SiO_2	1,99	100 nm $\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$	06,59
150 nm SiO_2	1,04	150 nm $\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$	19,05
200 nm SiO_2	0,69	200 nm $\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$	09,57
250 nm SiO_2	1,70	250 nm $\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$	17,05
300 nm SiO_2	1,82	300 nm $\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$	10,35



Şekil 5.5. Farklı kalınlıklardaki SiO₂ dielektrik tabakalarının AFM görüntüleri a) 100 nm, b) 150 nm, c) 200 nm, d) 250 nm, e) 300 nm (Sol taraf 2D, sağ taraf 3D)



Şekil 5.6. Farklı kalınlıklardaki a) 100 nm, b) 150 nm, c) 200 nm, d) 250 nm, e) 300 nm SiO₂ üzerine kaplanmış SnO₂ yarıiletken tabakalarının AFM görüntüleri (Sol taraf 2D, sağ taraf 3D)

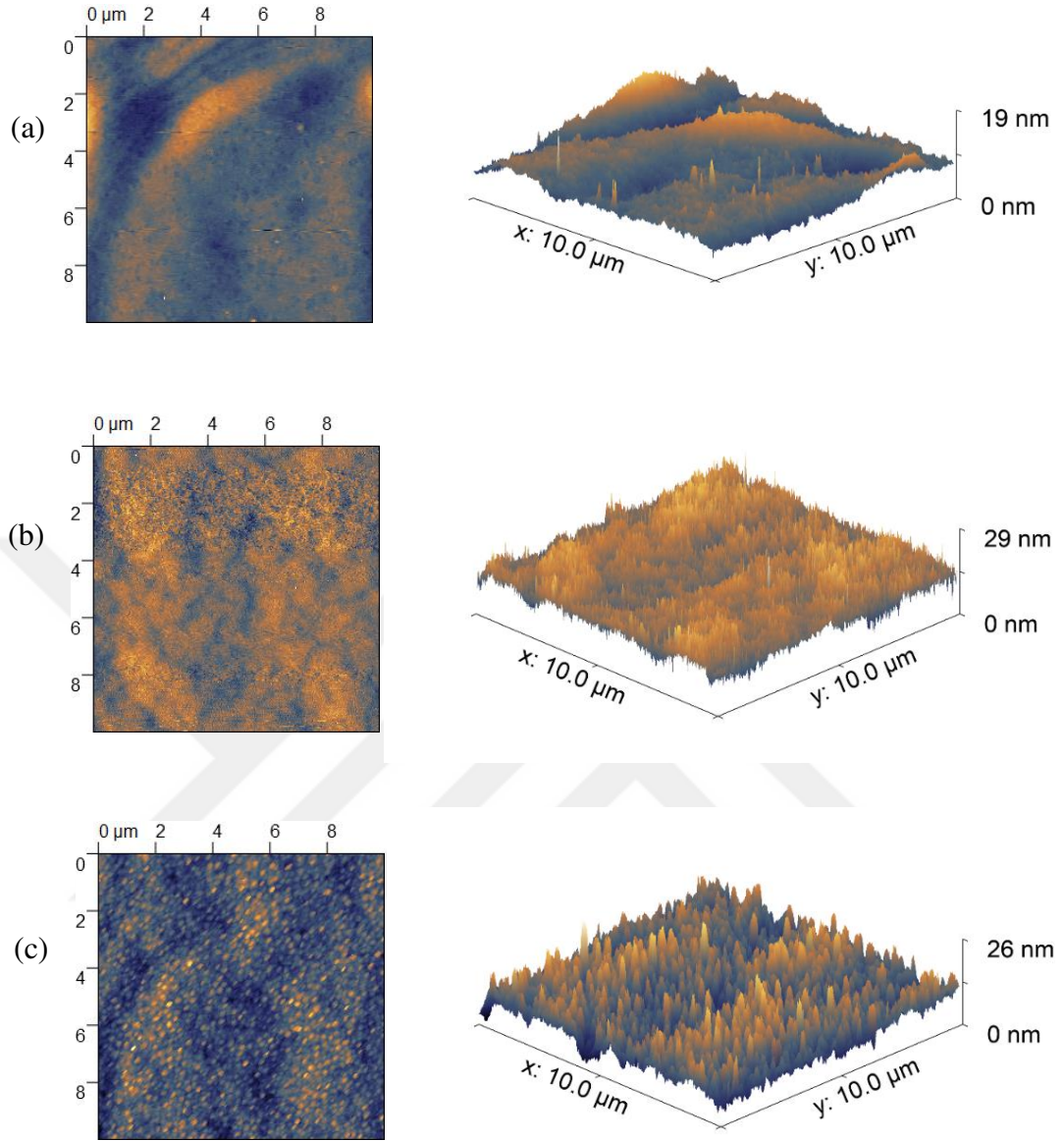
5.4.2. HfO₂ ve HfO₂/SnO₂ yüzeylerinin AFM analizi

p-Si üzerine, sol-jel spin kaplama yöntemiyle oluşturulmuş 3 farklı kalınlıktaki HfO₂ dielektrik tabaka yüzeylerinin AFM analizinden elde edilen 2 boyutlu ve 3 boyutlu görüntüleri Şekil 5.7’de verilmiştir. Homojen yüzey özelliklerine sahip olan HfO₂ tabakalarının rms değerleri Tablo 5.2’de verilmiştir. Kalınlık artışı ile birlikte rms değerleri 1,50 nm’den 2,63 nm’ye artış göstermiştir.

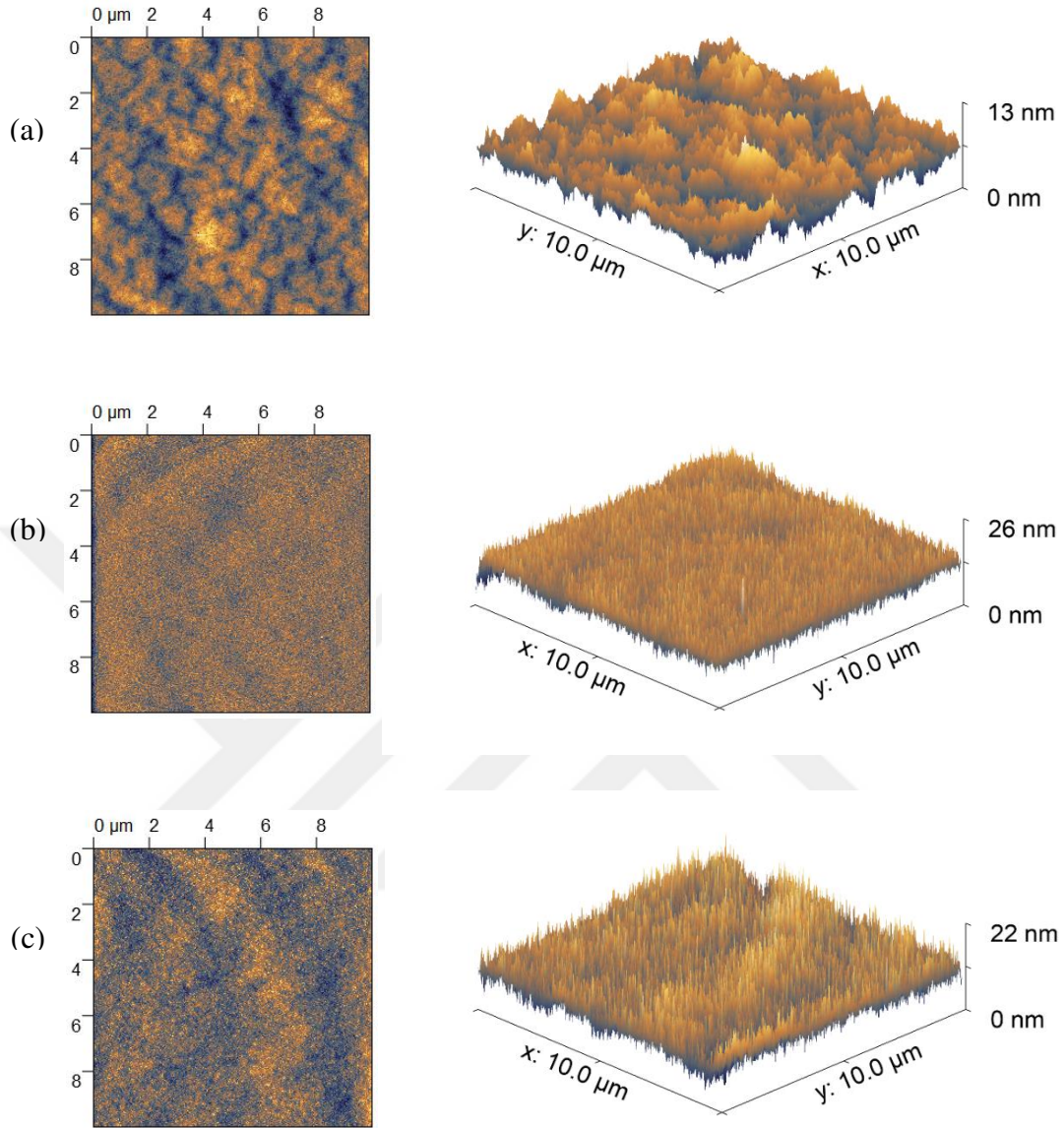
HfO₂ dielektrik tabakalarının üzeri sol-jel spin kaplama yöntemiyle SnO₂ ile kaplandıktan sonra oluşan yüzeylerin AFM görüntüleri Şekil 5.8’te, rms değerleri de Tablo 5.2’de verilmiştir. SnO₂’nin kaplanmasıyla rms değerleri HfO₂ yüzeyleri ile benzer özellik göstererek 1,38 nm’den 2,47 nm’ye artmıştır. Yüzey morfolojisi, TFT’lerin elektriksel performansını etkilemiş, rms değerlerindeki bu artış TFT’lerin mobilite değerlerinde azalmaya neden olmuştur.

Tablo 5.2. HfO₂ ve HfO₂/SnO₂ yüzeylerinin rms değerleri

<i>HfO₂</i>	<i>rms (nm)</i>	<i>HfO₂/SnO₂</i>	<i>rms (nm)</i>
1 kat HfO ₂	1,50	1 kat HfO ₂ /SnO ₂	1,38
2 kat HfO ₂	2,47	2 kat HfO ₂ /SnO ₂	2,25
5 kat HfO ₂	2,63	5 kat HfO ₂ /SnO ₂	2,47



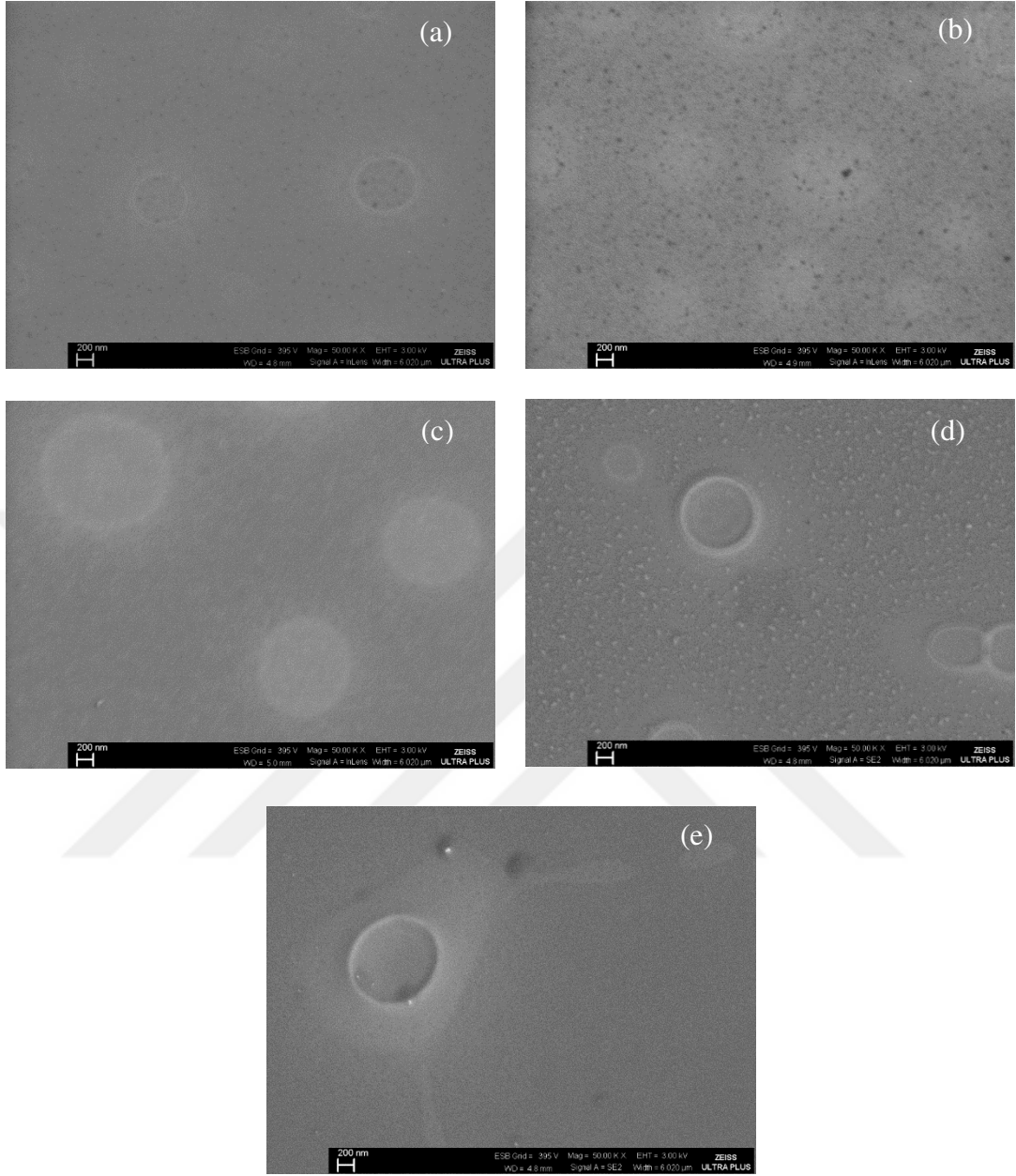
Şekil 5.7. Farklı kalınlıklardaki a) 1 kat, b) 2 kat, c) 5 kat HfO_2 dielektrik tabakalarının AFM görüntüleri (Sol taraf 2D, sağ taraf 3D)



Şekil 5.8. Farklı kalınlıklardaki a) 1 kat, b) 2 kat, c) 5 kat HfO_2 üzerine kaplanmış SnO_2 yarıiletken tabakalarının AFM görüntüleri (Sol taraf 2D, sağ taraf 3D)

5.4.3. $\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$ yarıiletken tabakalarının SEM analizi

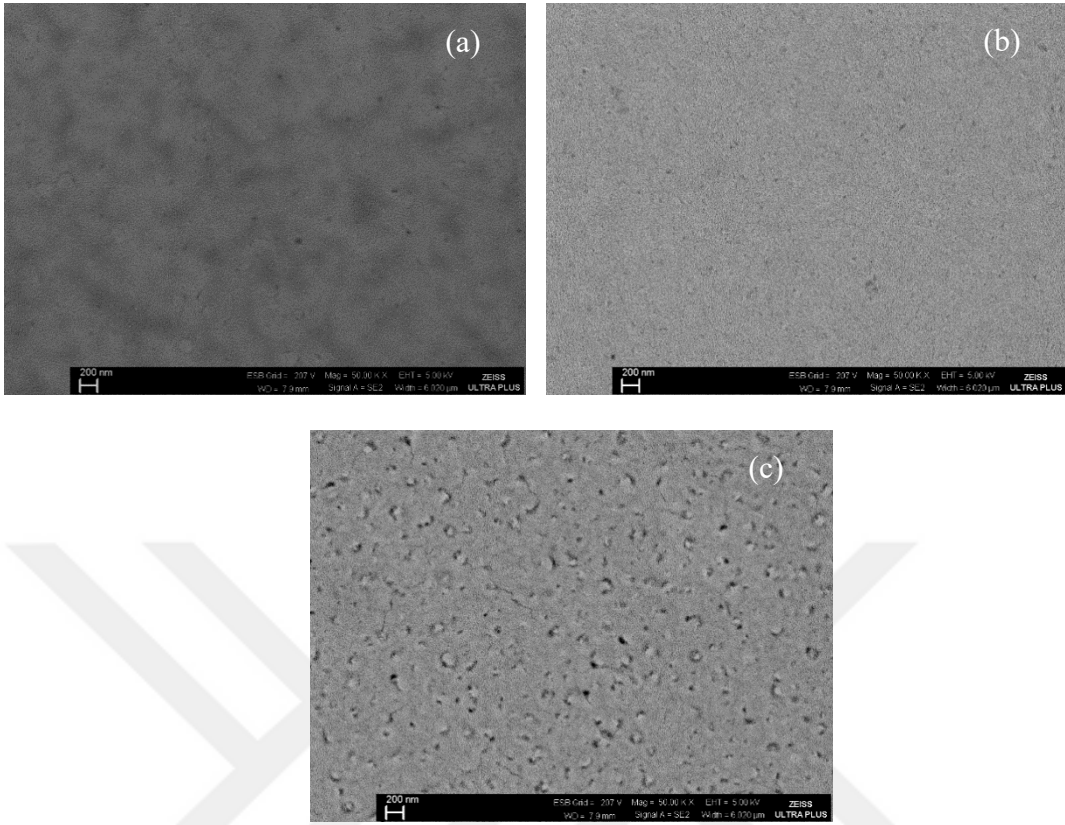
SiO_2 dielektrik tabakalarının üzerine kaplanmış olan SnO_2 yarıiletken tabakalarının 50k büyütmede alınan SEM görüntüleri Şekil 5.9'da verilmiştir. S150 dışındaki tüm yüzeylerde 400-600 nm çapında volkan şeklindeki boşluklar net şekilde görülürken, en homojen yüzeyin S150 numunesine ait olduğu görülmektedir. SEM'den alınan görüntülerden elde edilen sonuçlar AFM görüntülerinden alınan sonuçlar ile uyum içersindedir.



Şekil 5.9. a) 100 nm, b) 150 nm, c) 200 nm, d) 250 nm, e) 300 nm SiO_2 dielektrik tabakalarının üzerine kaplanmış SnO_2 yarıiletken tabakalarının SEM görüntüleri

5.4.4. $\text{HfO}_2/\text{SnO}_2$ yarıiletken tabakalarının SEM analizi

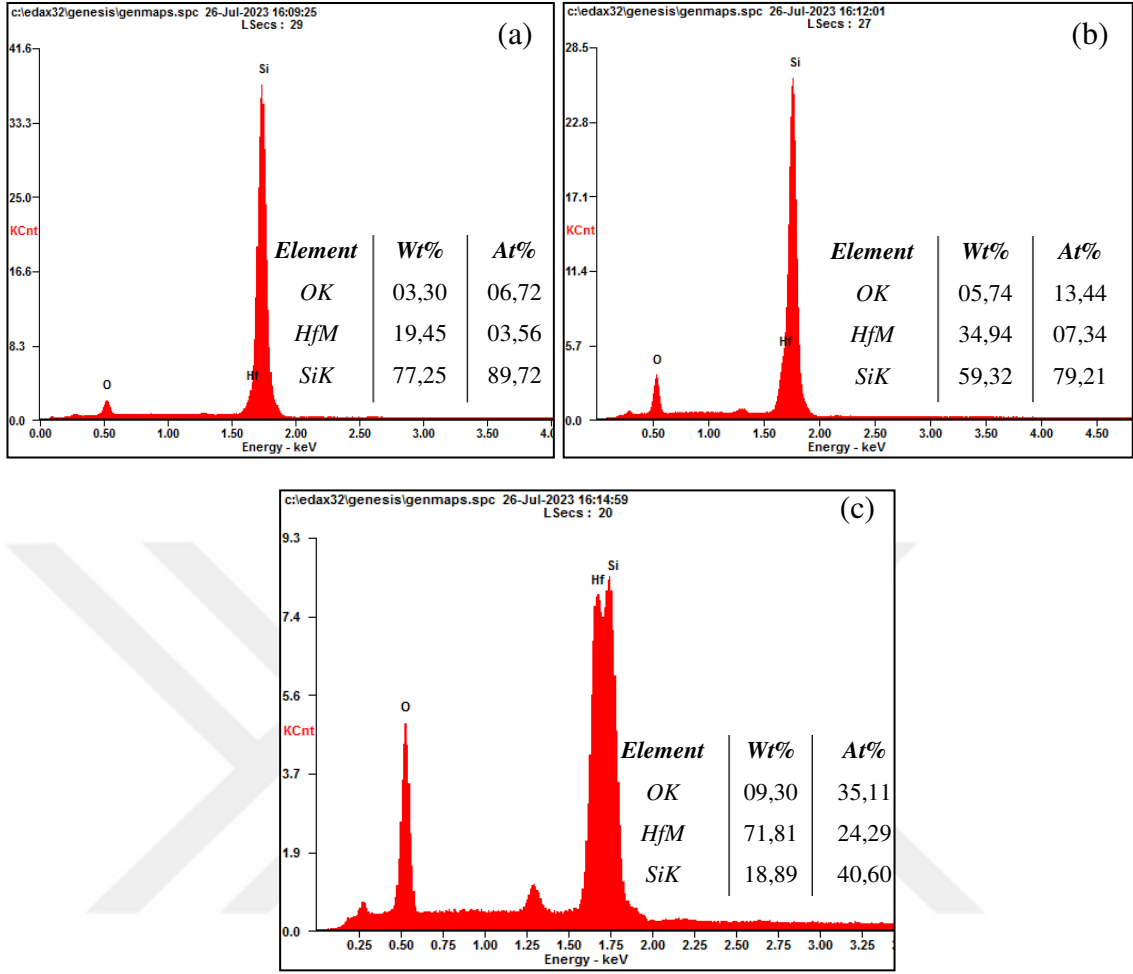
HfO_2 dielektrik tabakalarının üzerine kaplanmış olan SnO_2 yarıiletken tabakalarının 50k büyütmede alınan SEM görüntüleri Şekil 5.10'da verilmiştir. Dielektrik tabakanın kalınlığı arttıkça yüzeyde kusurlar oluşmaya başladığı şekilden görülmektedir.



Şekil 5.10. a) 1 kat, b) 2 kat, c) 5 kat HfO_2 dielektrik tabakalarının üzerine kaplanmış SnO_2 yarıiletken tabakalarının SEM görüntüleri

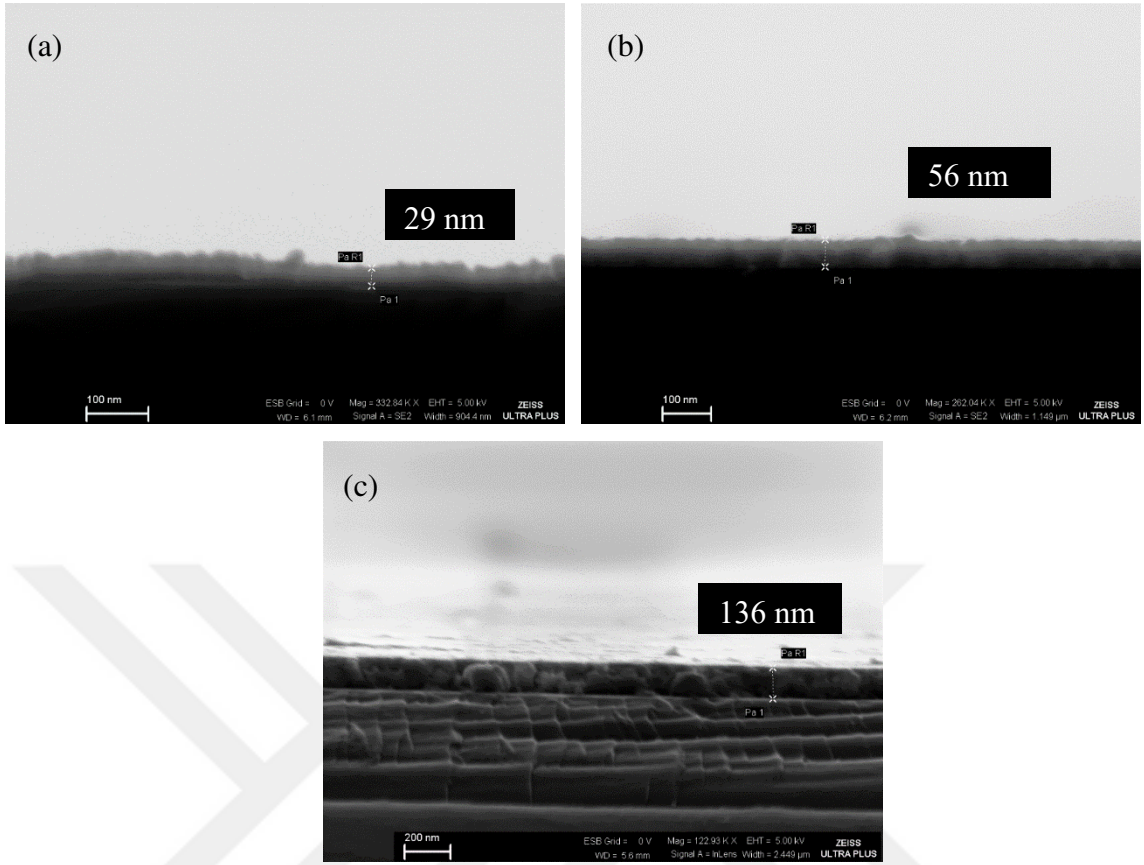
5.4.5. HfO_2 dielektrik tabakalarının kalınlıklarının belirlenmesi ve EDS analizi

Sol-jel spin kaplama yöntemi ile biriktirilen farklı kalınlıklardaki HfO_2 dielektrik tabakalarının, kimyasal bileşimini kontrol etmek için yapılan elementel analiz, SEM cihazına entegre EDS dedektörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 1 kat, 2 kat ve 5 kat kaplama yapılarak biriktirilen HfO_2 dielektrik tabakaları için elde edilen spektrumlar ve elementlerin yüzdelik oranları sırasıyla Şekil 5.11’de verilmiştir. EDS spektrumları hafniyum ve oksijen elementlerinin varlığını doğrulamaktadır. HfO_2 dielektrik tabakalarının kalınlığı arttıkça elementlerin yüzdelik oranları beklenildiği üzere artış göstermiştir. Spektrumlardaki güçlü silisyum piki, HfO_2 tabakasının altındaki silisyum tabakasından gelmektedir. Si’nin (1,739 keV) ve Hf’nin (1,644 keV) karakteristik X-ışınları pikleri oldukça yakın olduğu için baskın olan Si piki 1 kat ve 2 kat olan örneklerde Hf pikini biraz örtmektedir. Fakat Şekil 5.11c’den de görüldüğü gibi 5 kat olan örnekte Hf ve Si pikleri belirgin bir şekilde birbirinden ayrılmıştır.



Şekil 5.11. a) 1 kat, b) 2 kat, c) 5 kat HfO₂ dielektrik tabakalarının EDS analizi

Dielektrik tabaka kalınlığı, dielektrik tabakanın dielektrik sabitini hesaplamak için belirlenmiştir. Şekil 5.12’de enine kesitten alınmış olan SEM görüntüleri verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi 1 kat, 2 kat ve 5 kat kaplama yapılarak elde edilen HfO₂ dielektrik tabakalar için kalınlıklar yaklaşık 29 nm, 56 nm, 136 nm olarak tespit edilmiştir. Elde edilen kalınlık değerleri kullanılarak Eşitlik 2.1 yardımıyla dielektrik sabitleri hesaplanmış ve Tablo 6.2’de verilmiştir.



Şekil 5.12. a) 1 kat, b) 2 kat, c) 5 kat HfO_2 dielektrik tabakalarının SEM görüntüleri

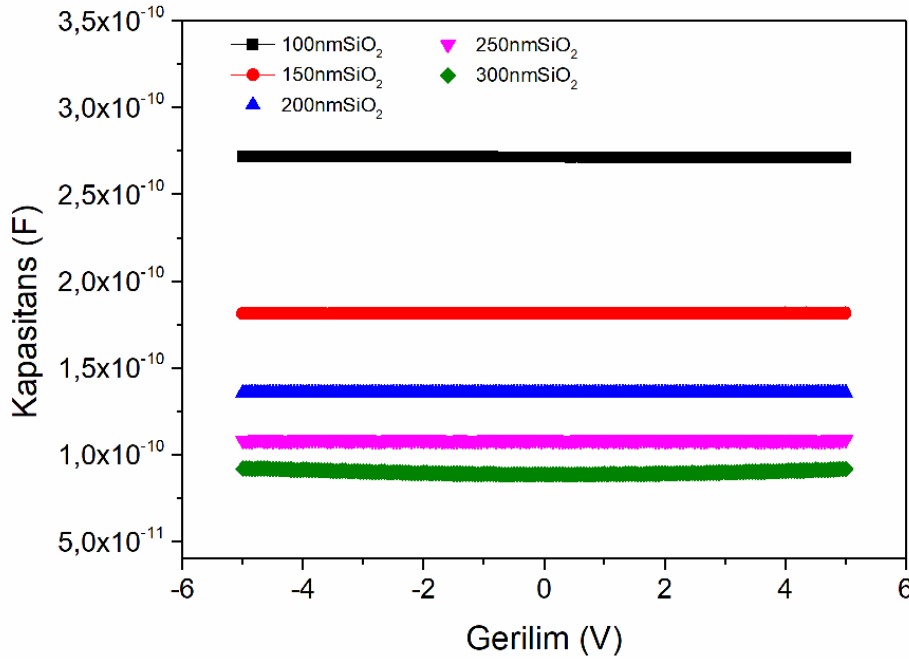
6. ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONLAR

Fabrikasyonu yapılan n-Si/SiO₂/SnO₂ ve p-Si/HfO₂/SnO₂-TFT'lerin elektriksel karakterizasyonu kapsamında *I-V* ve *C-V* ölçümleri alınmıştır. Elde edilen *I-V*, *C-V* grafiklerinden transistörlerin mobilite, eşik voltajı, açık kapalı akım oranı ve alt eşik salınım değerleri hesaplanmıştır. Farklı ışık şiddetlerinde alınan akım-gerilim ölçümlerinden ise, fotoduyarlılık ve fototepki karakteristikleri ile foto iletim mekanizmaları incelenmiştir.

6.1. n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'lerin Elektriksel Karakterizasyonları

6.1.1. n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'lerin kapasitans-gerilim karakteristikleri

n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'lerin kapasitans değerlerini belirlemek için dielektrik tabakaların *C-V* ölçümleri alınmıştır. Farklı kalınlıklardaki SiO₂ dielektriklerinin *C-V* karakteristikleri Şekil 6.1'de verilmiştir. 500 kHz frekansta S100, S150, S200, S250 ve S300-TFT'lerin dielektrik tabakalarının kapasitans değerleri *C-V* grafiğinden sırasıyla 34,5 nF/cm², 23 nF/cm², 17,3 nF/cm², 13,8 nF/cm², 11,5 nF/cm² olarak bulunmuştur. Dielektrik tabakanın kalınlığı arttıkça beklendiği gibi kapasitans değeri azalmıştır.



Şekil 6.1. Farklı kalınlıklardaki SiO₂ dielektrik tabakalarının *C-V* karakteristikleri

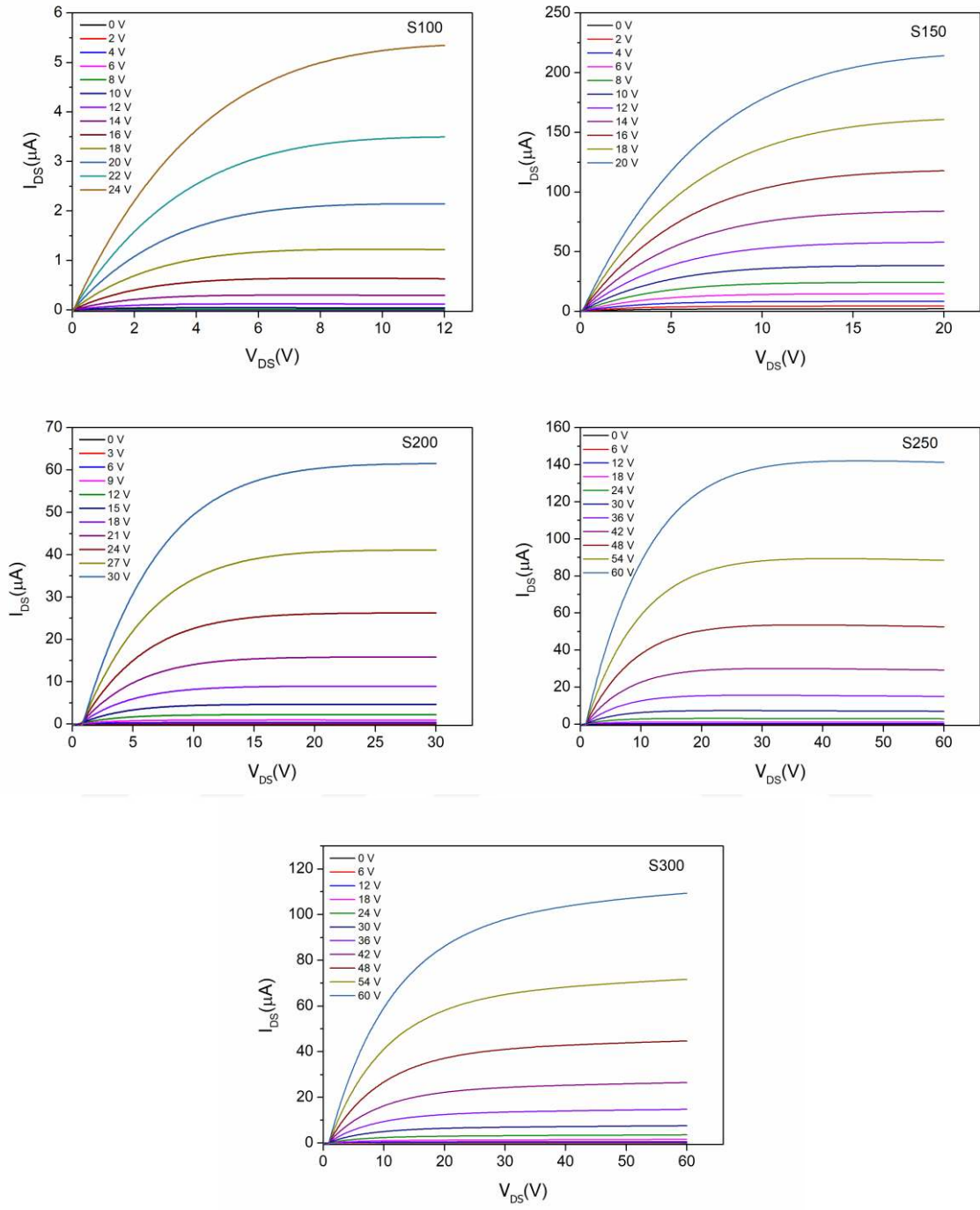
6.1.2. n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'lerin output ve transfer karakteristikleri

n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'lere ait farklı V_{GS} voltajlarına bağlı olarak I_{DS} akımının, V_{DS} voltajına göre değişimini gösteren output karakteristikleri Şekil 6.2'de verilmiştir. TFT'lerde, düşük V_{DS} voltaj değerlerine karşılık gelen I_{DS} akım değerleri lineer olarak artmıştır. Yüksek V_{DS} voltajlarında ise kanalda oluşan kısıtılmadan dolayı sabit akım değerleri ile doyum davranışı gözlenmiştir. I_{DS} akımının pozitif V_{GS} voltajı ile artması TFT'lerin n kanallı yapıda olduğunu göstermektedir. Şekil 6.2'den görüldüğü gibi tüm TFT'ler mükemmel drain doyum akımına ve aynı zamanda artan dielektrik tabaka kalınlığına bağlı olarak artış gösteren kaçak akım değerlerine sahiptirler.

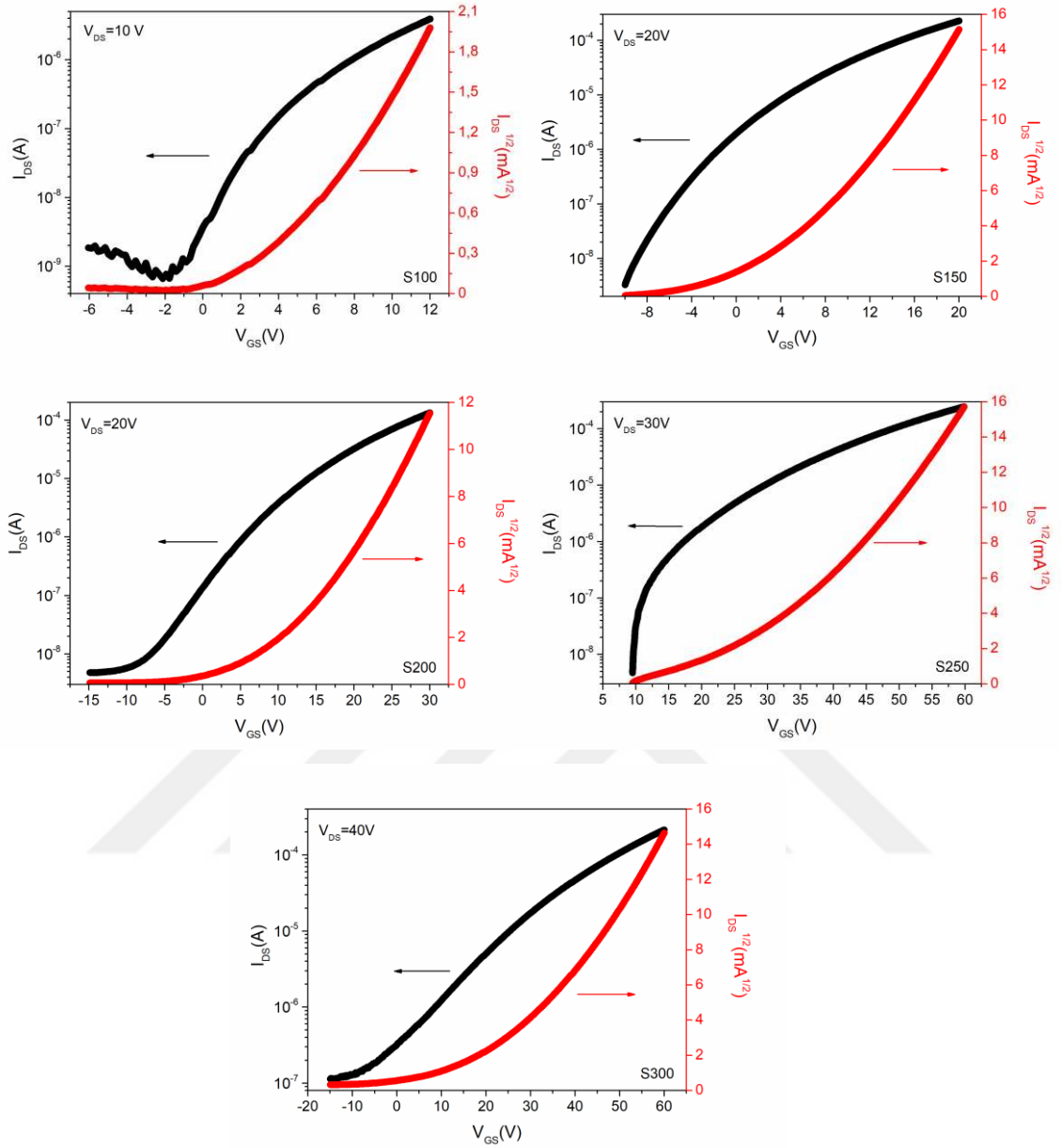
Şekil 6.2'deki output karakteristiklerinden dielektrik tabaka kalınlığı arttıkça TFT'lerin çalışma voltajlarının arttığı görülmektedir. S100-TFT'nin çalışma voltajı 0-12 V aralığındadır ve 0-24 V arasında değişen V_{GS} voltajları uygulanarak ölçüm alınmıştır. S150-TFT 0-20 V, S200-TFT 0-30 V, S250-TFT ve S300-TFT 0-60 V aralığında çalışma voltajına sahiptirler ve aynı çalışma voltajı aralığında değişen V_{GS} voltajları uygulanarak ölçümleri alınmıştır.

Output grafiklerinin doyum bölgesinden belirlenen sabit V_{DS} voltaj değerlerinde, V_{GS} voltajına bağlı olarak I_{DS} akımının değişimini gösteren transfer karakteristikleri Şekil 6.3'te verilmiştir.

Transfer karakteristiklerine ait ölçümler, S100-TFT için $V_{DS}=10V$, S150-TFT için $V_{DS}=20V$, S200-TFT için $V_{DS}=20V$, S250-TFT için $V_{DS}=30V$, S300-TFT için $V_{DS}=40V$ sabit V_{DS} voltaj değerlerinde alınmıştır. Transfer karakteristiklerinden yararlanılarak TFT'lerin elektriksel performansını belirleyen temel parametreleri olan μ , V_{Th} , $I_{on/off}$ oranı, SS ve N_{SS}^{max} değerleri hesaplanmış ve Tablo 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.2. *n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'lerin output karakteristikleri*



Şekil 6.3. $n\text{-Si/SiO}_2\text{/SnO}_2\text{-TFT}$ 'lerin transfer karakteristikleri

Tablo 6.1. $n\text{-Si/SiO}_2\text{/SnO}_2\text{-TFT}$ 'lerin temel transistör parametreleri

TFT	μ (cm^2/Vs)	V_{th} (V)	$I_{on/off}$	SS (V/dec)	N_{SS}^{max} (cm^{-2})
S100	0,30	03,54	$5,60 \times 10^3$	02,12	$7,45 \times 10^{12}$
S150	7,10	03,60	$6,98 \times 10^4$	05,94	$1,42 \times 10^{13}$
S200	4,42	11,42	$2,71 \times 10^4$	07,98	$1,43 \times 10^{13}$
S250	3,90	29,84	$5,31 \times 10^4$	11,48	$1,65 \times 10^{13}$
S300	2,82	24,24	$2,31 \times 10^3$	15,80	$1,90 \times 10^{13}$

Tablo 6.1'den görüldüğü gibi, en düşük mobilite değeri S100-TFT'ye aittir. SiO₂ kalınlığı 100 nm'den 150 nm'ye arttığında, mobilite değeri ~25 kat artarak 0,3 cm²/Vs'den 7,1 cm²/Vs'ye, $I_{on/off}$ oranı ise ~10 katına çıkmaktadır. 150 nm'den daha büyük dielektrik tabaka kalınlıklarında ise mobilitede azalma görülmüştür. Bu azalmanın nedeni, artan dielektrik tabaka kalınlığı ile SS ve N_{SS}^{max} değerlerinin artmasından kaynaklanmaktadır. Bu değerlerdeki artış, ara yüzeydeki tuzakların arttığı anlamına gelmektedir. Tablo 6.1'de verilen N_{SS}^{max} değerleri, literatürdeki metal oksit TFT'ler için elde edilen değerlerle uyumludur [31,84]. Tuzakların artması eşik voltajı değerleri üzerinde de etkili olmuştur ve kalınlık arttıkça V_{Th} değerleri artma eğilimindedir. Tüm transistörlerin pozitif eşik voltajlarına sahip olması bu transistörlerin enhancement modunda çalıştıklarını göstermektedir.

n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'ler arasında en iyi elektriksel performans, en yüksek mobilite ve $I_{on/off}$ oranı ile S150-TFT'ye aittir. Yüzey özelliklerine bakıldığında, diğer TFT'lerin yüzeylerinde volkan şeklinde dairesel halkalar oluşurken, S150 numunesinin yüzeyi dairesel halkalar olmaksızın daha homojen bir yüzeye sahiptir. S150'nin daha homojen bir yüzeye sahip olması elektrik performansını etkilemektedir, çünkü yüzey kusurları cihaz performansında önemli rol oynamaktadır.

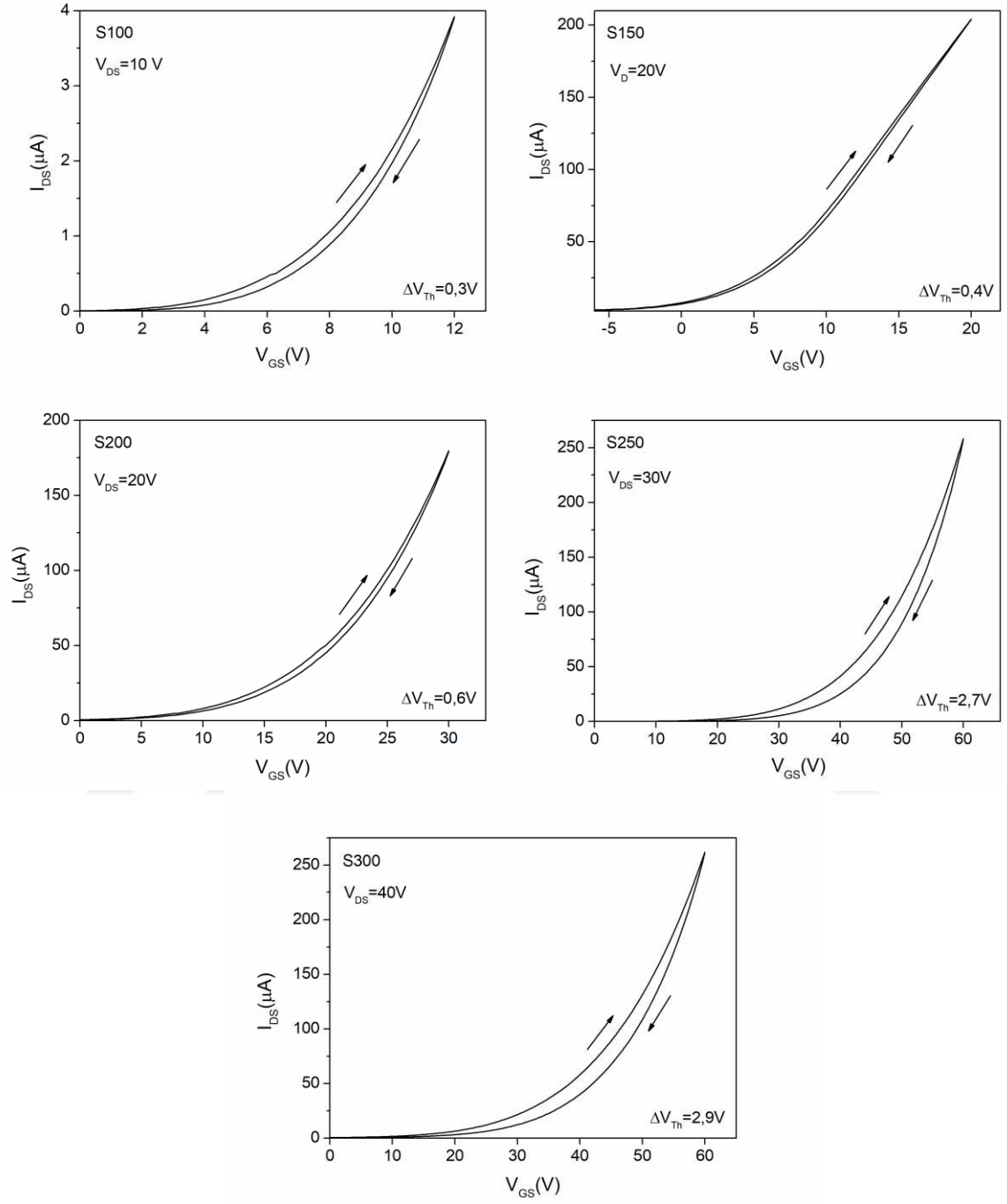
Sol-jel spin kaplama yöntemi ile 100 nm kalınlığında SiO₂ dielektrik tabaka kullanılarak üretilen SnO₂ TFT ile ilgili benzer bir çalışmada, $\sim 10^5$ $I_{on/off}$ oranı ve 0,06 cm²/Vs μ değeri rapor edilmiştir [85]. Rapor edilen bu sonuçlar, bu tez çalışmasındaki S100 TFT'den elde ettiğimiz sonuçlar ile karşılaştırıldığında, $I_{on/off}$ oranının S100 TFT değerinden daha yüksek, fakat μ değerinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. 150 nm kalınlığında SiO₂ kullanılarak yapılan başka bir çalışmada ise, sol-jel spin kaplama yöntemiyle oluşturulmuş TFT'lerin çalışmadığı, fakat SnO₂ kaplama sürecinde NaOH daldırma işleminin uygulanması durumunda TFT'lerin çalıştığı ve elde edilen $I_{on/off}$ oranının ve μ değerinin 10^8 ve 6,69 cm²/Vs olduğu rapor edilmiştir [27].

6.1.3. n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'lerin histerezis karakteristikleri

Şekil 6.4'te, SiO₂/SnO₂ TFT'lerin transfer karakteristiklerinin histerezis grafikleri verilmiştir. TFT'lerde histerezis, gate voltajının ileri ve geri yönlü taramaları sırasında gözlemlenen I_{DS} akım değerlerinde oluşan farkı belirlemektedir. Histerezise, yarıiletken kanalda veya yarıiletken dielektrik arayüzeyinde tuzaklanmış yükler, bipolaron oluşumu gibi hareketli yükleri yavaşlatacak reaksiyonlar, yarıiletken

dielektrik içine yük geçişleri, dielektrik polarizasyonu ve gateden dielektrik içine yük geçişi gibi durumlar neden olmaktadır. n-tipi TFT'ler için saat yönünde histerezis geri yönde tarama akımının ileri yönde tarama akımından daha düşük olduğu transfer özelliklerini göstermektedir. Geri tarama akımının daha düşük olduğu histerezisler genellikle yük taşıyıcıların kanala yakın bölgelerde tuzaklanmasına atfedilmektedir. Geri tarama akımının ileri tarama akımından daha yüksek olduğunda ise histerezisin yönü saat yönünün tersinedir ve bu duruma genellikle dielektrikteki hareketli iyonlar veya dielektriğin polarizasyonu neden olmaktadır [86].

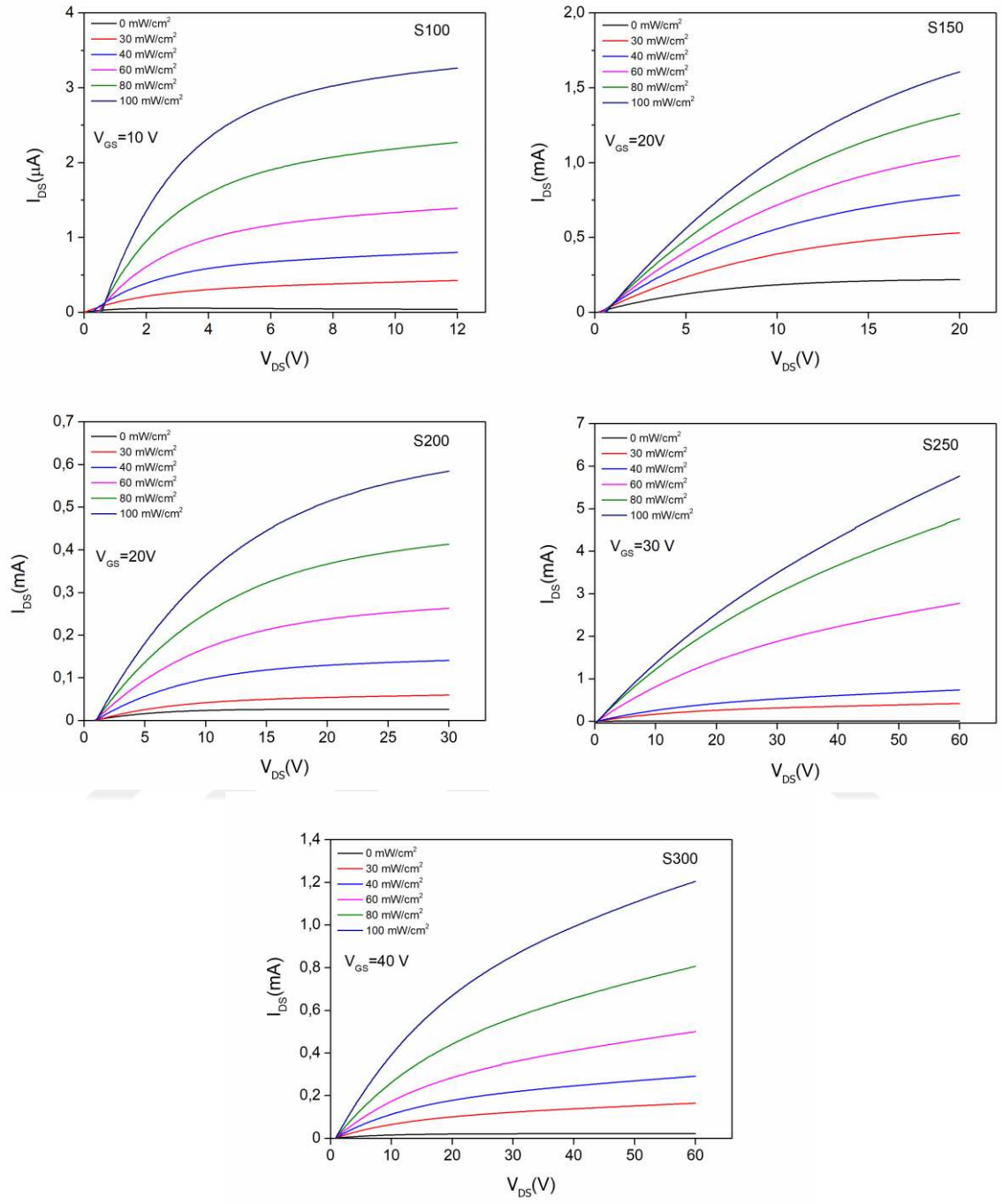
Şekil 6.4'te görüldüğü gibi, tüm TFT'lerde saat yönünde histerezis gözlenmiştir ve bu tip histerezislerde taşıyıcı tuzaklar önemli bir rol oynar. Tuzak merkezleri, yarıiletken malzemedeki veya dielektrik yarıiletken arayüzeylerindeki kusurlar veya safsızlıklardan kaynaklanabilmektedir. Tuzaklamış yükler, cihazdaki elektrik alan dağılımını değiştirerek eşik geriliminde kaymaya neden olur. Tuzak durumları mobilite üzerinde de etkilidir. Slow trap olarak adlandırılan tuzaklar, serbest taşıyıcıları yakalayıp kanal akımında azalmaya neden olur bunun sonucunda da mobilite azalır. Slow traplerle ilgili diğer bir etki ise, nötr olan slow traplerin taşıyıcı yakalayıp tuzak merkezlerinde negatif veya pozitif yük oluşumuna neden olmasıdır. Bu durum Coulomb saçılmasını arttırarak mobilitenin azalmasına yol açar. Bu tuzakların gücü ve yoğunluğu, transistörün fabrikasyonu için kullanılan üretim koşullarının yanı sıra malzemeler ve özellikleri gibi faktörlere de bağlı olabilir [87,88]. S100, S150, S200, S250 ve S300-TFT için eşik voltajlarındaki (ΔV_{Th}) fark sırasıyla 0,3 V; 0,4 V; 0,6 V; 2,7 V ve 2,9 V'tur. ΔV_{Th} , dielektrik tabakanın kalınlığı ve çalışma voltajları arttıkça artar. Gözlenen histerezis değerleri, yukarıda bahsedildiği gibi tuzak yoğunluğu ile ilişkili olduğundan, düşük kalınlıkta gözlenen düşük saat yönünde histerezis ve kalın oksit tabakalarında gözlenen yüksek 2,7 V ve 2,9 V saat yönünde histerezis, arayüzde veya yakınındaki tuzaklar hakkında bilgi verir. Dolayısıyla hesaplanan SS ve N_{SS} değerleri sonuçları destekler niteliktedir.



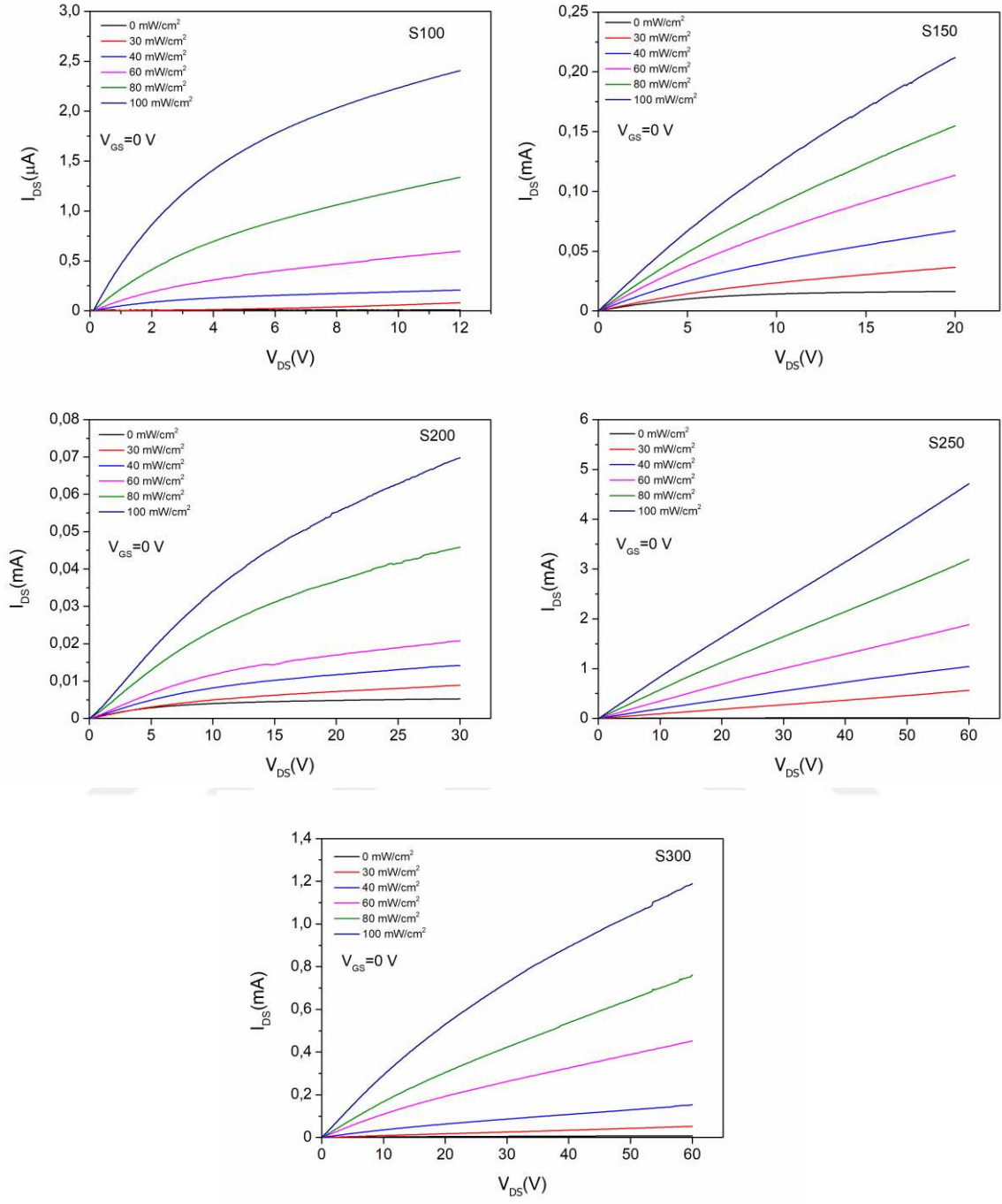
Şekil 6.4. *n-Si/SiO₂/SnO₂ TFT'lerin histerezis karakteristikleri*

6.1.4. n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'lerin farklı aydınlatma şiddetlerinde output karakteristikleri

n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'lerin sabit bir V_{GS} voltajında (on durumu) ve $V_{GS}=0V$ 'da (off durumu), 30 ile 100 mW/cm² arasında değişen farklı aydınlatma şiddetleri altındaki output karakteristikleri Şekil 6.5'te ve Şekil 6.6'da verilmiştir. Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da aydınlatma şiddeti arttıkça I_{DS} akımının arttığı görülmektedir. Işığın transistörün aktif tabakası olan SnO₂ tarafından soğurulması ile foto akım üretilmekte ve bu akım artan aydınlatma şiddetiyle artmaktadır. Şekil 6.5'teki fotoakım eğrileri, aydınlatma şiddetine ilave olarak uygulanan V_{GS} voltajının da etkisiyle daha iyi doyum akım değerleri sergilemektedir. Şekil 6.6'da verilen off durumundaki output grafikleri on durumundaki ölçümlerden 6 ay sonra alındığı için, S100, S150 ve S200-TFT'lerde yaşlanmanın etkisi görülmüş, buna bağlı olarak fotoakım değerlerinde de azalma gözlenmiştir.



Şekil 6.5. *n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'lerin on durumunda farklı aydınlatma şiddetleri altında output karakteristikleri*



Şekil 6.6. *n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'lerin off durumunda farklı aydınlatma şiddetleri altında output karakteristikleri*

6.1.5. n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'lerin farklı aydınlatma şiddetlerinde fotoduyarlılık ve fototepki karakteristikleri

*n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT*lerin, Şekil 6.7'de on durumlarında, Şekil 6.8'de off durumlarında, farklı aydınlatma şiddetleri altındaki $I_{DS}-V_{DS}$ grafiklerinden yararlanılarak Eşitlik 2.9 ve Eşitlik 2.10 ile elde edilen, P_{ps} ve R_{pr} değerlerinin aydınlatma şiddetine bağlı grafikleri verilmiştir.

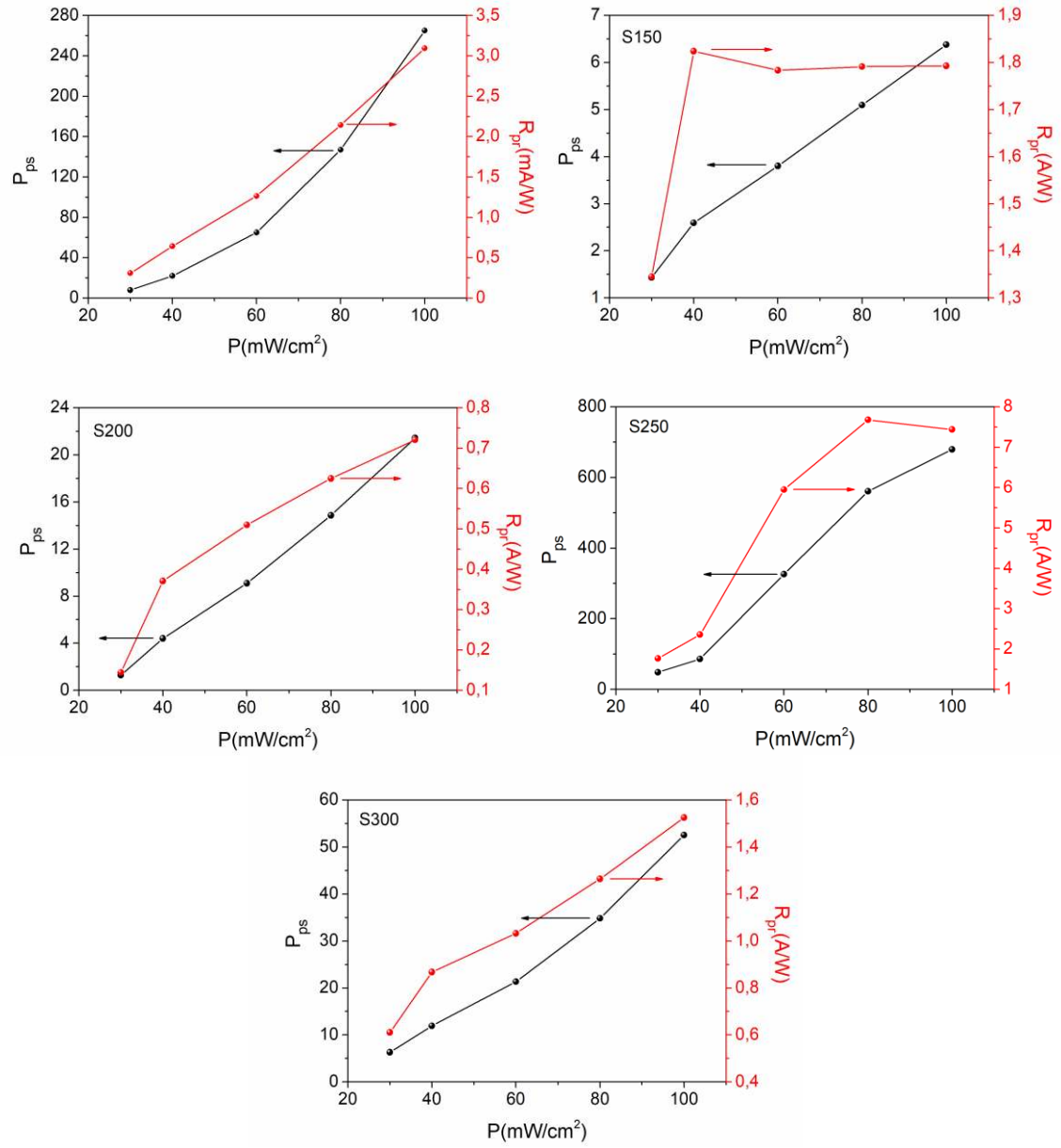
Tüm TFT'lerde on ve off durumlarında aydınlatma şiddetinin artmasıyla P_{ps} değerleri artmıştır. P_{ps} değerindeki bu artış aydınlatma şiddeti ile artan fotoakımdan kaynaklanmaktadır.

On durumunda R_{pr} değerleri S100, S200 ve S300-TFT'lerde artan aydınlatma şiddetiyle artarken, S250-TFT'de önce artmakta, 80 mW/cm²'den sonra hafifçe azalmaktadır. S150-TFT'de R_{pr} önce artmakta, 40 mW/cm²'den sonra hafifçe azalmakta, sabit kalmakta ve doygunluğa ulaşmaktadır. P_{ps} arttıkça R_{pr} 'de izlenen bu davranış hibrit organik-inorganik fotodiyotlarda ve fototransistörlerde, nanoyapılı malzemelerin aktif tabaka olarak kullanıldığı dedektörlerde sıklıkla gözlenmektedir ve yüksek taşıyıcı konsantrasyonlarında, yüksek mobiliteye sahip yük taşıyıcılarının rekombinasyonundaki artışın nedeni olarak düşünülmektedir [89]. Dolayısıyla optimum dielektrik kalınlığına sahip S150-TFT'nin R_{pr} değerindeki değişim farklı bir karakter göstermiştir. Off durumunda ise R_{pr} değerleri tüm TFT'lerde artış göstermiştir. n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'ler arasında, on ve off durumlarında en yüksek P_{ps} ve R_{pr} değerleri S250-TFT'ye aittir.

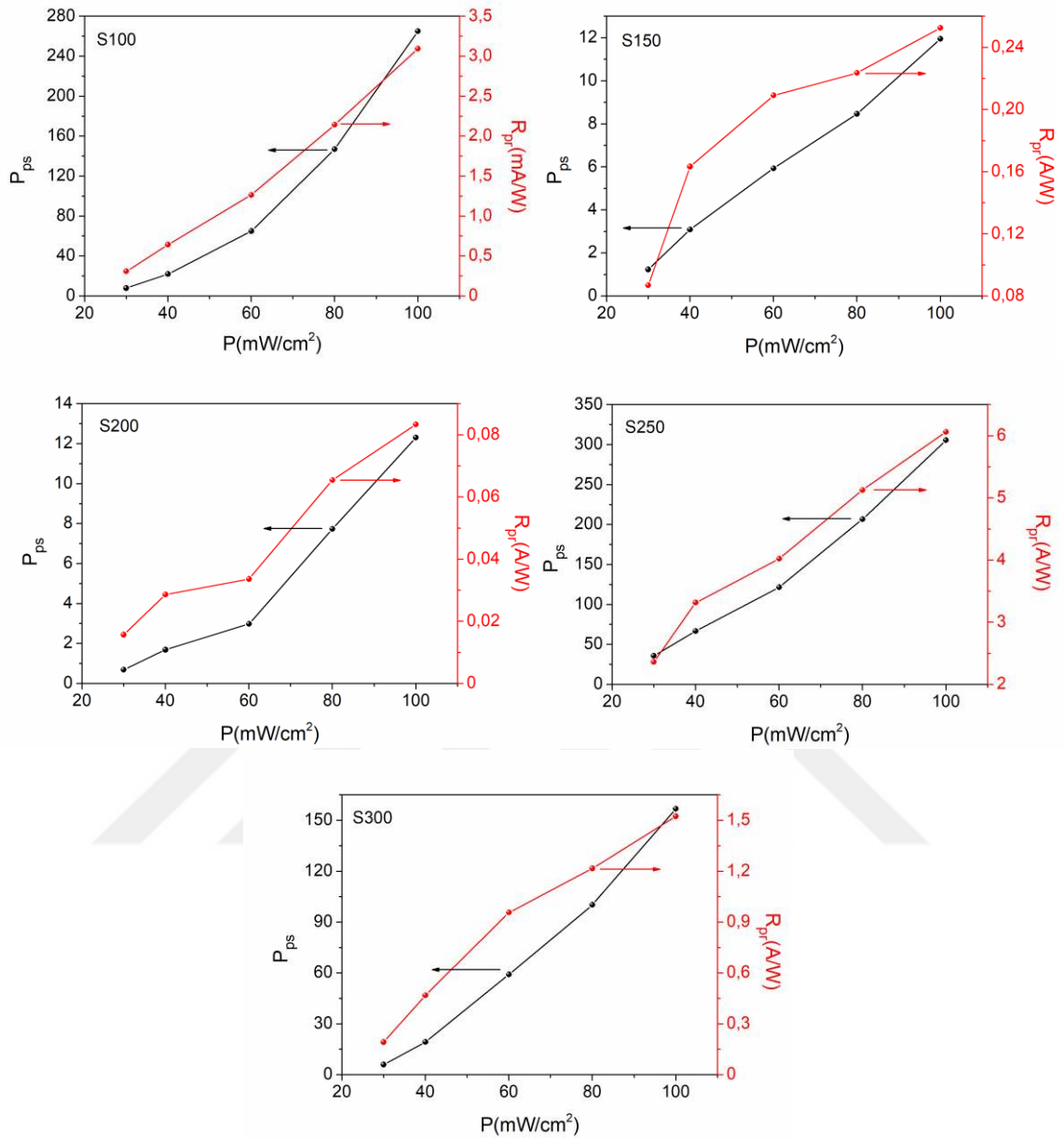
n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'lerin Eşitlik 2.11 kullanılarak farklı şiddetlerinde on ve off durumları için elde edilen dedektivite (D^*) grafikleri Şekil 6.9'da verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi hem aydınlatma şiddetindeki hem de kalınlıktaki artışa bağlı olarak D^* değerlerinde artış gözlenmektedir. Fakat en yüksek D^* değerleri S250 TFT'ye aittir. S250 TFT için on ve off durumlarında 100mW/cm² aydınlatma şiddetindeki D^* değerleri $4,97 \times 10^{11}$ Jones ve $2,41 \times 10^{11}$ Jones olarak hesaplanmıştır.

Literatürde n-Si/SiO₂/ZnO/SnO₂ yapısındaki çift katmanlı UV fototransistörün 365 nm UV aydınlatması altında R_{pr} değeri 82,28 A/W, dedektivite değeri $7,79 \times 10^{13}$ Jones olarak rapor edilmiştir [90]. Li₂ZnO/SnO₂ FET'in UV-B (280-320 nm) aydınlatması altında fototransistör özelliği incelendiğinde ise, en yüksek R_{pr} değerinin 0,12 A/W ile 300 nm UV-B aydınlatması altında elde edildiği rapor edilmiştir [91].

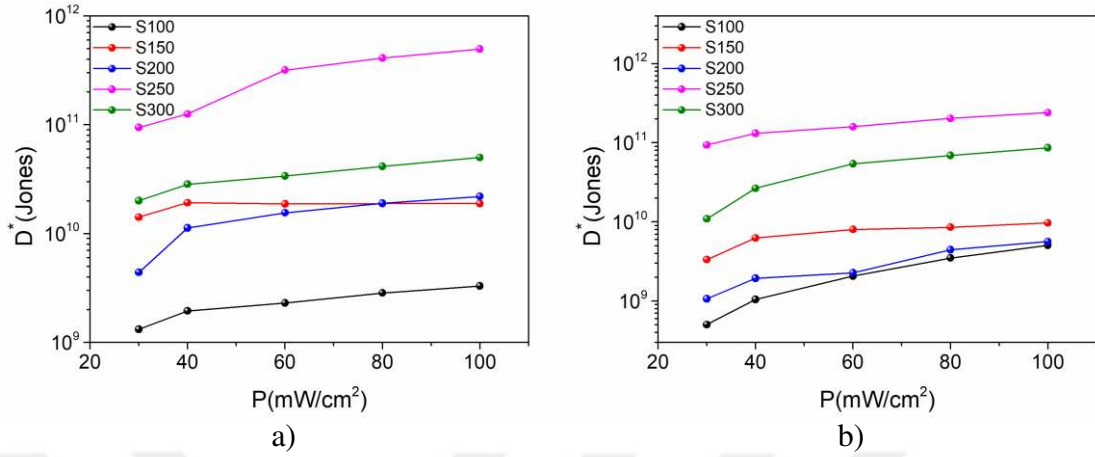
Farklı metal oksitlerle yapılan çalışmalar incelendiğinde, aktif tabakası ZnO [92] ve IGZO [93] kullanılarak üretilen fototransistörlerde de yakın değerler rapor edilmiştir.



Şekil 6.7. $n\text{-Si/SiO}_2\text{/SnO}_2\text{-TFT}$ 'lerin on durumunda aydınlatma şiddetlerine bağlı olarak fotoduyarlılık ve fototepki değerlerinin değişimi

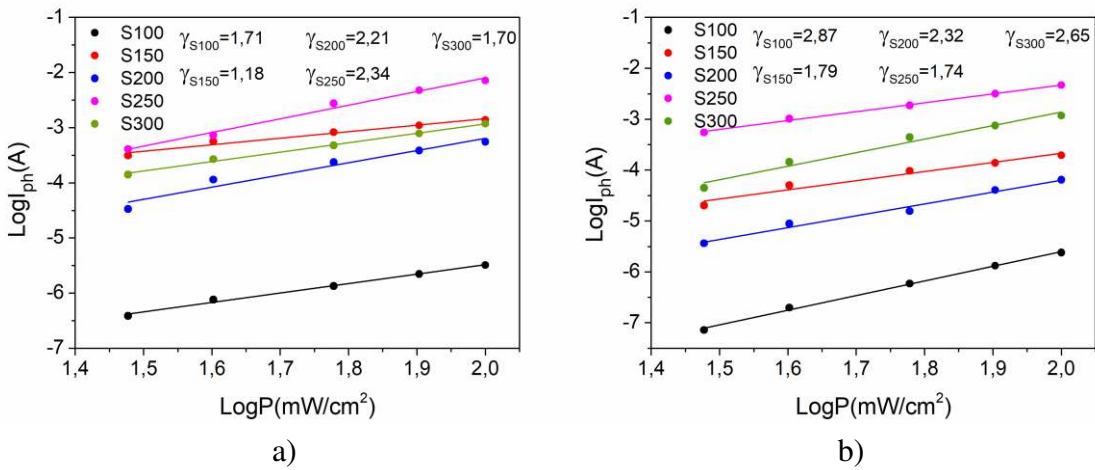


Şekil 6.8. *n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT*'lerin off durumunda aydınlatma şiddetlerine bağlı olarak fotoduyarlılık ve fototepki değerlerinin değişimi



Şekil 6.9. *n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'lerin a) on b) off durumunda aydınlatma şiddetlerine bağlı olarak dedektivite değerlerinin değişimi*

Şekil 6.10'da, *n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'lerine* ait $\log(I_{ph})-\log(P)$ değişimlerinin on (a) ve off durumlarındaki (b) grafikleri ve bu grafiklerin eğimlerinden hesaplanan γ değerleri verilmektedir. γ değerleri tüm TFT'ler için 1'den büyüktür. $\gamma > 1$ durumunda, fotoakım artışı bir süperlineer davranış sergilemektedir. Bu, fototransistörün ışık şiddetindeki bir artışa daha hızlı ve güçlü yanıt verdiği anlamına gelmektedir.

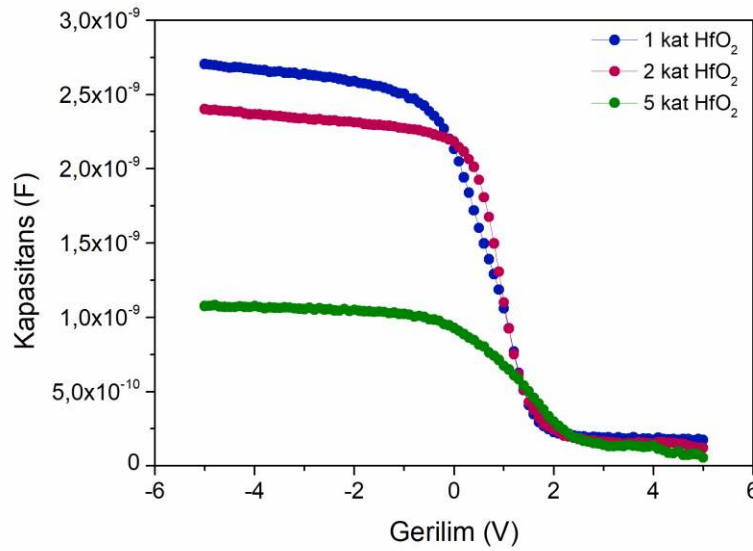


Şekil 6.10. *n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'lerin a) on durumu b) off durumu LogI_{ph}-LogP grafikleri*

6.2. p-Si/HfO₂/SnO₂-TFT'lerin Elektriksel Karakterizasyonları

6.2.1. p-Si/HfO₂/SnO₂-TFT'lerin kapasitans-gerilim karakteristikleri

p-Si/HfO₂/SnO₂-TFT'lerin kapasitans değerlerini belirlemek için dielektrik tabakaların kapasitans ölçümleri alınmıştır. Farklı kalınlıklardaki HfO₂ dielektrik tabakalarının C-V karakteristikleri Şekil 6.11'de görülmektedir. 2 kHz frekansta H1, H2 ve H5-TFT'lere ait HfO₂ dielektriklerin kapasitansları C-V grafiğinden sırasıyla 322 nF/cm², 287 nF/cm², 151 nF/cm² olarak belirlenmiştir. Dielektrik tabakanın kalınlığı arttıkça kapasitans değeri beklendiği gibi azalmıştır.



Şekil 6.11. Farklı kalınlıklardaki HfO₂ gate dielektriklerinin C-V karakteristikleri

Kapasitans değerleri ve dielektrik tabaka kalınlıkları kullanılarak Eşitlik 1.1 yardımıyla HfO₂ dielektrik tabakalarının dielektrik sabitleri (ϵ_r) hesaplanmış 10,6-20,16 arasında bulunan değerler Tablo 6.2'de verilmiştir. Literatürde sol-jel spin kaplama ve ALD yöntemleriyle oluşturulmuş, yaklaşık 17-28 nm kalınlığındaki HfO₂ dielektrik tabakalarının 1kHz ve 1MHz frekanslarda alınmış kapasitans değerlerinden yararlanılarak hesaplanmış dielektrik sabiti değerleri 12,4 [94], 11,2 [95] ve 11,7 olarak [96] olarak rapor edilmiştir. Buradan da anlaşılabacağı gibi dielektrik sabiti kullanılan yöntem, dielektrik kalınlığına ve hangi frekanstaki kapasitans değerlerinin kullanıldığına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

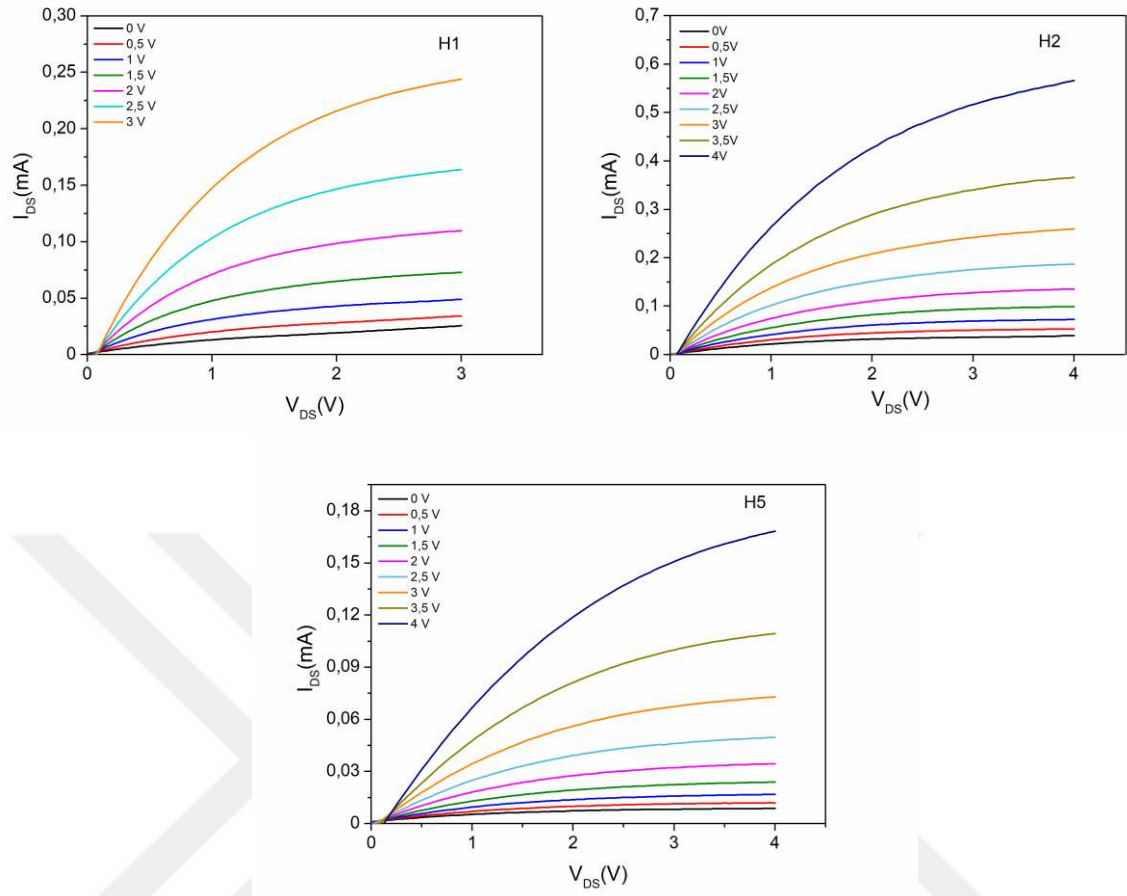
6.2.2. p-Si/HfO₂/SnO₂-TFT'lerin output ve transfer karakteristikleri

p-Si/HfO₂/SnO₂-TFT'lere ait farklı V_{GS} voltajlarına bağlı olarak I_{DS} akımının, V_{DS} voltajına göre değişimini gösteren output karakteristikleri Şekil 6.12'de verilmiştir. Şekil 6.12'de görüldüğü gibi TFT'lerde, düşük V_{DS} voltaj değerlerine karşılık gelen I_{DS} akım değerleri lineer olarak artarken, yüksek V_{DS} voltajlarında ise sabittir. I_{DS} akımının pozitif V_{GS} voltajı ile artması TFT'lerin n kanallı yapıda olduğunu göstermektedir.

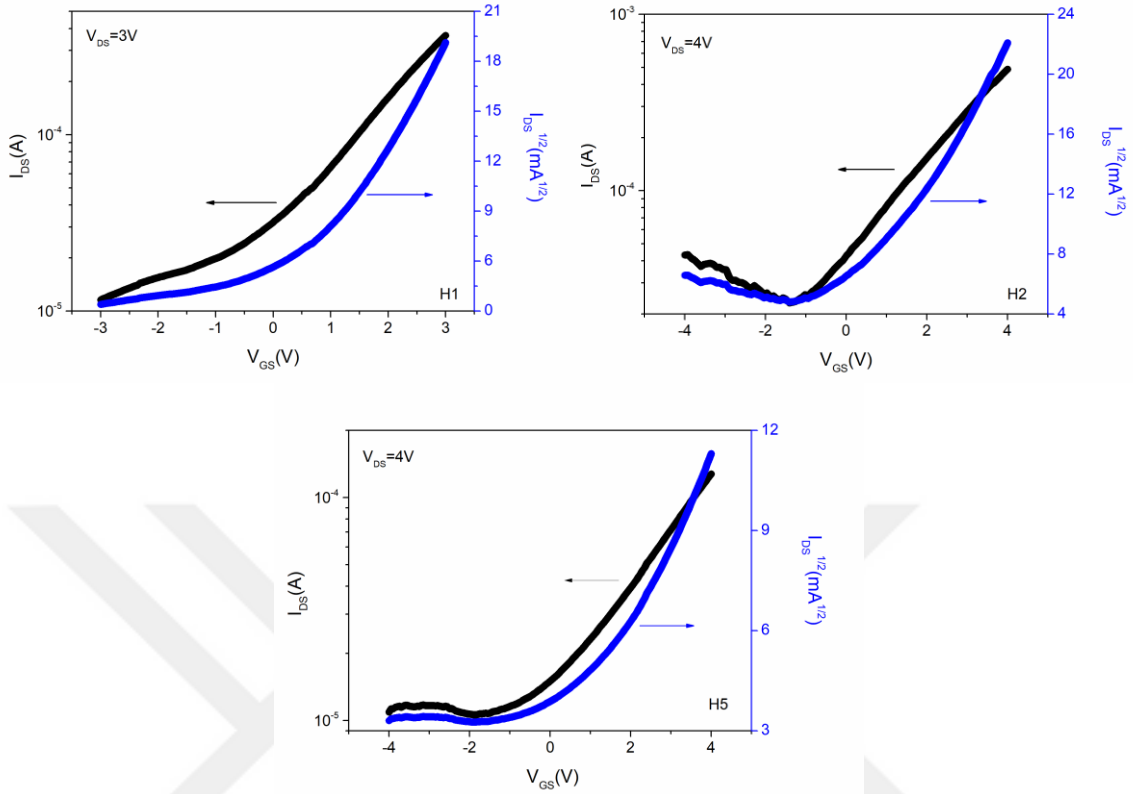
p-Si/HfO₂/SnO₂-TFT TFT'ler n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'lere oranla daha düşük çalışma voltajlarına sahiptir. Bunun nedeni HfO₂'nin dielektrik sabitinin SiO₂'nin dielektrik sabitinden çok daha yüksek olmasıdır. H1-TFT'nin çalışma voltajı 0-3 V, H2 ve H5-TFT'lerin çalışma voltajı 0-4 V aralığındadır. Her üç TFT'ye de çalışma voltajı bölgesinde 0,5 V'luk oranda artan V_{GS} voltajları uygulanarak output karakteristikleri elde edilmiştir.

Output grafiklerinin doyum bölgesinden belirlenen sabit V_{DS} voltaj değerlerinde, V_{GS} voltajına bağlı olarak I_{DS} akımının değişimini gösteren transfer karakteristikleri Şekil 6.13'te verilmiştir.

Transfer karakteristiklerine ait ölçümler, H1-TFT için $V_{DS}=3V$, H2 ve H5-TFT için $V_{DS}=4V$ sabit V_{DS} voltaj değerlerinde alınmıştır. TFT'lerin elektriksel performansını belirleyen temel parametreleri olan μ , V_{Th} , $I_{on/off}$ oranı, SS ve N_{SS}^{max} değeri transfer karakteristiklerinden yararlanılarak hesaplanmış ve Tablo 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.12. p -Si/HfO₂/SnO₂ TFT'lerin output karakteristikleri



Şekil 6.13. *p*-Si/HfO₂/SnO₂-TFT'lerin transfer karakteristikleri

Tablo 6.2. *p*-Si/HfO₂/SnO₂-TFT'lerin temel transistör parametreleri

TFT	μ (cm ² /Vs)	V_{Th} (V)	$I_{on/off}$	SS (V/dec)	N_{SS}^{max} (cm ⁻²)	ϵ_r
H1	26,71	0,09	31,63	3,91	1,30x10 ¹⁴	10,60
H2	18,94	-0,22	21,15	4,04	1,20x10 ¹⁴	18,16
H5	11,38	-0,10	12,01	6,48	8,81x10 ¹³	20,16

Tablo 6.2'den görüldüğü gibi dielektrik tabakanın kalınlığı arttıkça $I_{on/off}$ oranı ve mobilite azalmaktadır. En yüksek μ değeri ve $I_{on/off}$ oranı, H1-TFT için 26,71 cm²/Vs ve 31,63 elde edilmiştir. Dielektrik tabakanın kalınlığı azaldıkça, kapasitans değeri artar. Bu durum, belirli bir gate gerilimi için daha yüksek yük yoğunluğu anlamına gelmektedir. Daha yüksek yük yoğunluğu, özellikle yüklerin yakalanıp serbest bırakılabildiği lokalize durumlardan kaynaklanan tuzakların etkilerini azaltarak serbest yük yoğunluğunu artırır. Serbest yük taşıyıcıların toplam yük taşıyıcılara oranındaki artış, mobilitedeki artışa neden olmaktadır [97,98]. Dielektrik tabakanın kalınlığının artmasıyla dielektrik sabitinin arttığı görülmektedir. Kalınlık arttıkça arayüzey yük

tuzaklarının varlığını gösteren SS değerlerindeki artış da mobilitedeki azalmayı desteklemektedir. N_{SS}^{Max} , dielektrik tabakanın kapasitansına ve SS değerine bağlıdır. Yük taşıyıcılarının arayüzeyde birikmesi dielektriğin kapasitansı ile doğru orantılı olduğundan, kapasitans ne kadar büyükse birikme de o kadar yüksek olur. Hesaplanan N_{SS}^{Max} değerleri, literatürdeki rapor edilen değerler ile uyumludur [99].

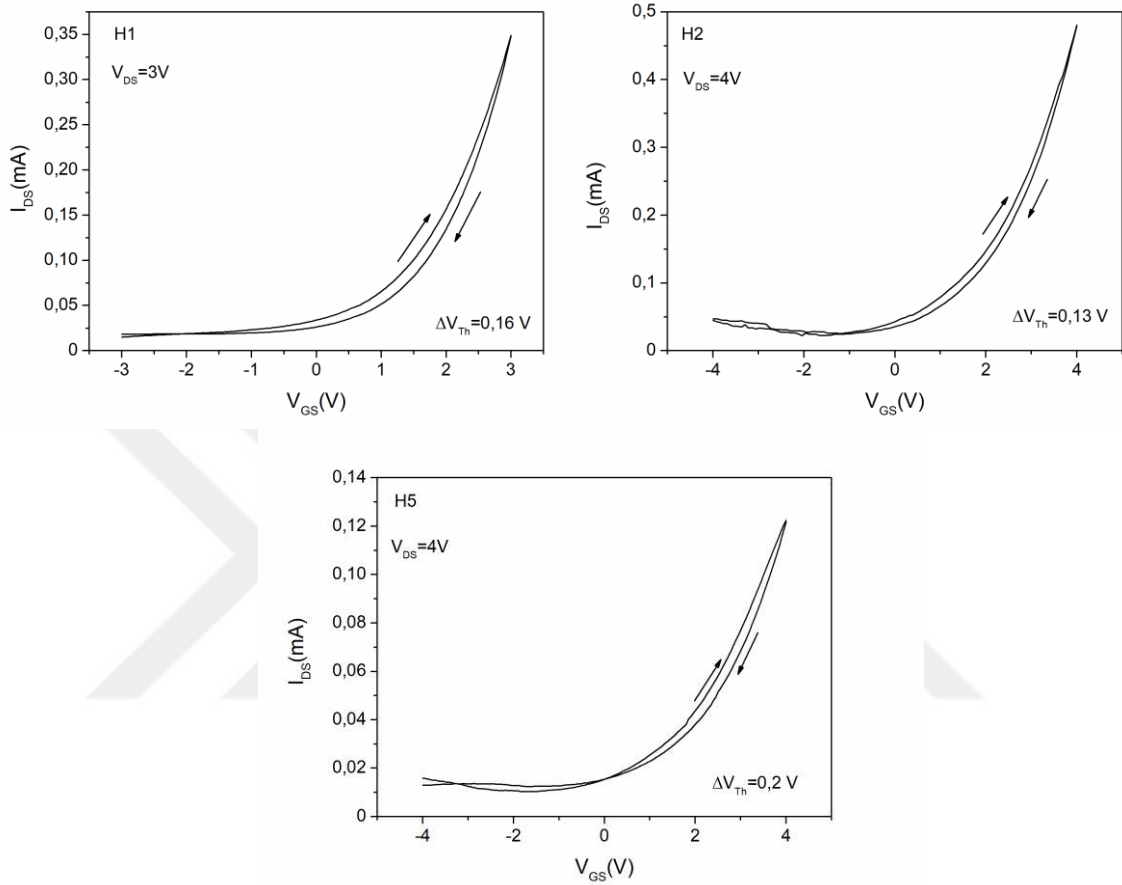
Mobilitayı etkileyen bir diğer parametre ise dielektrik tabakanın yüzey pürüzlülük değeridir. Dielektrik tabakanın yüzey pürüzlülüğünün azalmasıyla mobilitenin arttığı bilinmektedir [100,101]. Çalışmamızda HfO_2 dielektrik tabakalarının kalınlığı arttıkça pürüzlülük değerleri de 1,50 nm'den 2,63 nm'ye artmıştır. En az pürüzlülük en ince dielektrik tabakada gözlemlenmiştir. Bu da mobilita değerlerindeki değişimde dielektrik tabakanın yüzeyinin etkin rol oynadığını göstermektedir.

Literatürde, sol-jel spin kaplama yöntemi kullanılarak oluşturulmuş 95 nm HfO_2 dielektrik tabakasına sahip SnO_2 tabanlı bir TFT çalışmada, μ değeri 90 cm^2/Vs , SS değeri 113 mV/dec olarak rapor edilmiştir [102]. Bu çalışmada farklı metal elektrotların (drain-source için IZO ve gate için Mo) kullanılması, 100 kHz'deki 219 nF/ cm^2 kapasitans değeri kullanılarak dielektrik sabitinin hesaplanması, filmlerin büyütülme aşamasında 90 saniye boyunca UV işlemine maruz bırakılması, rapor edilen mobilita değerinin çalışmamızdaki değerden yüksek çıkmasında etkin rol oynamıştır. Benzer başka bir çalışmada ise, PVD yöntemi ile HfO_2 dielektrik tabakası (40 nm), saçırma yöntemi ile SnO_2 aktif tabakası oluşturulmuş bir TFT için μ değeri 43 cm^2/Vs ve SS değeri 81 mV/dec olarak rapor edilmiştir [103]. Bu tez çalışmasında basit, ekonomik ve vakum gerektirmeyen bir yöntem ile yüksek vakum gerektiren ve oldukça pahalı sistemler kullanılarak elde edilmiş bir TFT'nin elektriksel performansına yakın değerler elde etmiş olmak oldukça önemlidir.

6.2.3. p-Si/ HfO_2 / SnO_2 -TFT'lerin histerezis karakteristikleri

p-Si/ HfO_2 / SnO_2 -TFT'lere ait transfer karakteristiklerinin histerezis grafikleri Şekil 6.14'te verilmiştir. Tüm TFT'lerde saat yönünde histerezis gözlenmiştir. Bölüm 6.1.3.'te detaylı olarak açıklandığı gibi bu tip histerezislerde yarıiletken malzemedeki veya dielektrik yarıiletken arayüzeylerindeki kusurlar veya safsızlıklardan kaynaklanan tuzaklar önemli rol oynamaktadır.

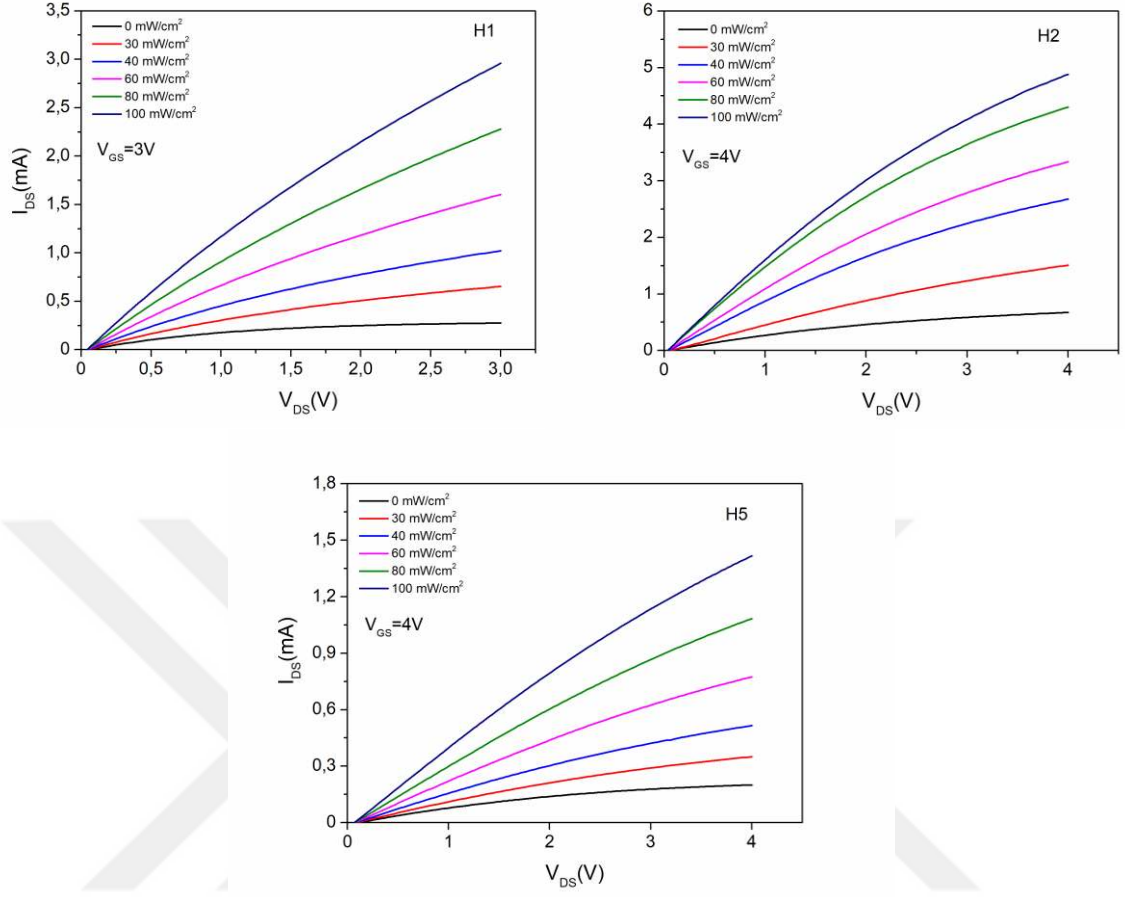
Şekil 6.14'te görülen saat yönünde histerezisler, arayüzde veya yakınındaki tuzaklar hakkında bilgi verir. ΔV_{Th} değerleri H1 için 0,16 V, H2 için 0,13 V ve H5 için 0,20 V olarak belirlenmiştir.



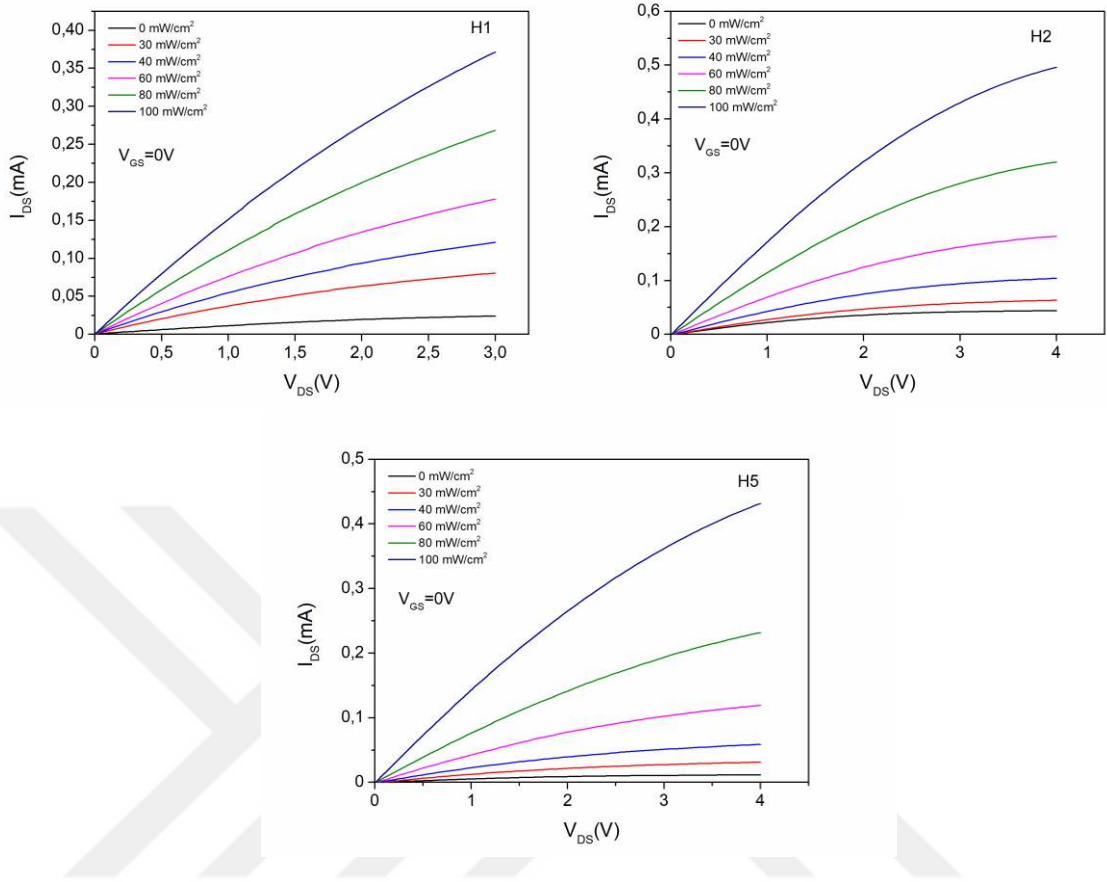
Şekil 6.14. *p*-Si/HfO₂/SnO₂-TFT'lerin histerezis karakteristikleri

6.2.4. *p*-Si/HfO₂/SnO₂-TFT'lerin farklı aydınlatma şiddetlerinde output karakteristikleri

p-Si/HfO₂/SnO₂-TFT'lerin sabit bir V_{GS} voltajında ve $V_{GS}=0V$ 'da, 30 ile 100 mW/cm² arasında değişen farklı aydınlatma şiddetleri altındaki output karakteristikleri Şekil 6.15'te ve Şekil 6.16'da verilmiştir. Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'da aydınlatma şiddeti arttıkça, ışığın TFT'nin aktif tabakası olan SnO₂ tarafından soğurulması ile fotoakım üretilmekte ve buna bağlı olarak I_{DS} akımının arttığı görülmektedir. TFT'lerin off durumundaki output grafiklerinden görüldüğü gibi herhangi bir V_{GS} voltajının uygulanmadığı, sadece aydınlatma şiddetine bağlı olarak akım değerleri alındığı için fotoakım değerlerinde on durumuna göre beklendiği gibi bir azalma gözlenmiştir.



Şekil 6.15. *p-Si/HfO₂/SnO₂-TFT'lerin on durumunda farklı aydınlatma şiddetleri altında output karakteristikleri*



Şekil 6.16. *p-Si/HfO₂/SnO₂-TFT'lerin off durumunda farklı aydınlatma şiddetleri altında output karakteristikleri*

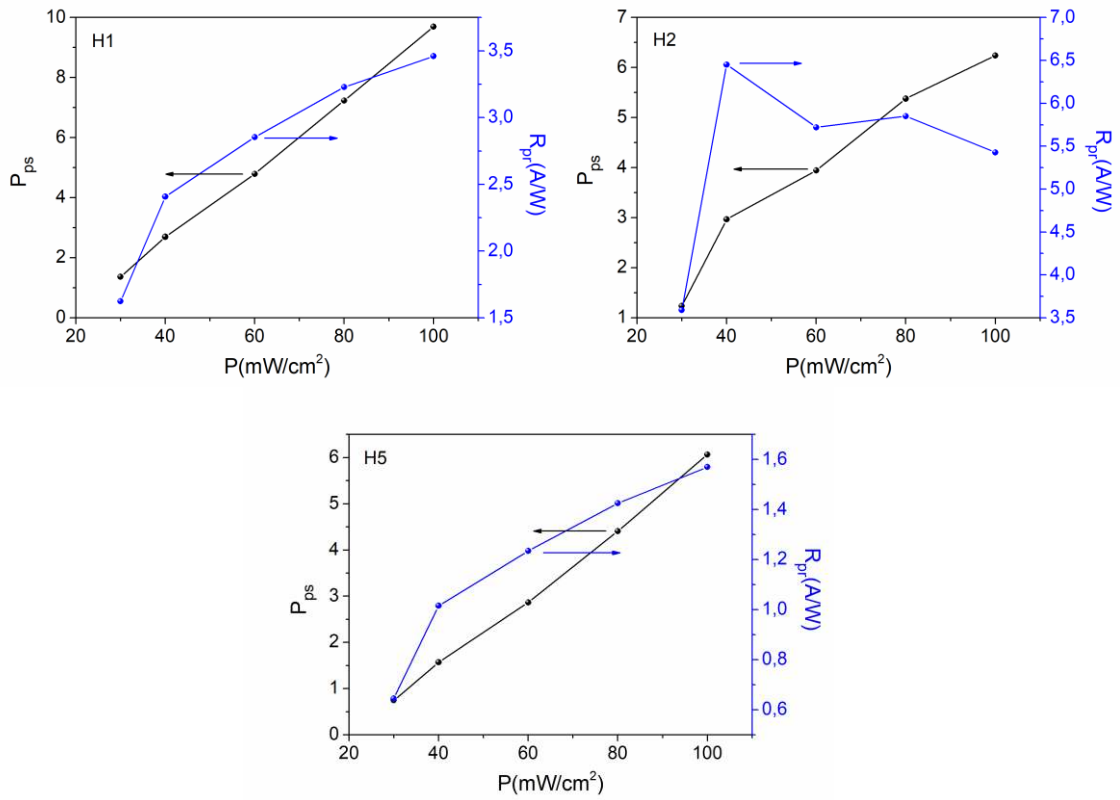
6.2.5. p-Si/HfO₂/SnO₂-TFT'lerin farklı aydınlatma şiddetlerinde fotoduyarlılık ve fototepki karakteristikleri

p-Si/HfO₂/SnO₂-TFT'lerin, Şekil 6.17'de on durumlarında, Şekil 6.18'de off durumlarında, farklı aydınlatma şiddetleri altındaki I_{DS} - V_{DS} grafiklerinden yararlanılarak Eşitlik 2.9 ve Eşitlik 2.10 ile elde edilen, P_{ps} ve R_{pr} değerlerinin aydınlatma şiddetine bağlı grafikleri verilmiştir. Tüm TFT'lerde on ve off durumlarında aydınlatma şiddetinin artmasıyla P_{ps} değerleri artmıştır. P_{ps} değerindeki bu artış aydınlatma şiddeti ile artan fotoakımdan kaynaklanmaktadır.

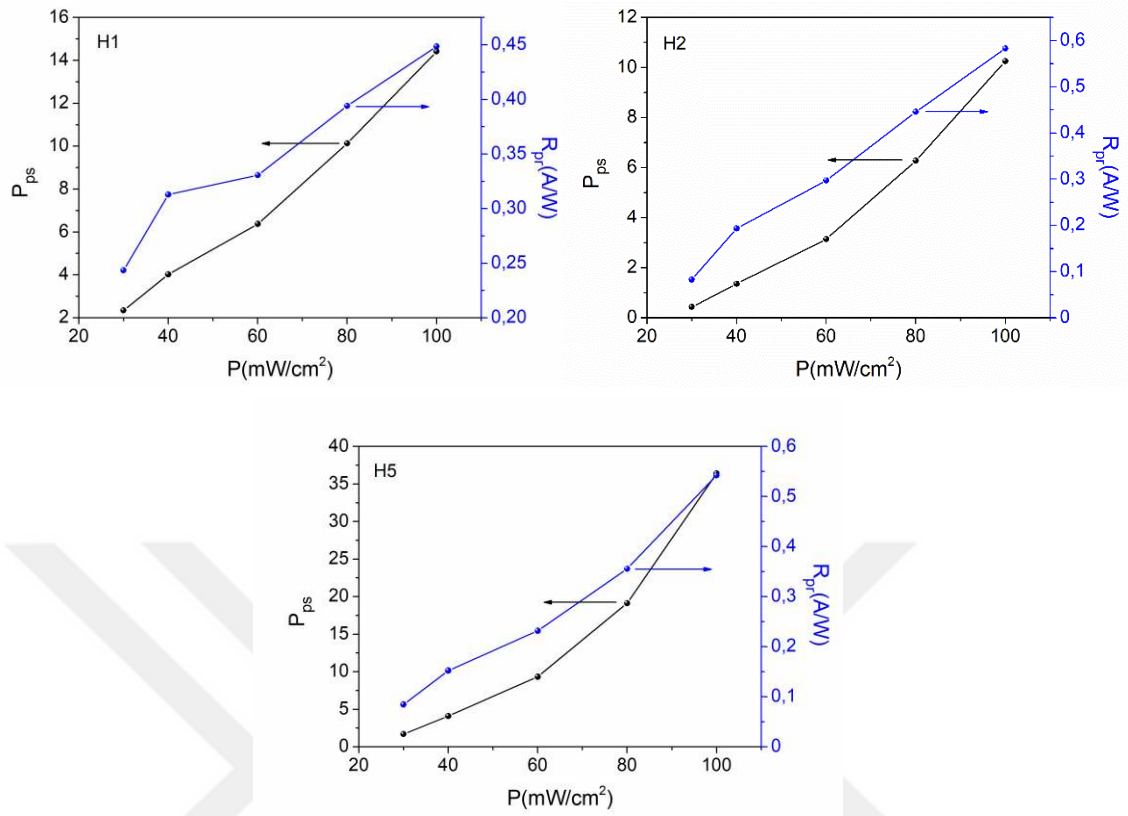
H2-TFT'nin on durumu hariç tüm p-Si/HfO₂/SnO₂-TFT'lerin R_{pr} değerleri artan aydınlatma şiddetiyle artmıştır. H2-TFT'de R_{pr} önce artmakta, 40 mW/cm²'den sonra azalmakta, sonrasında hafifçe artıp tekrar azalmaktadır. P_{ps} arttıkça R_{pr} deki bu azalmaya Bölüm 6.1.5'te detaylı olarak açıklandığı gibi yüksek taşıyıcı konsantrasyonlarında,

yüksek mobiliteli yük taşıyıcıların rekombinasyonundaki artışın neden olduğu düşünülmektedir.

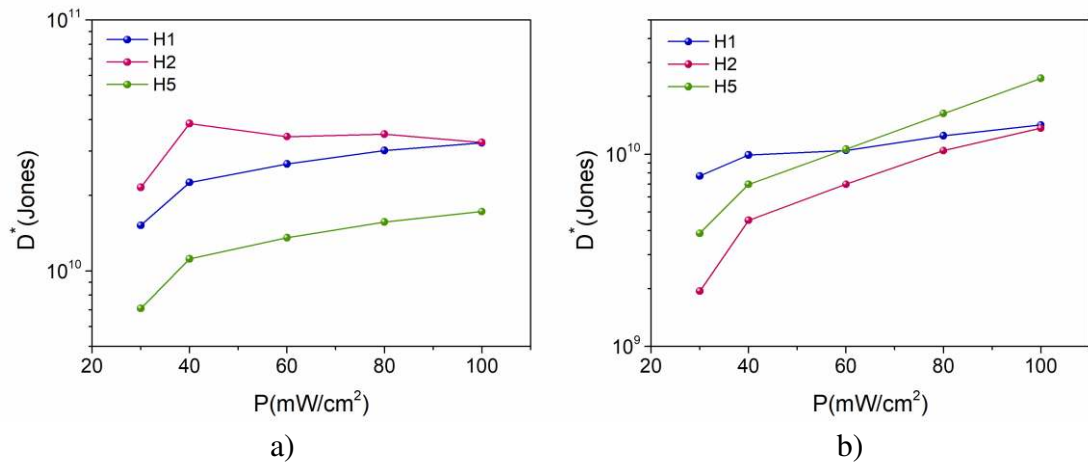
p-Si/HfO₂/SnO₂-TFT'lerin Eşitlik 2.11 kullanılarak farklı aydınlatma şiddetlerinde elde edilen on ve off durumları için dedektivite grafikleri Şekil 6.19'da verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, artan ışık şiddeti on durumunda H1-TFT ve H5-TFT için dedektivitede artışa sebep olurken, H2-TFT'de düzgün bir artışa sebep olmamıştır. Off durumunda ise H2 ve H5-TFT'lerin dedektivitesindeki artış H1-TFT'ye göre daha fazladır. Sonuç olarak, H5-TFT'nin hem on hem de off durumundaki ışık şiddetindeki artışa bağlı dedektivite değerleri yaklaşık aynı kalırken, on durumunda H2-TFT 40 mW/cm² aydınlatma şiddeti altında $3,87 \times 10^{10}$ Jones ile en yüksek dedektivite değerini göstermiştir.



Şekil 6.17. p-Si/HfO₂/SnO₂-TFT'lerin on durumunda aydınlatma şiddetlerine bağlı olarak fotoduyarlılık ve fototepki değerlerinin değişimi

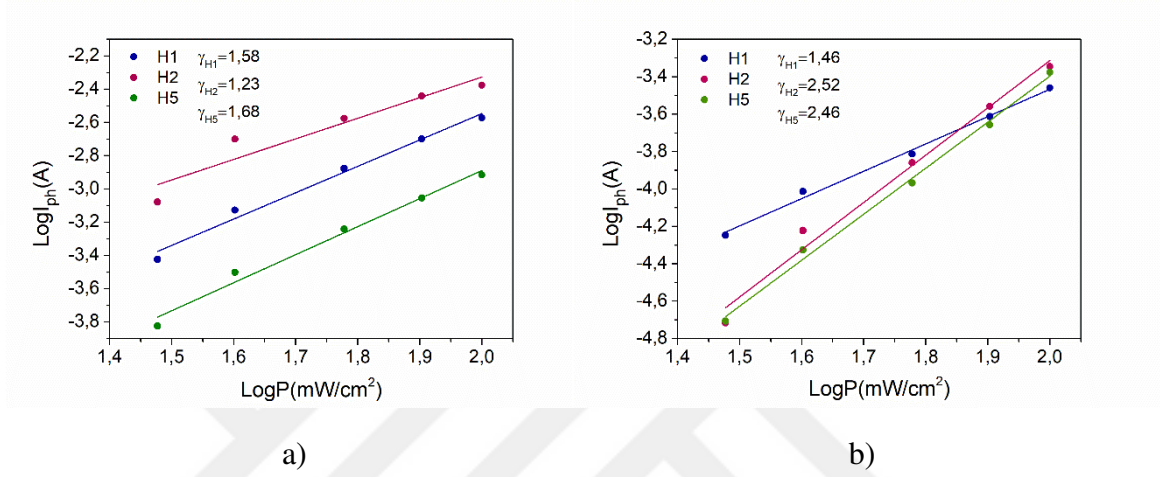


Şekil 6.18. $p\text{-Si}/\text{HfO}_2/\text{SnO}_2\text{-TFT}$ 'lerin off durumunda aydınlatma şiddetlerine bağlı olarak fotoduyarlılık ve fototepki değerlerinin değişimi



Şekil 6.19. $p\text{-Si}/\text{HfO}_2/\text{SnO}_2\text{-TFT}$ 'lerin a) on b) off durumunda aydınlatma şiddetlerine bağlı olarak dedektivite değerlerinin değişimi

Şekil 6.20'de, H1, H2 ve H5-TFT'lere ait $\log(I_{ph})$ - $\log(P)$ grafikleri ve bu grafiklerin eğiminden hesaplanan γ değerleri verilmiştir. γ değerleri, tüm TFT'ler için 1'den büyüktür ve fotoakımdaki bu artış bir süperlineer fotoiletkenlik mekanizmasının baskın olduğu anlamına gelmektedir. Aynı zamanda γ değerinin 1'den büyük olması düşük yoğunluklu boş tuzak seviyelerinin var olduğu [104] ve lokalize durumların bant aralığına düzensiz bir şekilde yerleştirildiği anlamına gelmektedir [105].



Şekil 6.20. p -Si/HfO₂/SnO₂-TFT'lerin a) on durumu, b) off durumu $\log I_{ph}$ - $\log P$ grafikleri

7. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, SnO₂ aktif yarıiletken tabakası sol-jel spin kaplama yöntemiyle oluşturulmuş olan alan etkili ince film transistörlerin fabrikasyonu yapılmıştır. Elde edilen transistörlerde SiO₂ ve HfO₂ olarak iki farklı dielektrik tabaka kullanılmış ve bu dielektrik tabakaların kalınlıklarındaki değişime bağlı olarak TFT'lerin elektriksel performansları incelenmiştir. Farklı dielektrik sabitlerine sahip olan iki dielektrik tabakanın farklı kalınlıklardaki tabakaları n-Si ve p-Si tek kristal alttaşlar üzerine büyütülmüştür.

Çalışmanın ilk aşamasında, ticari olarak satın alınmış, 100 nm, 150 nm, 200 nm, 250 nm ve 300 nm kalınlıklarında n-Si tek kristal alttaş üzerine termal olarak büyütülmüş SiO₂ dielektrik tabakaları kullanılmıştır. İkinci aşamada ise p-Si tek kristal alttaşlar üzerine, 29 nm, 56 nm ve 136 nm kalınlıklarına sahip 3 farklı HfO₂ dielektrik tabakası sol-jel spin kaplama yöntemi ile elde edilmiştir. Fabrikasyonu yapılan tüm TFT'lerde TC/BG yapısı kullanılmış, drain ve source için vakumda buhar depolama yöntemiyle altın kontaklar oluşturulmuş, gate kontak olarak alüminyum ve gümüş pasta kullanılmıştır.

Aktif yarıiletken tabaka olarak kullanılan SnO₂ filminin oksidasyon durumları XPS analizi ile belirlenmiştir. XPS analiz sonuçları, yapıda hem SnO hem de SnO₂ fazlarının bulunduğunu, ancak SnO₂ fazının baskın olduğunu ortaya koymuştur.

SnO₂ ve HfO₂ yüzeylerinin yapısal özelliklerini belirlemek amacıyla XRD spektrumları alınmıştır. SnO₂ filmleri çok ince olduğu için amorf yapıda bir spektrum elde edilmiştir. HfO₂'in ise monoklinik yapıda olduğu ve kalınlıktaki artışla birlikte kristal yapının iyileştiği gözlenmiştir. HfO₂ filmlerine ait kristal boyutları kalınlığın artmasıyla artmış ve 20 nm, 21 nm ve 26 nm olarak hesaplanmıştır.

Aktif tabaka olarak kullanılan SnO₂ yarıiletken filmlerinin optik özelliklerini ve yasak enerji aralığını belirlemek amacıyla cam alttaş üzerine kaplanmış filmlerin geçirgenlik ve absorpsiyon spektrumları alınmıştır. Alınan spektrumlar sonucunda cam alttaşlar üzerine kaplanmış SnO₂ ince filmlerinin yaklaşık %88 optik geçirgenliğe sahip oldukları ve Tauc eğrileri sayesinde yasak enerji aralığının 3,61 eV olduğu hesaplanmıştır.

Elde edilen TFT'lerin elektriksel performansında önemli rol oynayan yüzey özellikleri AFM ve SEM kullanılarak incelenmiştir. Farklı kalınlıklardaki SiO₂, HfO₂ dielektrik tabakalarının SnO₂ ile kaplanmadan önce ve kaplandıktan sonra AFM

görüntüleri alınmış, yüzey pürüzlülük değerleri belirlenmiştir. SiO₂ dielektrik tabakaları üzerine SnO₂ kaplandıktan sonra S150 numunesi dışındaki tüm yüzeylerde volkan şeklindeki boşluklar görülmüştür. Literatürde benzer örnekleri bulunan bu yüzey etkisinin, sol-jel yönteminde işlem sırasındaki sıcaklık farklılıklarından, çözeltinin konsantrasyonundan veya hızlı çözücü buharlaşması nedeniyle çözeltinin viskozitesinin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. AFM analiz sonuçlarına göre en homojen yüzeyin S150-TFT'ye ait olduğu görülmüştür. HfO₂ ve üzerine kaplanan SnO₂ yüzeyleri ise homojen olarak kaplanmış ve rms değerleri kalınlık arttıkça artmıştır.

SEM ile yalıtkan tabakalardan görüntü almak mümkün olmadığı için sadece SnO₂ yarıiletken aktif tabakalarının SEM görüntüleri alınmıştır. SiO₂'lerin üzerindeki SnO₂ yüzeylerinde AFM'den alınan görüntülere benzer şekilde 400-600 nm çapında halkalar görülmüştür. HfO₂ üzerindeki SnO₂ yüzeylerinde ise kalınlık arttıkça yüzey kusurlarında artış görülmüştür. HfO₂ dielektrik tabakalarının kalınlıkları SEM ile dik kesitten alınan görüntülerden belirlenmiştir. Ayrıca oluşturulan HfO₂ dielektrik tabakalarının element analizini gerçekleştirmek için SEM cihazına entegre EDS detektörü kullanılmış ve Hf ve O piklerinin varlığı doğrulanmıştır.

Üretilen TFT'lerin mobilite, eşik voltajı, açık kapalı akım oranı ve alt eşik salınım değeri gibi elektriksel parametreleri karanlık ortamda alınan ölçümlerle hesaplanmıştır. SiO₂ dielektrik tabaka kalınlığının 100 nm'den 150 nm'ye artması ile, TFT'lerin mobilite değerlerinde 0,3 cm²/Vs'den 7,1 cm²/Vs'ye önemli derecede bir artış görülmüştür. Aynı zamanda $I_{on/off}$ oranında da yaklaşık 10 kat bir artış gözlenmiştir. 150 nm'nin üzerindeki SiO₂ dielektrik tabaka kalınlığındaki artışlarda ise hem mobilite hem de $I_{on/off}$ oranlarında kademeli bir düşüş görülmektedir. n-Si/SiO₂/SnO₂-TFT'ler için en yüksek mobilite değeri ve $I_{on/off}$ oranı sırasıyla 7,1 cm²/Vs ve 6,98x10⁴ olarak S150-TFT'de elde edilmiş ve optimum SiO₂ dielektrik tabaka kalınlığı 150 nm olarak belirlenmiştir. Elbette, yüzey özellikleri ve aktif tabaka ile dielektrik arasındaki ara yüzeyde veya yakınındaki tuzaklar da TFT'lerin elektriksel performansında önemli bir rol oynamaktadır. Bu kapsamda dielektrik/aktif tabaka ara yüzey tuzak durum yoğunlukları hesaplanmış ve bu değerler artan dielektrik kalınlığı ile artış göstermiştir. AFM analiz sonuçlarından da S150-TFT'nin yüzeyinin daha homojen olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, S150-TFT'nin gözlenen yüksek elektriksel performansı, daha homojen ve pürüzsüz bir yüzeye sahip olması ve aynı zamanda SiO₂/SnO₂ ara yüzeyinde veya yakınındaki tuzakların yoğunluğunun daha az olması ile açıklanabilir.

Çalışmanın ilk aşamasında elde edilen TFT'lerin transfer eğrisinde gate voltajının ileri ve geri yönlü taramaları sırasında I_{DS} akım değerlerinde oluşan farkı belirleyen histerezis eğrilerinin saat yönünde olduğu gözlenmiştir. Dielektrik tabaka kalınlığı arttıkça ΔV_{Th} 'ın artması, SiO_2 dielektriği ile SnO_2 aktif tabakası arasındaki ara yüzey yakınında veya dielektrik içinde bulunan tuzakların artan kalınlıkla arttığını göstermektedir.

İkinci aşamada elde edilen HfO_2 dielektrik tabakalı TFT'lerin HfO_2 'in kalınlığına bağlı olarak elde edilen elektriksel performanslarında, dielektrik tabakanın kalınlığının artmasıyla mobilite ve $I_{on/off}$ oranının azaldığı görülmektedir. En yüksek μ değeri $26,71 \text{ cm}^2/Vs$ ile 29 nm kalınlığa sahip H1-TFT'de elde edilmiştir. H1-TFT'de mobilite değerinin yüksek olmasında, HfO_2 'nin yüksek dielektrik sabitine sahip olması, dielektrik tabakanın daha ince olması ve en düşük SS değerine sahip olması etkili olmuştur. AFM analizlerinden elde edilen sonuçlarda dielektrik tabaka yüzeyinin pürüzlülük değerleri kalınlık arttıkça artış göstermiştir. Dolayısıyla daha ince HfO_2 dielektrik tabakasının kalın olanlara kıyasla daha az pürüzlülüğe sahip olması da mobilite üzerinde etkili olmuştur.

Yüksek dielektrik sabitli HfO_2 dielektriğine sahip olan TFT'lerde, SiO_2 dielektrik tabakalarına sahip TFT'lere göre daha ince dielektrik tabaka kalınlıklarında daha yüksek mobilite değerleri elde edilmiştir. Aynı zamanda bu TFT'lerin daha düşük voltajlarda çalıştıkları görülmektedir. Daha yüksek dielektrik sabitlerine sahip yalıtkanlar kullanılarak tuzak durumlarını işgal etmek için yeterli sayıda taşıyıcı, çok daha düşük V_{GS} gerilimlerinde elektrik alan etkisiyle üretebilmektedir. Yük taşıyıcılarının daha düşük voltajlarda yüksek mobilite ile serbestçe hareket etmeleri, cihaz üzerinde daha etkili ve verimli bir kontrol sağlamaktadır. Bu durum, SiO_2 dielektrik tabakası kullanılarak üretilen TFT'lerle karşılaştırıldığında, HfO_2 dielektrik tabakalı SnO_2 TFT'lerde daha düşük voltajlarda daha yüksek mobilitelerin elde edilmesini sağlamıştır.

Dielektrik tabaka kalınlığının azaltılması veya yüksek dielektrik sabitlerine sahip dielektriklerin kullanılması TFT'lerin elektriksel performansını iyileştirmek için kullanılabilecek tekniklerdir. Bu yaklaşımların her ikisi de daha yüksek dielektrik kapasitansına yol açarak TFT'lerin çalışma voltajlarında düşüşe neden olur. Dolayısıyla bu çalışmada dielektrik tabakanın mobilite üzerindeki etkisi kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Dielektrik tabakanın kalınlığının, dielektrik sabitinin, yüzey

pürüzlülüğünün ve tuzak durumlarının kanaldaki taşıyıcıların mobilitelerini önemli ölçüde etkileyen faktörler olduğu belirlenmiştir.

Elde edilen tüm TFT'lerin ışığa karşı duyarlılıklarının belirlenmesi için farklı aydınlatma şiddetlerinde gerçekleştirilen elektriksel ölçümler ve incelenen fotoduyarlılık ile fototepki değerleri, tüm TFT'lerin fototransistör davranışı sergilediğini göstermektedir. Tüm transistörlerin fotoakım değeri artan ışık şiddetiyle artış göstermiştir. SiO₂ dielektrik tabakaya sahip TFT'lerin fototepki değerleri de artan ışık şiddeti ile artarken optimum dielektrik kalınlığına sahip S150-TFT, diğerlerine göre fototepki değişiminde farklı bir karakter sergilemiştir. Bunun nedeninin yüksek taşıyıcı konsantrasyonlarında, yüksek mobiliteli yük taşıyıcıların rekombinasyonundaki artış olduğu düşünülmektedir. Farklı aydınlatma şiddetleri altında alınan ölçümler sonucunda en yüksek fotoduyarlılık ve fototepki değerlerine sahip olan S250-TFT, en iyi fototransistör performansını göstermiştir. p-Si/HfO₂/SnO₂-TFT'ler de ise H2-TFT fototepki değişiminde S150 ye benzer farklı bir karakter sergilemiş ve farklı aydınlatma şiddetleri altında en iyi fototransistör performansını göstermiştir. Çalışmamız kapsamında elde edilen tüm TFT'lerin ışığa tepki vermesi nedeniyle, bu yapıda üretilen SnO₂ tabanlı TFT'lerin optoelektronik uygulamalarda fotosensör olarak kullanılabileceğini düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] Yarub. Al-Douri, Metal oxide powder technologies : fundamentals, processing methods, and applications, Elsevier, (2020).
- [2] M. Caglar, K. Sever, S. Aktas, A. Demiroglu, Improving the electrical performance of NiO based photodiode fabricated by sol-gel process with Al doping, *Sens Actuators A Phys* 350 (2023) 114099.
- [3] Y. Caglar, M. Caglar, S. Ilcan, S. Aksoy, F. Yakuphanoglu, Effect of channel thickness on the field effect mobility of ZnO-TFT fabricated by sol gel process, *J Alloys Compd* 621 (2015) 189–193.
- [4] Y. Masuda, Recent advances in SnO₂ nanostructure based gas sensors, *Sens Actuators B Chem* 364 (2022) 131876.
- [5] A. Kaphle, E. Echeverria, D.N. McLlroy, P. Hari, Enhancement in the performance of nanostructured CuO-ZnO solar cells by band alignment, *RSC Adv* 10 (2020) 7839–7854.
- [6] N.P. Shetti, S.D. Bukkitgar, K.R. Reddy, C.V. Reddy, T.M. Aminabhavi, ZnO-based nanostructured electrodes for electrochemical sensors and biosensors in biomedical applications, *Biosens Bioelectron* 141 (2019) 111417.
- [7] J. Liu, J. Lv, H. Xiong, Y. Wang, G. Jin, Z. Zhai, C. Fu, Q. Zhang, Size effect and comprehensive mathematical model for gas-sensing mechanism of SnO₂ thin film gas sensors, *J Alloys Compd* 898 (2022) 162875.
- [8] Y. Wang, P. Xiang, A. Ren, H. Lai, Z. Zhang, Z. Xuan, Z. Wan, J. Zhang, X. Hao, L. Wu, M. Sugiyama, U. Schwingenschlögl, C. Liu, Z. Tang, J. Wu, Z. Wang, D. Zhao, MXene-Modulated Electrode/SnO₂ Interface Boosting Charge Transport in Perovskite Solar Cells, *ACS Applied Materials & Interfaces* 12 (2020) 53973–53983.
- [9] Y. Wang, H. Zhang, W. Ji, Efficient Quantum-Dot Light-Emitting Diodes Based on Solvent-Annealed SnO₂ Electron-Transport Layers, *ACS Appl Electron Mater* 5 (2023) 537–543.
- [10] S. Aktas, M. Caglar, Effect of SiO₂ gate insulator on electrical performance of solution processed SnO₂-Based thin film phototransistor, *Physica B Condens Matter* 670 (2023) 415337.
- [11] S.D. Brotherton, Introduction to thin film transistors: Physics and technology of TFTs, Springer International Publishing, (2013).
- [12] G. Korotcenkov, V. Brinzari, J. Schwank, M. DiBattista, A. Vasiliev, Peculiarities of SnO₂ thin film deposition by spray pyrolysis for gas sensor application, *Sens Actuators B Chem* 77 (2001) 244–252.
- [13] A.F. Khan, M. Mehmood, A.M. Rana, M.T. Bhatti, Effect of annealing on electrical resistivity of rf-magnetron sputtered nanostructured SnO₂ thin films, *Appl Surf Sci* 255 (2009) 8562–8565.

- [14] U. Farva, J. Kim, Growth temperature-dependent morphological, optical, and electrical study of SnO₂ thin film by atomic layer deposition, *Mater Chem Phys* 267 (2021) 124584.
- [15] R.D. Sakhare, G.D. Khuspe, S.T. Navale, R.N. Mulik, M.A. Chougule, R.C. Pawar, C.S. Lee, S. Sen, V.B. Patil, Nanocrystalline SnO₂ thin films: Structural, morphological, electrical transport and optical studies, *J Alloys Compd* 563 (2013) 300–306.
- [16] S. Sung, S. Park, W.-J. Lee, J. Son, C.-H. Kim, Y. Kim, D. Young Noh, M.-H. Yoon, Low-Voltage Flexible Organic Electronics Based on High-Performance Sol–Gel Titanium Dioxide Dielectric, *ACS Applied Materials & Interfaces* 7 (2015) 7456–7461.
- [17] Y. Li, P. Ma, J. Sun, G. Liang, Y. Li, Q. Xin, A. Song, Half-volt operation of IGZO thin-film transistors enabled by ultrathin HfO₂ gate dielectric, *Appl Phys Lett* 113 (2018).
- [18] J. hua Ren, Y. ting Huang, K. wen Li, J. Shen, W. yu Zeng, C. ming Sheng, J. jing Shao, Y. bing Han, Q. Zhang, Preparation of rare-earth thulium doped tin-oxide thin films and their applications in thin film transistors, *Appl Surf Sci* 493 (2019) 63–69.
- [19] M.L. Green, T.W. Sorsch, G.L. Timp, D.A. Muller, B.E. Weir, P.J. Silverman, S. V. Moccio, Y.O. Kim, Understanding the limits of ultrathin SiO₂ and Si-O-N gate dielectrics for sub-50 nm CMOS, *Microelectron Eng* 48 (1999) 25–30.
- [20] T.E. Taouririt, A. Meftah, N. Sengouga, Effect of the interfacial (low-k SiO₂ vs high-k Al₂O₃) dielectrics on the electrical performance of a-ITZO TFT, *Applied Nanoscience (Switzerland)* 8 (2018) 1865–1875.
- [21] R. Oswal, Investigation of different dielectric materials as gate insulator for MOSFETs, (2014).
- [22] R.E. Presley, C.L. Munsee, C.-H. Park, D. Hong, J.F. Wager, D.A. Keszler, Tin oxide transparent thin-film transistors, *J Phys D Appl Phys* 37 (2004) 2810–2813.
- [23] J. Zhai, X. Zhang, F. Hai, X. Yu, R. Zhu, W. Zhang, Fabrication and characterization of thin-film transistors with SnO₂ channel by spray pyrolysis, *Jpn J Appl Phys* 53 (2014) 066506.
- [24] B.K. Lee, E. Jung, S.H. Kim, D.C. Moon, S.S. Lee, B.K. Park, J.H. Hwang, T.M. Chung, C.G. Kim, K.S. An, Physical/chemical properties of tin oxide thin film transistors prepared using plasma-enhanced atomic layer deposition, *Mater Res Bull* 47 (2012) 3052–3055.
- [25] L. Mai, D. Zanders, E. Subaşı, E. Ciftiyurek, C. Hoppe, D. Rogalla, W. Gilbert, T. de los Arcos, K. Schierbaum, G. Grundmeier, C. Bock, A. Devi, Low-Temperature Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition of Tin(IV) Oxide from a Functionalized Alkyl Precursor: Fabrication and Evaluation of SnO₂-Based Thin-Film Transistor Devices, *ACS Applied Materials & Interfaces* 11 (2019) 3169–3180.

- [26] W.Y. Lee, S.H. Ha, H. Lee, J.H. Bae, B. Jang, H.J. Kwon, J. Jang, Densification Control as a Method of Improving the Ambient Stability of Sol-Gel-Processed SnO₂ Thin-Film Transistors, *IEEE Electron Device Letters* 40 (2019) 905–908.
- [27] H. Chang, C.-H. Huang, K. Nomura, Low-Temperature Solution-Processed n-Channel SnO₂ Thin-Film Transistors and High-Gain Zero-VGS-Load Inverter, *ACS Appl Electron Mater* 3 (2021) 4943–4949.
- [28] C. Lee, W.Y. Lee, D.W. Kim, H.J. Kim, J.H. Bae, I.M. Kang, D. Lim, K. Kim, J. Jang, Extremely bias stress stable enhancement mode sol–gel-processed SnO₂ thin-film transistors with Y₂O₃ passivation layers, *Appl Surf Sci* 559 (2021) 149971.
- [29] W.-Y. Lee, D. Won Kim, H. Joong Kim, K. Kim, S.-H. Lee, J.-H. Bae, I.-M. Kang, K. Kim, J. Jang, Environmentally and Electrically Stable Sol–Gel-Deposited SnO₂ Thin-Film Transistors with Controlled Passivation Layer Diffusion Penetration Depth That Minimizes Mobility Degradation, *ACS Applied Materials & Interfaces* 14 (2022) 10558–10565.
- [30] N. Pal, B. Thakurta, R. Chakraborty, U. Pandey, V. Acharya, S. Biring, M. Pal, B.N. Pal, Application of a microwave synthesized ultra-smooth a-C thin film for the reduction of dielectric/semiconductor interface trap states of anoxide thin film transistor, *J Mater Chem C Mater* (2022).
- [31] V. Acharya, N. Pal, U. Pandey, A.K. Yadav, M. Suthar, P.K. Roy, S. Biring, B.N. Pal, High- κ SrTiO₃ thin film as gate dielectric of a solution processed SnO₂ thin film transistor, *Mater Sci Semicond Process* 155 (2023) 107228.
- [32] M. Caglar, Püskürtme yöntemiyle elde edilen In katkılı ZnO filmlerinin DC ve optik özellikleri, *Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2002).
- [33] D.A. Neamen, *Semiconductor physics and devices : basic principles*, McGraw-Hill, (2012).
- [34] J.I. Pankove, *Optical Processes in Semiconductors*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, (1971).
- [35] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, John Wiley & Sons, Inc, New York, (1986).
- [36] S. Das, V. Jayaraman, SnO₂: A comprehensive review on structures and gas sensors, *Prog Mater Sci* 66 (2014) 112–255.
- [37] G. Korotcenkov, *Metal Oxides*, Springer, (2013), pp. 49–116.
- [38] J. Wu, W.-Q. Han, A. Janotti, H.-C. Kim, *Functional metal-oxide nanostructures*, Springer Series in Materials Science, 149, (2012).
- [39] S. Naghdi, K. Rhee, D. Hui, S. Park, A Review of Conductive Metal Nanomaterials as Conductive, Transparent, and Flexible Coatings, Thin Films, and Conductive Fillers: Different Deposition Methods and Applications, *Coatings* 8 (2018) 278.

- [40] M.A. Gillispie, V.L. Dalal, M. Mina, Metal oxide-based transparent conducting oxides, (2006).
- [41] K. Ellmer, Resistivity of polycrystalline zinc oxide films: current status and physical limit, *J Phys D Appl Phys* 34 (2001) 3097–3108.
- [42] S. Rajendran, J. Qin, F. Gracia, Eric. Lichtfouse, *Metal and Metal Oxides for Energy and Electronics*, Springer, (2005).
- [43] G. Korotcenkov, Metal oxides for solid-state gas sensors: What determines our choice?, *Materials Science and Engineering: B* 139 (2007) 1–23.
- [44] K.J. Saji, Y.P. Venkata Subbaiah, K. Tian, A. Tiwari, P-type SnO thin films and SnO/ZnO heterostructures for all-oxide electronic and optoelectronic device applications, *Thin Solid Films* 605 (2016) 193–201.
- [45] J. Geurts, S. Rau, W. Richter, F.J. Schmitte, SnO films and their oxidation to SnO₂: Raman scattering, IR reflectivity and X-ray diffraction studies, *Thin Solid Films* 121 (1984) 217–225.
- [46] A. Mubeen, A. Majid, M. Alkhedher, E.M. Tag-ElDin, N. Bulut, Structural and Electronic Properties of SnO Downscaled to Monolayer, *Materials* 15 (2022) 5578.
- [47] M.H. Farooq, R. Hussain, L. Zhang, I. Aslam, M. Tanveer, M.W. Shah, M.Z. Iqbal, Fabrication, characterization and magnetic properties of Mn-doped SnO nanostructures via hydrothermal method, *Mater Lett* 131 (2014) 350–353.
- [48] E. Fortunato, R. Barros, P. Barquinha, V. Figueiredo, S.H.K. Park, C.S. Hwang, R. Martins, Transparent p-type SnO_x thin film transistors produced by reactive rf magnetron sputtering followed by low temperature annealing, *Appl Phys Lett* 97 (2010).
- [49] X. Guan, Z. Wang, M.K. Hota, H.N. Alshareef, T. Wu, P-Type SnO Thin Film Phototransistor with Perovskite-Mediated Photogating, *Adv Electron Mater* 5 (2019).
- [50] E. Eqbal, E.I. Anila, Properties of transparent conducting tin monoxide(SnO) thin films prepared by chemical spray pyrolysis method, *Physica B Condens Matter* 528 (2018) 60–65.
- [51] E. Fortunato, P. Barquinha, R. Martins, Oxide semiconductor thin-film transistors: A review of recent advances, *Advanced Materials* 24 (2012) 2945–2986.
- [52] L. Xiong, Y. Guo, J. Wen, H. Liu, G. Yang, P. Qin, G. Fang, Review on the Application of SnO₂ in Perovskite Solar Cells, *Adv Funct Mater* 28 (2018).
- [53] J. Jang, J. Clarke, All Inkjet-Printed SnO₂ /ZrO₂ Transistors, (2013).
- [54] Y.M. Poplavko, Dielectrics, *Electronic Materials* (2019) 287–408.
- [55] J. Zaumseil, H. Sirringhaus, Electron and Ambipolar Transport in Organic Field-Effect Transistors, *Chem Rev* 107 (2007) 1296–1323.

- [56] R.P. Ortiz, A. Facchetti, T.J. Marks, High-k organic, inorganic, and hybrid dielectrics for low-voltage organic field-effect transistors, *Chem Rev* 110 (2010).
- [57] W. Guogang, L. Jing Shanxi Jincheng, Y. Haijiao Chen Qiang Beijing Guodian Futong Science, Preparation Methods and Application of Silicon Oxide Films, (2014).
- [58] P.M. Tirmali, A.G. Khairnar, B.N. Joshi, A.M. Mahajan, Structural and electrical characteristics of RF-sputtered HfO₂ high-k based MOS capacitors, *Solid State Electron* 62 (2011) 44–47.
- [59] L. Kang, B. Hun Lee, W.-J. Qi, Y. Jeon, R. Nieh, S. Gopalan, K. Onishi, J.C. Lee, Electrical Characteristics of Highly Reliable Ultrathin Hafnium Oxide Gate Dielectric, (2000).
- [60] J. Bardeen, W.H. Brattain, The Transistor, A Semi-Conductor Triode, *Physical Review* 74 (1948) 230–231.
- [61] J. E. Lilienfield, U.S. Patent 1745175, (1930).
- [62] O. Heil, U.K. Patent 439457, (1935).
- [63] P.K. Weimert, The TFT A New Thin-Film Transistor, *IEEE*, (1962).
- [64] H.A. Klasens, H. Koelmans, A tin oxide field-effect transistor, *Solid State Electron* 7 (1964) 701–702.
- [65] M.W.J. Prins, K.O. Grosse-Holz, G. Müller, J.F.M. Cillessen, J.B. Giesbers, R.P. Weening, R.M. Wolf, A ferroelectric transparent thin-film transistor, *Appl Phys Lett* 68 (1996) 3650–3652.
- [66] R.L. Hoffman, B.J. Norris, J.F. Wager, ZnO-based transparent thin-film transistors, *Appl Phys Lett* 82 (2003) 733–735.
- [67] J.D. Cressler, Silicon Earth: A Historical Perspective on the Invention/Discovery of the Transistor, *IEEE Electron Devices Magazine* 1 (2023) 16–24.
- [68] C.R. Kagan, P. Andry, Thin-film transistors, Marcel Dekker, (2003).
- [69] J. Veres, S. Ogier, G. Lloyd, D. de Leeuw, Gate Insulators in Organic Field-Effect Transistors, *Chemistry of Materials* 16 (2004) 4543–4555.
- [70] S. Kazim, V. Ali, M. Zulfequar, M. Mazharul Haq, M. Husain, Electrical transport properties of poly[2-methoxy-5-(2'-ethyl hexyloxy)-1,4-phenylene vinylene] thin films doped with acridine orange dye, *Physica B Condens Matter* 393 (2007) 310–315.
- [71] C.R. Paul Inbaraj, V. Kumar Gudelli, R. Jesus Mathew, R. Kumar Ulaganathan, R. Sankar, H. Yu Lin, H.-I. Lin, Y.-M. Liao, H.-Y. Cheng, K.-H. Lin, F. Cheng Chou, Y.-T. Chen, C.-H. Lee, G.-Y. Guo, Y.-F. Chen, Sn-Doping Enhanced Ultrahigh Mobility In_{1-x}Sn_xSe Phototransistor, *ACS Applied Materials & Interfaces* 11 (2019) 24269–24278.
- [72] P. Irvin, Y. Ma, D.F. Bogorin, C. Cen, C.W. Bark, C.M. Folkman, C.B. Eom, J. Levy, Rewritable nanoscale oxide photodetector, *Nat Photonics* 4 (2010) 849–852.

- [73] D.B. Velusamy, R.H. Kim, S. Cha, J. Huh, R. Khazaeinezhad, S.H. Kassani, G. Song, S.M. Cho, S.H. Cho, I. Hwang, J. Lee, K. Oh, H. Choi, C. Park, Flexible transition metal dichalcogenide nanosheets for band-selective photodetection, *Nat Commun* 6 (2015).
- [74] V. Klee, E. Preciado, D. Barroso, A.E. Nguyen, C. Lee, K.J. Erickson, M. Triplett, B. Davis, I.H. Lu, S. Bobek, J. McKinley, J.P. Martinez, J. Mann, A.A. Talin, L. Bartels, F. Léonard, Superlinear Composition-Dependent Photocurrent in CVD-Grown Monolayer $\text{MoS}_2(1-x)\text{Se}_2x$ Alloy Devices, *Nano Lett* 15 (2015) 2612–2619.
- [75] J. Epp, X-ray diffraction (XRD) techniques for materials characterization, *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods* (2016) 81–124.
- [76] M. Rudan, *Physics of Semiconductor Devices*, Springer New York, (2015).
- [77] M. Kwoka, L. Ottaviano, M. Passacantando, S. Santucci, G. Czempik, J. Szuber, XPS study of the surface chemistry of L-CVD SnO_2 thin films after oxidation, *Thin Solid Films* 490 (2005) 36–42.
- [78] J. Szuber, G. Czempik, R. Larciprete, D. Koziej, B. Adamowicz, XPS study of the L-CVD deposited SnO_2 thin films exposed to oxygen and hydrogen, *Thin Solid Films* 391 (2001) 198–203.
- [79] I.M. El Radaf, T.A. Hameed, G.M. El komy, T.M. Dahy, Synthesis, structural, linear and nonlinear optical properties of chromium doped SnO_2 thin films, *Ceram Int* 45 (2019) 3072–3080.
- [80] W. Zhou, Y. Liu, Y. Yang, P. Wu, Band Gap Engineering of SnO_2 by Epitaxial Strain: Experimental and Theoretical Investigations, *The Journal of Physical Chemistry C* 118 (2014) 6448–6453.
- [81] N. Xia, R.A. Gerhardt, Fabrication and characterization of highly transparent and conductive indium tin oxide films made with different solution-based methods, *Mater Res Express* 3 (2016).
- [82] V.-H. Tran, R. B. Ambade, S. B. Ambade, S.-H. Lee, I.-H. Lee, Low-Temperature Solution-Processed SnO_2 Nanoparticles as a Cathode Buffer Layer for Inverted Organic Solar Cells, *ACS Applied Materials & Interfaces* 9 (2017) 1645–1653.
- [83] A. Rosales, L. Ortiz-Frade, I.E. Medina-Ramirez, L.A. Godínez, K. Esquivel, Self-cleaning of $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ coating: Effect of sonochemical synthetic parameters on the morphological, mechanical, and photocatalytic properties of the films, *Ultrason Sonochem* 73 (2021) 105483.
- [84] V. Acharya, N. Pal, A. Sharma, U. Pandey, M. Suthar, P. Kumar Roy, S. Biring, B.N. Pal, Solution processed low operating voltage SnO_2 thin film transistor by using $\text{Li}_2\text{SnO}_3/\text{TiO}_2$ stacked gate dielectric, *Materials Science and Engineering: B* 289 (2023) 116270.
- [85] P. D.M., R. Mannam, M.S.R. Rao, N. DasGupta, Effect of annealing ambient on SnO_2 thin film transistors, *Appl Surf Sci* 418 (2017) 414–417.

- [86] M. Egginger, S. Bauer, R. Schwödiauer, H. Neugebauer, N.S. Sariciftci, Current versus gate voltage hysteresis in organic field effect transistors, *Monatsh Chem* 140 (2009) 735–750.
- [87] S.W. Wright, J.C. Anderson, Slow states in SiO₂/CdSe thin film transistors, *Thin Solid Films* 62 (1979) 297–302.
- [88] M. Ke, X. Yu, C. Chang, M. Takenaka, S. Takagi, Properties of slow traps of ALD Al₂O₃/GeO_x/Ge nMOSFETs with plasma post oxidation, *Appl Phys Lett* 109 (2016).
- [89] Y. Peng, F. Huang, J. Zhang, X. Luo, K. Xu, W. Lv, S. Xu, Y. Wang, Y. Tang, Y. Wei, Z. Xu, Y. Yang, F. Lu, Broad spectral response photosensitive organic field-effect transistors realized by the hybrid planar-bulk heterojunction composed of three molecules with complementary optical absorption, *Org Electron* 43 (2017) 27–32.
- [90] H. Choi, S. Seo, J.H. Lee, S.H. Hong, J. Song, S. Kim, S.Y. Yim, K. Lee, S.J. Park, S. Lee, Solution-processed ZnO/SnO₂ bilayer ultraviolet phototransistor with high responsivity and fast photoresponse, *J Mater Chem C Mater* 6 (2018) 6014–6022.
- [91] A.K. Singh, N.K. Chourasia, B.N. Pal, A. Pandey, P. Chakrabarti, Low operating voltage solution processed (LiZnO) Dielectric and (SnO) channel-based medium wave UV-B phototransistor for application in phototherapy, *IEEE Trans Electron Devices* 67 (2020) 2028–2034.
- [92] F. Yakuphanoglu, S. Mansouri, Photosensitivity n-channel ZnO phototransistor for optoelectronic applications: Modeling of ZnO TFT, *Microelectronics Reliability* 51 (2011) 2200–2204.
- [93] T.H. Chang, C.J. Chiu, W.Y. Weng, S.J. Chang, T.Y. Tsai, Z.D. Huang, High responsivity of amorphous indium gallium zinc oxide phototransistor with Ta₂O₅ gate dielectric, *Appl Phys Lett* 101 (2012).
- [94] F. Zhang, G. Liu, A. Liu, B. Shin, F. Shan, Solution-processed hafnium oxide dielectric thin films for thin-film transistors applications, *Ceram Int* 41 (2015) 13218–13223.
- [95] J.W. Liu, M.Y. Liao, M. Imura, H. Oosato, E. Watanabe, Y. Koide, Electrical characteristics of hydrogen-terminated diamond metal-oxide-semiconductor with atomic layer deposited HfO₂ as gate dielectric, *Appl Phys Lett* 102 (2013).
- [96] Z. Ren, D. Lv, J. Xu, K. Su, J. Zhang, D. Wang, Y. Wu, J. Zhang, Y. Hao, Performance of H-diamond MOSFETs with high temperature ALD grown HfO₂ dielectric, *Diam Relat Mater* 106 (2020) 107846.
- [97] V. Kumar Singh, B. Mazhari, Impact of scaling of dielectric thickness on mobility in top-contact pentacene organic thin film transistors, *J Appl Phys* 111 (2012).
- [98] C.D. Dimitrakopoulos, S. Purushothaman, J. Kyriassis, A. Callegari, J.M. Shaw, Low-Voltage Organic Transistors on Plastic Comprising High-Dielectric Constant Gate Insulators, *Science* 283 (1999) 822–824.

- [99] R. Chakraborty, N. Pal, U. Pandey, S. Pramanik, S. Paliwal, S. Suman, A. Gupta, A.K. Singh, P. Swaminathan, P.K. Roy, B.N. Pal, Fabrication of non-volatile memory transistor by charge compensation of interfacial ionic polarization of a ferroelectric gate dielectric, *Appl Mater Today* 33 (2023) 101862.
- [100] Y. Jang, W.H. Lee, Y.D. Park, D. Kwak, J.H. Cho, K. Cho, High field-effect mobility pentacene thin-film transistors with nanoparticle polymer composite/polymer bilayer insulators, *Appl Phys Lett* 94 (2009).
- [101] S. E. Fritz, T. Wilson Kelley, C. Daniel Frisbie, Effect of Dielectric Roughness on Performance of Pentacene TFTs and Restoration of Performance with a Polymeric Smoothing Layer, *J Phys Chem B* 109 (2005) 10574–10577.
- [102] C. Avis, J. Jang, Understanding the Origin of the Hysteresis of High-Performance Solution Processed Polycrystalline SnO₂ Thin-Film Transistors and Applications to Circuits, *Membranes (Basel)* 12 (2022).
- [103] C.W. Shih, T.J. Yen, A. Chin, C.F. Lu, W.F. Su, Low-Temperature Processed Tin Oxide Transistor with Ultraviolet Irradiation, *IEEE Electron Device Letters* 40 (2019) 909–912.
- [104] A.G. Al-Sehemi, K. Ocakoglu, M. Ince, A. Karabulut, A. Tataroğlu, A. Dere, A.A. Al-Ghamdi, F. Yakuphanoglu, The electronic and optoelectronic properties of Al/hydroxymethyl functionalized Zn(II)Pc/p-Si photonic device, *Polymer Bulletin* (2023).
- [105] B.A. Gozeh, A. Karabulut, C.B. Ismael, S.I. Saleh, F. Yakuphanoglu, Zn-doped CdO effects on the optical, electrical and photoresponse properties of heterojunctions-based photodiodes, *J Alloys Compd* 872 (2021) 159624.

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0000-0001-8634-512X

Ad Soyad : Seda AKTAŞ

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Geçmişi:

- 2011, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Lisans
- 2012, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Pedagojik Formasyon
- 2014, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik, Yüksek Lisans
- 2014, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Güvenliği, Yüksek Lisans
- 2015, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, B Sınıfı İş Güvenliği Uzmanlığı Belgesi
- 2020, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Optisyenlik
- 2023, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Katıhal Fiziği Bilim Dalı, Doktora

Yayınları ve Bilimsel Faaliyetleri:

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler:

Aktas, S., & Caglar, M. (2023). Effect of SiO₂ gate insulator on electrical performance of solution processed SnO₂-Based thin film phototransistor. *Physica B: Condensed Matter*, 670, 415337. <https://doi.org/10.1016/J.PHYSB.2023.415337>

Caglar, M., Sever, K., Aktas, S., & Demiroglu, A. (2023). Improving the electrical performance of NiO based photodiode fabricated by sol-gel process with Al doping. *Sensors and Actuators A: Physical*, 350, 114099. <https://doi.org/10.1016/J.SNA.2022.114099>

Aktas, S., Hasanli, I.S., Demiroglu, A., Caglar, M. (2024). Band gap tunability and optical properties of sol-gel derived Fe-doped CeO₂ films, *Physica B Condensed Matter*, 675 415621. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2023.415621>

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitaplarında Basılan Bildiriler:

Aktas S, Caglar M. (2022). SnO₂-TFT Fabrication and Characterization, 2nd International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences, March 10-13, 2022, Konya, Turkiye.

Aktas S, Caglar M. (2022). Effect of the Thickness of Dielectric Layer on Electrical Performance of SnO₂ Based-Phototransistor. 9th International Conference on Materials Science and Nanotechnology for Next Generation, September 22-24, Ankara, Turkiye.

Hurma T., Aktas S, Caglar M. (2022). Structural and Optical Properties of Mg_{1-x} In_xO Alloys. 14th International Conference on Nanomaterials (NANOCON 2022), October 19-21, Czech Republic.

Demiroglu A., Aktas S., Caglar Y., Caglar M. (2023). Influence of solution parameters on the XRD studies and optical constant of CeO₂ films. High Precision X-Ray Measurements 2023, June 19-23, Frascati, Italy.

Caglar Y., Aktas S., Demiroglu A., Caglar M. (2023). Physical Characterization of sol gel derived CeO₂ films. Condensed Matter Division of the European Physical Society (CMD30)-FisMat 2023, September 4-8, Milano, Italy.

Caglar M., Ekmekci B., Demiroglu A., Bagcıvan A., Hasanli I., Aktas S., Caglar Y. (2023). CeO₂ films with different dopants: Synthesis and structural, optical characterization. Condensed Matter Division of the European Physical Society (CMD30)-FisMat 2023, September 4-8, Milano, Italy.

Ulusal ve Uluslararası Projeler

Caglar M. (Proje Yürütücüsü), Aktas S. Sol-Jel Yöntemiyle Elde Edilen Kalay Oksit Filmlerinin Karakterizasyonu ve Fotosensör Uygulamaları, ESTÜBAP, 20DRP065, 2020-2023.