



**KAPLAMA BASINCININ AMORF InGaZnO İNCE FİLMER VE  
SCHOTTKY DİYOTLAR ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**Gürkan KURTULUŞ**

**DOKTORA TEZİ  
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ARALIK 2023**

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Gürkan KURTULUŞ

25/12/2023

# KAPLAMA BASINCININ AMORF InGaZnO İNCE FİLMER VE SCHOTTKY DİYOTLAR ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Gürkan KURTULUŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2023

## ÖZET

Bu tez çalışmasında amorf InGaZnO (a-IGZO) ince filmler ve Schottky diyotlar üzerinde Argon kaplama basıncı etkisinin araştırılması hedeflendi. Magnetron püskürtme yöntemi kullanılarak, n-Si ve cam alttaşlar üzerinde 5-30 mTorr arasında, 5'er mTorr aralıklar ile, farklı Argon basınçlarda 6 set InGaZnO ince film üretildi. Yapısal, morfolojik ve optik karakterizasyonları sırasıyla x-ışınları kırınımı (XRD), ikincil iyon kütle spektroskopisi (SIMS), atomik kuvvet mikroskobu (AFM), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve morötesi-görünür spektrometresi (UV-Vis) sistemleri ile analiz edildi. İnce filmlerin amorf yapısı düşük açılı x-ışınları ölçümleri, arayüzey homojenliği ve ince film kalınlıkları ise ikincil iyon kütle spektroskopisi ile belirlendi. Atomik kuvvet mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobu ile kaplama basıncının, ince filmlerin yüzey özelliklerine etkisi incelendi. Kaplama basıncındaki artışın ya da düşüşün, tane boyutunun veya yüzey morfolojisinin düzenli olarak iyileşmesi veya bozulması üzerinde sıralı bir etkisinin olmadığını belirlendi. Morötesi-görünür spektroskopisi ölçümlerinde, yasak enerji aralığının kaplama basıncının artması ile literatürdeki çalışmalara benzer şekilde 3,58 eV'dan 3,50 eV'a düştüğü görüldü. İnce film analizleri tamamlandıktan sonra, elektriksel karakterizasyonlar için diyot fabrikasyonları tamamlanarak AuNiGe/a-IGZO/n-Si/AuNiGe/Au Schottky diyot yapısı oluşturuldu. Diyotların akım-gerilim (I-V) karakteristikleri karanlık ortamda ve oda sıcaklığında ölçüldü. Doyma akımı ( $I_0$ ), idealite faktörü (n) ve bariyer yüksekliği ( $\phi_B$ ) termoiyonik emisyon teorisi kullanılarak belirlendi. Aynı zamanda seri direnç ( $R_s$ ), şönt direnci ( $R_{sh}$ ) Cheung fonksiyonları ve Norde metodu kullanılarak belirlendi. Yapılan analizler sonucunda elde edilen verilere göre 15-25 mTorr kaplama basınçlarında üretilen amorf a-IGZO ince filmler ve Schottky diyotların, diğerlerinden daha iyi sonuçlara sahip olduğu belirlendi.

Bilim Kodu : 20227

Anahtar Kelimeler : InGaZnO, IGZO, amorf, püskürtme, diyot, ince film, eş-püskürtme sistemi

Sayfa Adedi : 95

Danışman : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DEPOSITION PRESSURE ON AMORPHOUS  
InGaZnO THIN FILM AND SCHOTTKY DIODES

(Ph. D. Thesis)

Gürkan KURTULUŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2023

ABSTRACT

In this thesis, it has been aimed to investigate the Argon coating pressure effect on amorphous InGaZnO (a-IGZO) thin films and Schottky diodes. By using the magnetron sputtering method, 6 sets of InGaZnO thin films have been produced on n-Si and glass substrates at different Argon pressures between 5-30 mTorr, with 5 mTorr intervals. Structural, morphological and optical characterization have been analyzed by X-ray diffraction (XRD), secondary ion mass spectroscopy (SIMS), atomic force microscopy (AFM), scanning electron microscopy (SEM) and ultraviolet-visible spectrometry (UV-Vis) systems, respectively. The amorphous structure of the thin films has been determined by low-angle x-ray measurements, and the interfacial homogeneity and thin film thicknesses have been determined by secondary ion mass spectroscopy. The effect of coating pressure on the surface properties of thin films has been examined using atomic force microscopy and scanning electron microscopy. It has been determined that the increase or decrease in coating pressure has no sequential effect on the regular improvement or deterioration of grain size or surface morphology. In ultraviolet-visible spectroscopy measurements, it was determined that the forbidden energy gap decreased from 3,58 eV to 3,50 eV with increasing coating pressure, similar to studies in the literature. After the thin film analyzes were completed, diode fabrications were completed for electrical characterizations and the AuNiGe/a-IGZO/n-Si/AuNiGe/Au Schottky diode structure was created. Current-voltage (I-V) characteristics of the diodes have been measured in the dark and at room temperature. The saturation current ( $I_0$ ), ideality factor ( $n$ ) and barrier height ( $\phi_B$ ) have been determined using thermionic emission theory. Also, series resistance ( $R_s$ ) and shunt resistance ( $R_{sh}$ ) have been determined using Cheung functions and the Norde method. According to the data obtained as a result of the analysis, it can be said that a-IGZO thin films and Schottky diodes produced at 15-25 mTorr coating pressures have better results than others.

Science Code : 20227

Key Words : InGaZnO, IGZO, amorphous, sputtering, diode, thin film, co-sputtering system

Page Number : 95

Supervisor : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca desteklerini esirgemeyen, bilgi birikimi ve deneyimi her zaman yanımda olan, bizlere Gazi Üniversitesi Fotonik Araştırma Merkezinin kapısını açan ve merkezin tüm imkanlarını seferber eden danışman hocam Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e,

Hem tez çalışmalarım hem de diğer bilimsel aktivitelerde beni destekleyen ve her zaman yanımda olan Prof. Dr. Tarık ASAR ve Prof. Dr. Barış KINACI hocalarıma, değerli dostum Dr. Veysel BARAN'a, aynı zamanda Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezindeki tüm çalışma arkadaşlarıma,

Hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen, her türlü fedakarlıkta bulunan ve bu günlere gelmemdeki en büyük pay sahibi olan canım aileme,

Emekleri ve destekleri için en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Bu tez 2019K12-149045 nolu ve "Fotonik Malzeme ve Elektro-optik Aygıt Geliştirilmesi" isimli proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden ötürü T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	x
RESİMLERİN LİSTESİ .....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. YARIİLETKENLER HAKKINDA GENEL BİLGİLER.....	5
2.1. Yarıiletkenler.....	5
2.1.1. Katkısız (saf) yarıiletkenler.....	6
2.1.2. Katkılı yarıiletkenler .....	7
2.1.3. Metal oksit yarıiletkenler.....	10
2.2. Şeffaf İletken Oksitler .....	11
2.3. Amorf Oksit Yarıiletkenler .....	12
2.3.1. Amorf oksit yarıiletken fiziği .....	15
3. METAL-YARIİLETKEN (MS) KONTAKLAR TEORİSİ.....	19
3.1. MS Kontaklar .....	19
3.1.1. MS (n-tipi) ohmik kontak oluşumu.....	21
3.1.2. MS (n-tipi) doğrultucu kontak oluşumu.....	23
3.2. MS Kontaklarda Akım-İletim Mekanizmaları .....	26
3.2.1. Termoyonik emisyon teorisi .....	27
3.2.2. Difüzyon teorisi .....	31
3.2.3. Tükenim bölgesi üretim ve yeniden birleşme.....	32

	<b>Sayfa</b>
3.2.4. Kuantum mekaniksel tünelleme .....	33
3.2.5. $T_0$ etkili akım iletimi .....	35
<b>4. METOD VE MALZEME ÜRETİMİ .....</b>	<b>37</b>
4.1. Tez Kapsamında Kullanılan Sistemler .....	37
4.1.1. İnce film üretim ve geliştirme sistemleri.....	37
4.1.2. İnce film karakterizasyon teknikleri .....	40
4.2. a-IGZO İnce Filmlerin ve Doğrultucu Kontakların Üretim Süreci.....	49
4.2.1. Ohmik kontakın oluşturulması .....	49
4.2.2. Alttaş temizleme prosedürü.....	50
4.2.3. a-IGZO ince filmlerin üretilmesi.....	51
4.2.4. Doğrultucu kontak yapılarının oluşturulması .....	51
<b>5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....</b>	<b>55</b>
5.1. Farklı Kaplama Basınçlarında Üretilen a-IGZO İnce Filmlerin Analizleri .....	55
5.1.1. Yapısal analizler .....	55
5.1.2. Morfolojik analizler .....	59
5.1.3. Optik analizler.....	64
5.2. Farklı Kaplama Basınçlarında Üretilen a-IGZO Schottky diyot analizleri.....	68
5.2.1. Termiyonik emisyon teorisi ile diyot parametrelerinin belirlenmesi .....	68
5.2.2. Cheung ve Norde fonksiyonları ile diyot parametrelerin belirlenmesi .....	71
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>77</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>81</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>95</b>

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Şeffaf iletken oksit oluşturabilecek adaylar ve elektronik konfigürasyonları .....	11
Çizelge 2.2. Bazı şeffaf iletken oksitlerin özellikleri.....	12
Çizelge 3.1. İş fonksiyonlarına göre yarıiletken ve metal kontak türleri.....	20
Çizelge 4.1. Ohmik kontak oluşturma parametreleri .....	50
Çizelge 4.2. Farklı kaplama basınçlarında üretilen numunelerin biriktirme parametreleri .....	51
Çizelge 4.3. Doğrultucu kontak oluşturma parametreleri .....	52
Çizelge 5.1. Termoyonik teorisi ile hesaplanan a-IGZO Schottky diyot I-V sonuçları	70
Çizelge 5.2. a-IGZO Schottky diyotların tüm I-V sonuçları .....	75

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Yalıtkan, yarıiletken ve metallerde enerji bant şematikleri.....	6
Şekil 2.2. 0 K ve yüksek sıcaklık değerlerinde saf yarıiletkenin enerji bant şematığı ...	6
Şekil 2.3. n-tipi yarıiletken enerji bant şematığı.....	8
Şekil 2.4. p-tipi yarıiletken enerji bant şematığı.....	9
Şekil 2.5. Kristal ve kristal olmayan yapı şematikleri.....	13
Şekil 2.6. Kristal ve amorf yarıiletkenlerde taşıyıcı iletim yollarını gösteren şematik yörünge çizimleri.....	16
Şekil 2.7. Silisyum ve iyonik oksit yarıiletkenlerinin şematik elektronik yapıları.....	17
Şekil 3.1. Doğrultucu ve ohmik kontaklar için akım-gerilim grafikleri.....	19
Şekil 3.2. MS (n-tipi) ohmik kontak bant şematikleri.....	22
Şekil 3.3. MS (n-tipi) ohmik kontakın gerilim altında bant şematikleri.....	22
Şekil 3.4. MS (n-tipi) için doğrultucu kontak bant şematikleri.....	24
Şekil 3.5. MS (n-tipi) doğrultucu kontakın gerilim altında bant şematikleri.....	25
Şekil 3.6. MS (n-tipi) yapısında akım-iletim mekanizmaları.....	27
Şekil 3.7. MS (n-tipi) doğrultucu kontak için TE mekanizma şematığı.....	28
Şekil 3.8. MS (n-tipi) doğrultucu kontaklar için kuantum mekaniksel tünelleme bant şematikleri.....	34
Şekil 3.9. Farklı akım-iletim mekanizmalarının voltaja bağlı $nkT/q - kT/q$ eğrileri.....	36
Şekil 4.1. Püskürtme tekniği şematik gösterimi.....	38
Şekil 4.2. Kristal düzlemlerden X-ışınının saçılması.....	41
Şekil 4.3. Atomik kuvvet mikroskobunun şematik gösterimi.....	42
Şekil 4.4. İkincil iyon püskürtme mekanizmasının şematik gösterimi.....	44
Şekil 4.5. Taramalı elektron mikroskobunun şematik gösterimi.....	47
Şekil 4.6. Si ve cam alttaşları temizlemek için kullanılan temizlik prosedürü.....	50
Şekil 4.7. Schottky kontak oluşturmak için kullanılan maske şematığı.....	52
Şekil 4.8. Schottky diyot yapıların üretim aşamalarının şematığı.....	53

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.1. a-IGZO ince filmlerin XRD desenleri .....	56
Şekil 5.2. a-IGZO ince filmlerin GIXRD desenleri .....	57
Şekil 5.3. a-IGZO ince filmlerin SIMS profilleri .....	58
Şekil 5.4. a-IGZO ince filmlerin AFM görüntüleri.....	60
Şekil 5.5. a-IGZO ince filmlerin RMS-Kaplama basıncı grafiği.....	61
Şekil 5.6. a-IGZO ince filmlerin yanal SEM görüntüleri .....	62
Şekil 5.7. a-IGZO ince filmlerin yüzey SEM görüntüleri .....	64
Şekil 5.8. a-IGZO ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları.....	65
Şekil 5.9. Burstein-Moss (BM) Kayması şematığı .....	66
Şekil 5.10. a-IGZO ince filmlerin optik bant aralıkları .....	67
Şekil 5.11. a-IGZO ince filmlerin Optik bant aralığı-Kaplama basıncı değişimi.....	67
Şekil 5.12. a-IGZO Schottky diyotların $\ln(I)$ -V grafikleri .....	69
Şekil 5.13. a-IGZO Schottky diyotların deneysel $dV/d\ln(I)$ - akım (I) grafiği.....	72
Şekil 5.14. a-IGZO Schottky diyotların deneysel $H(I)$ - akım (I) grafiği.....	72
Şekil 5.15. a-IGZO Schottky diyotların $R_i$ - V grafiği .....	73
Şekil 5.16. a-IGZO tabanlı diyotların $F(V)$ - V grafiği.....	74

**RESİMLERİN LİSTESİ**

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 4.1. Eş Püskürtme Sistemi .....	39
Resim 4.2. Termal Buharlaştırma Sistemi .....	40
Resim 4.3. X-ışınları sistemi.....	42
Resim 4.4. Atomik kuvvet mikroskobu sistemi.....	43
Resim 4.5. İkincil iyon kütle spektrometre sistemi.....	44
Resim 4.6. Morötesi-görünür bölge spektrometresi .....	46
Resim 4.7. Taramalı elektron mikroskobu sistemi .....	48
Resim 4.8. Akım-gerilim ölçüm sistemi.....	49

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>a</b>	Amorf
<b>A<sup>*</sup></b>	Richardson sabiti
<b>A<sup>**</sup></b>	Etkin Richardson sabiti
<b>a-Si</b>	Amorf silisyum
<b>Ar</b>	Argon
<b>Au</b>	Altın
<b>AuNiGe</b>	Altın nikel germanyum
<b>°C</b>	Santigrat derece
<b>E</b>	Elektrik alan
<b>E<sub>g</sub></b>	Yasak enerji aralığı
<b>E<sub>i</sub></b>	İletkenlik bandı
<b>E<sub>v</sub></b>	Valans bandı
<b>E<sub>F</sub></b>	Fermi enerjisi
<b>E<sub>D</sub></b>	Donör enerji seviyesi
<b>E<sub>A</sub></b>	Akseptör enerji seviyesi
<b>eV</b>	Elektron volt
<b>Ga</b>	Galyum
<b>Φ<sub>B</sub></b>	Bariyer yüksekliği
<b>hν</b>	Foton enerjisi
<b>I</b>	Akım
<b>I<sub>0</sub></b>	Doyum akımı
<b>In</b>	İndiyum
<b>InGaZnO</b>	İndiyum galyum çinko oksit
<b>K</b>	Kelvin
<b>k.b.</b>	Keyfi birim
<b>k<sub>B</sub></b>	Boltzmann sabiti
<b>λ</b>	Dalga boyu

**Simgeler****Açıklamalar**

$m_e^*$	Elektronun etkin kütlesi
$m_0$	Serbest elektron kütlesi
<b>mbar</b>	Milibar
<b>mTorr</b>	Militorr
<b>N</b>	Azot
<b>n</b>	İdealite faktörü
<b>nm</b>	Nanometre,
<b>O<sub>2</sub></b>	Oksijen
<b>R</b>	Direnç
<b>R<sub>s</sub></b>	Seri direnç
<b>R<sub>sh</sub></b>	Kısa devre direnci
<b>Q</b>	Elektrik yükü
<b>T</b>	Sıcaklık
<b>V</b>	Gerilim
<b>V<sub>D</sub></b>	Difüzyon potansiyeli
<b>V<sub>F</sub></b>	Doğru gerilim
<b>V<sub>R</sub></b>	Ters gerilim
<b>Zn</b>	Çinko
<b>Ω</b>	Ohm
$\phi_s$	Yarıiletken iş fonksiyonu
$\phi_m$	Metal iş fonksiyonu
$\chi_s$	Yarıiletken elektron yakınlığı
$\mu$	Mobilite
<b>W<sub>D</sub></b>	Tükenim tabakası genişliği

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>A.C.</b>	Alternatif akım
<b>AFM</b>	Atomik kuvvet mikroskobu
<b>D.C.</b>	Doğru akım
<b>FE</b>	Alan emisyonu

**Kısaltmalar****Açıklamalar****I-V**

Akım-gerilim

**MS**

Metal yarıiletken

**MIS**

Metal yalıtkan yarıiletken

**MOS**

Metal oksit yarıiletken

**RTA**

Hızlı ısı tavlama

**RMS**

Karekök ortalama

**RF**

Radyo frekansı

**SBD**

Schottky bariyer diyot

**SEM**

Taramalı elektron mikroskobu

**SIMS**

İkincil iyon kütle spektrometresi

**TE**

Termiyonik emisyon

**TFE**

Termiyonik alan emisyon

**UV-Vis**

Morötesi-görünür

**XRD**

X-ışınları kırınımı

## 1. GİRİŞ

Yarıiletken malzemeler, iletkenliği yalıtkanlar ve iletkenler arasında bir değer aralığına sahip olan katı haldeki malzemeler olarak tanımlanır. Yarıiletken malzemeler, 21. yüzyılda modern elektronik endüstrisindeki gelişmelerde ve birçok elektronik cihazın endüstriyel uygulamalarında önemli bir rol oynamaktadır. Bu malzemeler arasında günümüzde yaygın olarak kullanılan silisyum (Si), galyum arsenit (GaAs), germanyum (Ge), kadmiyum sülfür (CdS), kadmiyum tellür (CdTe) ve indiyum fosfat (InP) gibi birçok malzeme bulunmaktadır. Yarıiletken teknolojisinde üretilen ilk silikon tüm devrelerden başlayarak, ileri teknoloji mikroişlemciler, güneş hücreleri ve daha birçok elektronik cihaz hızla gelişerek günümüze kadar gelmiştir [1,2].

Yarıiletkenlerin mazisi, malzemelerin elektriksel karakteristikleri üzerinde yapılan deneyler ile başlar. Negatif sıcaklık direnci ve ışığa duyarlılık katsayısının özellikleri 19. yüzyıldan itibaren gözlemlenmeye başlandı. 1833'te Michael Faraday, gümüş sülfat ( $Ag_2SO_4$ ) örneklerini ısıttığında dirençlerinin azaldığını ve bu durumun metalik maddelerin davranışına ters düştüğünü bildirdi. 1839'da A. E. Becquerel, fotovoltaiik etki olarak tanımlanan, ışık çarptığında katı ve sıvı elektrolit arasında bir voltaj gözlemlendiğini bildirdi. 1874'te Karl Ferdinand Braun, metalik sülfatlarda doğrultma ve iletim özelliği gözlemlledi, Arthur Schuster ise bir tel üzerindeki bakır oksit (CuO) tabakasının, tel temizlendikten sonra doğrultma özelliğinin sona erdiğini buldu. 1876'da Adams ve Day, selenyumdaki (Se) fotovoltaiik etkiyi gözlemllediler [3,4]. Bu olayların bütün olarak açıklaması, büyük ölçüde 20. yüzyılın ilk yarısında gelişen bir katıhal fiziği teorisini gerekli kıldı. 1878'de Edwin Herbert Hall, uygulanan bir manyetik alan ile akan yük taşıyıcılarının saptırıldığını gösterdi. 1897'de J.J. Thomson elektronu keşfederek, katılarda elektron bazlı iletim teorilerini ortaya attı. Katı malzemeleri ilk kez sınıflandıran Johan Koenigsberger 1914 yılında katı malzemeleri metaller, yalıtkanlar ve "değişken iletkenler" olarak adlandırdı. 1928'de ise Felix Bloch'un yayınladığı teori, elektronların atomik kafesler içindeki hareketiyle ilgiliydi. 1930'da B. Gudden, yarıiletkenlerdeki iletkenliğin küçük safsızlık konsantrasyonlarına bağlı olduğunu açıkladı. 1931'de Alan Herries Wilson tarafından bant iletimi teorisi oluşturuldu ve bant boşlukları kavramı geliştirdi [3,5].

Yarıiletken malzemeler, özelliklerinin zamanla keşfedilmesinden sonra 20. Yüzyılın başlarından itibaren günümüze kadar elektronik devrelerin vazgeçilmez bir parçası olmuştur. En temel yarıiletken aygıtlardan biri olan metal-yarıiletken (MS) kontaklar, 1874'de F.K. Braun keşfinden sonra, bu kontakların bilinmezlerinin öğrenilmesi ve özelliklerinin geliştirmesinde büyük ilerlemeler kaydedilmiştir [6]. 1938'de, Schottky, metal-yarıiletken kontakların doğrultma özelliklerini anlama amacıyla ilk incelemelerini gerçekleştirdi [7]. Schottky, yarıiletken ile metal arasında kontak kurduğunda, yarıiletken-metal arayüzeyinde potansiyel bariyer oluştuğunu ve bu kontakın doğru yönlü bir öngerilim altında akım ilettiğini, ancak ters yönlü öngerilim altında neredeyse hiç akım iletmediğini gözlemledi. Kontakın bir yönde akımı iletirken diğer yönde akımı iletmemesi "doğrultma özelliği" olarak adlandırıldı. Schottky'nin çalışmalarından dolayı bu metal-yarıiletken kontak Schottky bariyer kontakı olarak isimlendirildi. Daha sonra Schottky ve Mott tarafından metal-yarıiletken kontaklarda bariyer oluşma mekanizması açıklandı ve bariyer yüksekliği hesaplama şeklinde çeşitli modeller önerildi [7-10]. Schottky ve Mott'un teorisine göre bariyer, yarıiletken ile metalin iş fonksiyonları ( $\Phi_m$  ve  $\Phi_s$ ) arasındaki farklılıktan meydana gelmektedir [11]. Cowley, Schottky ve Mott teorisine ilave olarak, bariyer yüksekliğinin arayüzey tabaka kalınlığı, yüzey hazırlama koşulu, arayüzey tuzak yoğunluğu, uygulanan ön gerilim ve malzeme sıcaklığı ile ilişkili olduğunu iddia etti. [12,13].

Schottky bariyer kontakların esas parametreleri olan idealite faktörü ( $n$ ) ve bariyer yüksekliği ( $\Phi_B$ ) termioyonik emisyon (TE) teoremi kullanılarak hesaplanmaktadır. Termioyonik emisyon teorisi Bethe tarafından Schottky bariyer kontakların elektriksel davranışını tam olarak belirlemek için ortaya atılmıştır [8]. Bu teoriye göre akım, elektronların yarıiletken ile metal arasındaki emisyon süreci ile belirlenmektedir. [20]. Her ne kadar metal-yarıiletken kontaklar hakkında günümüze kadar birçok teorik ve deneysel çalışma yapılmış olsa da metal-yarıiletken kontaklar hakkında bilinenlerin yeterli olmadığı düşünülmektedir. Schottky kontakların; düşük sıcaklıkta üretilebilmeleri, hızlı anahtarlama yetenekleri, yüksek güç kapasitesi ile entegre devrelerde kolayca oluşturulabilir olmaları ve geliştirilmeye açık birçok yönü ile bu araştırma alanı hala güncelliğini korumaktadır [21]. Metal-yarıiletken kontaklar genel olarak güneş hücrelerinde, mikrodalga diyotlarda, lazer diyotlarda, fotodiyotlarda, yarıiletken dedektörlerde ve alan etkili transistörlerde kullanılarak birçok yarıiletken elektronik cihazın temelini oluşturmaktadır [14-19].

Si gibi elementel yarıiletkenler ve GaAs, CdS gibi bileşik yarıiletkenler haricinde oksit bazlı yarıiletkenler olarak adlandırılan bir yarıiletken grubu son zamanlarda yoğun ilgi görmektedir. Bu yoğun ilginin en temel nedeni, oksijen konsantrasyonu ve metal katyonunun sayısına bağlı olarak oksit bazlı yarıiletkenlerin optik ve elektriksel özelliklerinin kolaylıkla ayarlanabilmesidir [33]. Titanyum dioksit ( $\text{TiO}_2$ ) [22,23], çinko oksit ( $\text{ZnO}$ ) [24,25], kalay dioksit ( $\text{SnO}_2$ ) [26,27], vanadyum pentaoksit ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ) [28], indiyum oksit ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) [29] ve tungsten oksit ( $\text{WO}_3$ ) [30] gibi oksit bazlı yarıiletkenler bu gruba örnek olarak verilebilir. Oksit bazlı yarıiletkenler arasında çinko oksit en çok çalışılan ve popüler olan malzemedir [31].  $\text{ZnO}$ , yaklaşık olarak 3.3 eV'lik geniş bir yasak enerji aralığına sahip ve doğrudan bant yapılı olan bir yarıiletken materyaldir [32].

$\text{ZnO}$  gibi oksit bazlı yarıiletkenlerin özellikleri uygun olan katkı atomları ile değiştirilebilir. Katkı atomu adına kalay (Sn), indiyum (In), galyum (Ga), alüminyum (Al), bakır (Cu) ve lityum (Li) gibi atomların kullanıldığı birçok uygulama ve araştırma alanı vardır. Bu katkı atomları ile katkılama miktarı değiştirilerek oksit bazlı yarıiletkenlerin elektriksel ve optik özellikleri üzerinde ayarlama yapılabilmektedir [34-38]. Oksit bazlı yarıiletkenlerin optik ve elektriksel özelliklerinin etkili bir şekilde ayarlanabilir olmasına ek olarak bu malzemelerin amorf formda üretilebilir olmaları da bazı uygulamalar için avantajdır.  $\text{ZnO}$ ,  $\text{TiO}_2$  ve  $\text{SnO}_2$  gibi yarıiletkenler büyütme koşullarına bağlı olarak genellikle polikristal formda oluşurlar. Ancak farklı iyonik boyutlara ve yüklere sahip iki veya daha fazla katyonun karıştırılması amorf faz oluşumunun ciddi şekilde artmasına neden olur ve çoklu katyon sisteminin kullanılması ince filmlerin işleme koşullarında amorf faz olarak kalmasını destekler [39,40]. Amorf oksit yarıiletkenler (AOS), görünür ışık bölgesinde yüksek şeffaflık, büyük serbest taşıyıcı hareketliliği, oda sıcaklığında bile geniş alanlı düzgün biriktirme vb. içeren birçok umut verici özellik sağladığından, bu malzemeler özellikle esnek elektronik uygulamaları için çok dikkat çekmiştir [41-44]. Amorf oksit yarıiletkenler, ince film transistörlerdeki (TFT'ler) kanal malzemesi dahil olmak üzere, esnek-şeffaf ekranlarda ve radyo frekansı tanımlama (RFID) gibi birçok elektronik cihazda ticari olarak kullanılmaktadır. Her ne kadar durum böyle olsa da amorf oksitler gelişime açık özellikleri bakımından güncel kalan araştırma alanlarından biridir [45-48]. Şimdiye kadar araştırılan ve geliştirilen çok katyonlu şeffaf amorf oksit yarıiletkenlere indiyum çinko oksit ( $\text{InZnO}$ ) [49], indiyum kalay oksit ( $\text{InSnO}$ ) [50], çinko kalay oksit ( $\text{ZnSnO}$ ) [51], indiyum çinko kalay oksit ( $\text{InZnSnO}$ ) [52] ve indiyum galyum çinko oksit ( $\text{InGaZnO}$ ) [44,53] örnek olarak verilebilir. 2004 yılında Nomura ve arkadaşları tarafından keşfedilen

amorf InGaZnO (a-IGZO) bu alanda en umut verici malzemelerden biri olmuştur [44]. Amorf InGaZnO, yaklaşık 3.4 eV geniş bant aralığına sahip n-tipi yarıiletken malzemedir. Amorf Si (a-Si) ( $\sim 1 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) ile karşılaştırıldığında nispeten yüksek hareketliliğe ( $\sim 10 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) sahiptir. Bu özelliğinden dolayı organik ışık yayan diyotlarda (OLED) ve sıvı kristal ekranlarda (LCD) kullanılan a-Si bazlı ince film transistörlere alternatif olarak ortaya çıkmıştır [54,55].

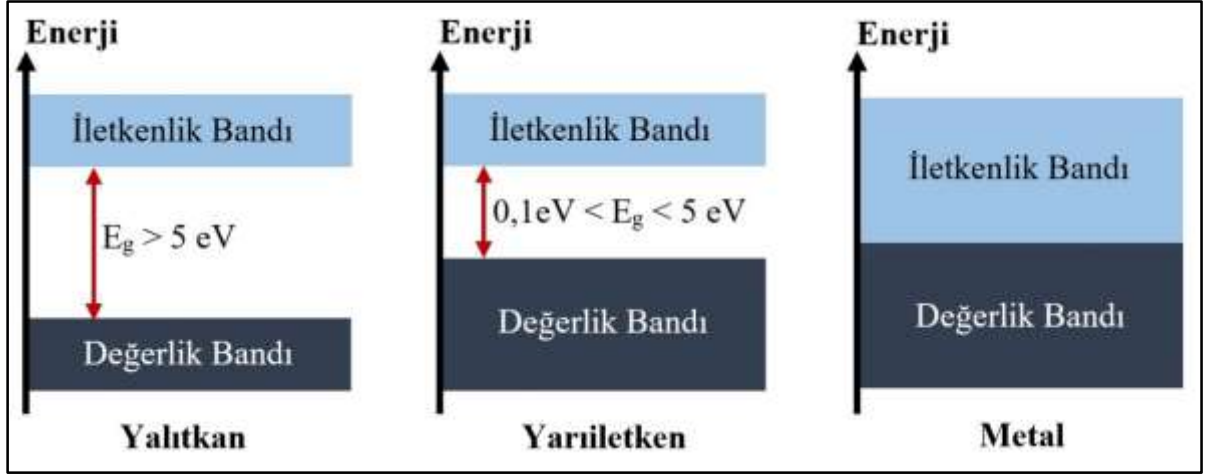
a-IGZO'nun keşfinden sonra, bu yarıiletken hakkında yapılan araştırmaların çoğu, TFT'lerin performansını iyileştirmeye yönelik oldu. Optoelektronik cihazlar için büyük önem taşıyan a-IGZO tabanlı Schottky diyotlar ile ilgili çalışmalar TFT'lere göre daha az ilgi gördü [47,56]. Bu durumun temel nedeni, amorf oksit yarıiletken yüzeylerinin atmosfere olan hassasiyetinden dolayı ideal Schottky diyot yapısının oluşmamasıdır. İdeal Schottky kontaklarda temel olarak yüksek doğrultma oranı ve düşük idealite faktörü elde etmek amaçlanmaktadır. Bununla birlikte, amorf oksit yarıiletkenler gibi atmosfere duyarlı yüzeylerdeki temaslar, düşük düzeltme oranı ve yüksek idealite faktörü ile sonuçlanmaktadır [56-57]. a-IGZO ince filmlerin biriktirilmesi için sol-jel [58], darbeli lazer biriktirme [44,59-60] ve radyo frekansı magnetron püskürtme [53,61-62] gibi teknikler kullanılabilir. Bu biriktirme tekniklerinden radyo frekansı magnetron püskürtme tekniği geniş alanlar için kolay üretim, proses tekrarlanabilirliği ve maliyet açısından diğer yöntemlere göre daha avantajlıdır [63]. Literatürde a-IGZO ince filmler üzerinde yapılan bazı çalışmalarda kaplama basıncına,  $\text{O}_2$  akış hızına ve  $\text{O}_2/\text{Ar}$  akış hızına bağlı olarak ince filmlerin elektriksel ve optik özellikleri kısıtlı olarak incelenmiştir [53,54,61]. Amorf IGZO Schottky diyotlar hakkında literatürdeki birkaç çalışma, yüksek performans sağlayan büyük  $\Phi_B$  [64,65], yüksek frekanslı çalışma [66,67] ve mekanik esnekliğe [65,68] sahip a-IGZO diyotları elde etme konusunda büyük bir potansiyel olduğunu gösterdi. Amorf IGZO ticari olarak büyük ilgi görmesine ve literatürdeki çalışmalara rağmen, bazı özellikleri açısından literatürde eksiklikler vardır ve bu nedenle a-IGZO'nun geliştirilmesi gerekmektedir. Nispeten düşük yarıiletken bant aralığı (3.2-3.5 eV), aşırı oksijen boşlukları, zayıf stabilite, yüksek pürüzlü yüzey veya çok sayıda film kusuru, a-IGZO'nun optoelektronik cihazlarda kullanımını sınırlar [69,70]. Bu eksikliklerin geliştirilmesi a-IGZO'nun başta Schottky diyot, radyo frekansı tanımlama ve görüntüleme teknolojileri olmak üzere çeşitli optoelektronik cihazlarda daha fazla kullanılmasına olanak sağlayacağı düşünülmektedir.

## 2. YARIİLETKENLER HAKKINDA GENEL BİLGİLER

### 2.1. Yarıiletkenler

Elektriksel özelliklerine bağlı olarak katı malzemeler üç farklı kategoriye ayrılır. Birinci kategoride bulunan katılar metallerdir ve metallerin özdirenç değeri  $10^{-6}$ - $10^{-4}$   $\Omega\text{cm}$  aralığındadır. İkinci kategoride  $10^{-4}$ - $10^{10}$   $\Omega\text{cm}$  özdirenç aralığına sahip yarıiletkenler yer alır. Üçüncü kategori ise özdirenci  $10^{10}$   $\Omega\text{cm}$  değerine eşit ya da daha büyük olan yalıtkan grubudur [71]. Katı malzemeler arasında yarıiletkenlerin en önemli özelliği iletkenlik bandı ile değerlik bandı arasında bir yasak enerji aralığının bulunmasıdır [72]. Mutlak sıfır yani sıfır Kelvin (0 K) noktasında yarıiletkenler bir yalıtkan gibi davranırlar ve değerlik bandı elektronlar tarafından tamamen dolu iken, iletkenlik bandı boştur [73]. Mutlak sıfır noktasında yalıtkan olan bu malzemeler, sıcaklık artışı, elektrik alan ve manyetik alan gibi dış etkilerin uygulanması durumunda belirli bir miktar değerlik elektronu serbest bırakarak iletkenlik özelliği kazanabilirler. Bu iletkenlik geçici bir durumdur; dış etki ortadan kaldırıldığında malzemeler tekrar yalıtkan durumuna dönerler [74]. Yarıiletkenlerin diğer önemli bir özelliği ise, elektriksel iletkenliğin safsızlıklar katılarak kontrol edilebilmesidir [75]. Katılama ile özellikle iletkenliklerinin kontrollü olarak değiştirilebilir olması yarıiletkenlerin günümüzde yaygın bir biçimde kullanılmasının başlıca nedenidir [76].

Yarıiletkenin elektronik, optik ve opto-elektronik uygulamalarda kullanılabilirliğini belirleyen en önemli parametresi yasak enerji aralığıdır [77]. Bu aralıktaki müsaadeli geçişlerde, yasak enerji aralığı genellikle elektron-volt (eV) seviyesindedir [79]. Yarıiletkenlerin kimyasal bağ yapısı ve atom türlerine bağlı olarak belirlenen yasak enerji aralığı, farklı yarıiletkenler arasında 0,1 ila 5,0 eV arasında değişiklik gösterir [78]. Metallerde, değerlik bandı ve iletkenlik bandı birbirine denk gelir; dolayısıyla değerlik bandında bulunan elektronlar dış etki olmaksızın iletkenlik bandına geçebilir ve bu durum iletkenliği sağlar. Yalıtkanlarda, değerlik bandı ve iletkenlik bandı arasındaki yasak enerji açıklığı, dış etki tarafından aşamayacak seviyede geniş bir aralığa sahiptir [77,80]. Şekil 2.1'de metal, yalıtkan ve yarıiletkenlerin bant şematikleri verildi.

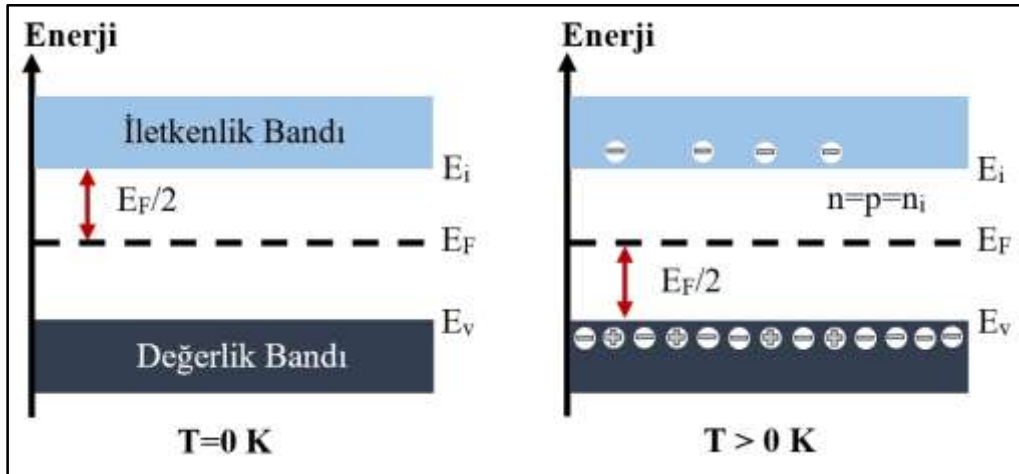


Şekil 2.1. Yalıtkan, yarıiletken ve metallerde enerji bant şematikleri

Yarıiletken malzemeler üretilirken, farklı katkı atomlarının eklenmesiyle çeşitli tipte yarıiletkenler oluşturulabilir. Yarıiletkenleri katkılı ve katkısız (saf) olmak üzere iki temel kategoriye ayırabiliriz.

### 2.1.1. Katkısız (saf) yarıiletkenler

Saf yarıiletkenler katkı kusuru içermeyen yarıiletkenlere denir [71]. Elemental yarıiletkenler veya bileşik yarıiletkenler saf yarıiletken olabilirler [74]. Saf yarıiletkenlerin akım iletiminde hem elektronlar hem de deşikler etkilidir ve bu tür malzemelerde elektron sayısı deşiklerin sayısına eşittir [81,82]. Şekil 2.2'de saf bir yarıiletkenin enerji bant şematığı verildi.



Şekil 2.2. 0 K ve yüksek sıcaklık değerlerinde saf yarıiletkenin enerji bant şematığı

Mutlak sıfır sıcaklığında saf yarıiletkende, yük taşıyıcıları mevcut değildir [83]. Sıcaklığın artması ile yarıiletkende kırık değerlik bağlarının sayısı çoğalır ve bu durum serbest elektronlar ile deşiklerin konsantrasyonunun artmasına neden olur [71]. Elektronlar enerji olarak yasak enerji değerine ulaştığında ya da üzerine çıktığında, değerlik bandından kopar ve iletkenlik bandına geçer. Bu süreçte, her kopan elektron değerlik bandında bir deşik bırakır [84]. Böylece, çift olarak üretilen taşıyıcılar nedeniyle değerlik bandındaki deşik sayısı (p) ve iletkenlik bandındaki elektron sayısı (n) birbirine eşit olur.

$$n = p = n_i \quad (2.1)$$

Eşitlikteki  $n_i$  saf taşıyıcı yoğunluğunu ifade eder ve bu değer, sıcaklığa ve yarıiletken malzemenin türüne bağlı olarak değişir [83]. Mutlak sıfırda tam dolu olan son enerji seviyesi Fermi seviyesi olarak adlandırılır ve  $E_F$  ile simgelenir [79]. Fermi seviyesi, saf yarıiletkende yasak enerji aralığının ortasında ( $E_F = E_g/2$ ) yer alır [76]. Saf yarıiletkenlerde elektronlar ve boşlukların sayısı aynı olduğundan elektriksel özelliklerinden iyi bir şekilde yararlanılamaz. Burada, değerlik bandındaki elektronları iletkenlik bandına taşımak için gerekli olan enerji sağlanmalıdır. Serbest taşıyıcılar mevcutsa, boşlukların ve elektronların hareketi kolay bir şekilde gerçekleşebilir. Bu bakımdan saf yarıiletkenleri, elektron veya deşik yoğunluklarını değiştirecek şekilde katkılama düşüncesi ortaya çıkmıştır [85].

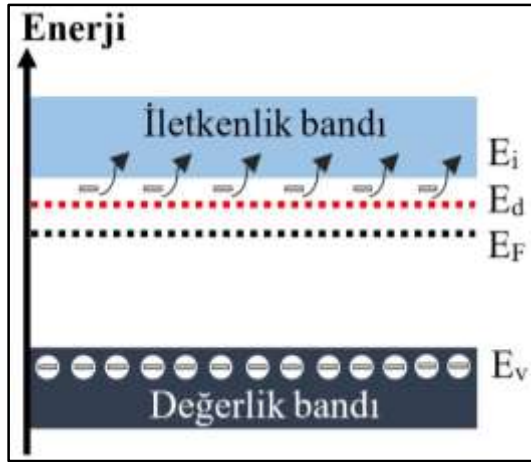
### 2.1.2. Katkılı yarıiletkenler

Yarıiletken malzeme safken, elektriksel iletkenlik bakımından yetersizdir [85]. Bu nedenle saf yarıiletkenler teknolojiye kısıtlı uygulama alanına sahiptir [79]. Yarıiletken malzemenin elektronik özelliklerini iyileştirmek için 1950 yılından sonra başlayan çalışmalar ile katkılı yarıiletkenler üzerine araştırmalar yoğunlaştırılmıştır [86]. Bir saf yarıiletkene katkılanan katkı atomları safsızlık atomları olarak adlandırılır. İstenilen özelliklere ve kullanım alanına göre katkı atomları ve katkı yoğunlukları farklılık göstermektedir [87]. Katkılanan atom yarıiletken malzemenin elektron sayısını artırıp ve elektronların çoğunlukta olduğu bir akım iletim mekanizması oluşturuyorsa bu atom elektron verici (donör) olarak adlandırılır. Katkılanan atom yarıiletken malzemedeki elektron olarak deşiklerin çoğunlukta olduğu bir akım iletim mekanizması oluşturuyorsa bu atom elektron alıcı (akseptör) olarak adlandırılır [86,88]. Katkılanan atomun türüne göre,

katkılı yarıiletken malzemeler p ve n-tipi yarıiletken olarak ikiye gruba ayrılır.

### n-tipi yarıiletkenler

İletkenliği donör katkısıyla belirlenen yarıiletkenlere "n-tipi yarıiletken" denir; bu durumda, taşıyıcılar genellikle ekstra elektronlar tarafından sağlanır [72]. Periyodik cetvelin IVA grubunda bulunan ve son elektronik seviyesinde 4 adet elektron var olan germanyum (Ge) veya silisyum (Si) içine, periyodik cetvelin VA grubunda bulunan ve son yörüngesinde 5 adet elektron bulunan fosfor (P), arsenik (As) veya antimon (Sb) elementlerinden biri eklenirse, germanyum (Ge) ya da silisyumun (Si) 4 elektronu komşu elektronlarla kovalent bağ oluşturur. Katkılanan atom ile gelen beşinci elektron, atoma zayıfça bağlı kalır ve küçük bir enerji ile uyarıldığında iletim bandına geçer [87]. Bu şekilde katkılanarak üretilen yarıiletkende, çoğunluk ve azınlık yük taşıyıcıları sırasıyla elektronlar ve deşiklerdir. Şekil 2.3'de enerji bant şematığı verilen n-tipi yarıiletkende elektronların, elektrik iletimine katkısı deşiklerden daha fazladır.



Şekil 2.3. n-tipi yarıiletken enerji bant şematığı

Atomların donör enerji seviyeleri, donör atomların buldukları enerji seviyelerini ifade eder ve genellikle  $E_d$  ile simgelenir.  $E_d$  ifadesi eşitlik 2.2'de görüldüğü gibi;

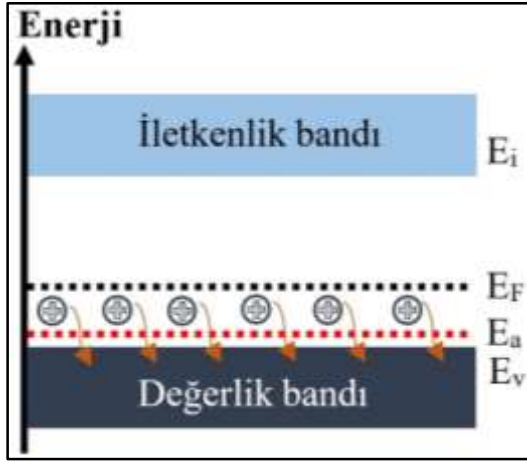
$$E_d = (1/\epsilon_r)^2 (m_e^*/m_e) E_H \quad (2.2)$$

ile tanımlanır. Burada;  $m_e^*$  elektronun etkin kütlesi,  $m_e$  elektronun kütlesi,  $\epsilon_r$  yarıiletkenin görece dielektrik sabiti ve  $E_H$  hidrojenin iyonlaşma enerjisini ifade eder. Donör atomların

yarıiletken kristalde oluşturduğu enerji düzeyi, iletkenlik bandının hemen altında bulunur. Bu yakınlık nedeniyle, bu seviyedeki donör atomların serbest elektronları, küçük bir enerjiyle iletkenlik bandına geçebilirler [89].

### p-tipi yarıiletkenler

Son elektronik seviyesinde 4 adet elektron var olan silisyum (Si) veya germanyum (Ge) içine periyodik cetvelin IIIA grubunda bulunan ve son elektronik seviyesinde 3 adet elektron bulunduran bor (B) veya galyum (Ga) elementlerinden biri eklenirse, silisyum (Si) ya da germanyumun (Ge) 3 elektronu komşu elektronlarla kovalent bağ oluşturur. Katkı atomu ile gelen ve deşik olarak isimlendirilen bir kovalent bağ pozisyonu boş kalır [74]. Bu şekilde katkılanarak üretilen yarıiletkende, çoğunluk ve azınlık yük taşıyıcıları sırasıyla deşikler ve elektronlardır. Şekil 2.4'de enerji bant şematiği verilen p-tipi yarıiletkende, deşiklerin elektrik iletimine katkısı elektronlardan daha fazladır. Akseptör atomların yarıiletken kristalde oluşturduğu enerji düzeyi, değerlik bandının hemen üstünde konumlanır.



Şekil 2.4. p-tipi yarıiletken enerji bant şematiği

Akseptör atomların yerleştiği enerji seviyeleri akseptör enerji seviyeleri olarak isimlendirilir ve genellikle  $E_a$  ile simgelenir.  $E_a$  ifadesi eşitlik 2.3'de görüldüğü gibi;

$$E_a = (1/\epsilon_r)^2 (m_h^*/m_h) E_H \quad (2.3)$$

ile tanımlanır. Burada;  $m_h^*$  boşluğun etkin kütlesi,  $m_h$  boşluğun kütlesi,  $\epsilon_r$  yarıiletkenin görece dielektrik sabiti ve  $E_H$  hidrojenin iyonlaşma enerjisini ifade eder. Akseptör enerji seviyesinde bulunan atomlar bağlarını tam edebilmek için değerlik bandı içinde bulunan elektronlardan transfer ederler. Değerlik bandı içinde bulunan ve akseptör enerji seviyesine transfer olan her elektron, değerlik bandı içinde bir boşluk oluşmasına neden olur. Bununla birlikte, bu durum iletkenlik bandındaki elektron sayısını değiştirmez [89].

### 2.1.3. Metal oksit yarıiletkenler

Metal ve oksijenin bir araya gelmesi ile oluşan metal oksit yarıiletkenler, üstün optik ve elektriksel özellikleri nedeniyle fazlasıyla ilgi çekmekte ve yoğun bir şekilde çalışılmaktadır [87]. Bu malzemeler geniş enerji bant (3-4 eV) aralığına sahiptir [90]. Metal oksit yarıiletkenler genellikle bakır (Cu), titanyum (Ti), çinko (Zn), indiyum (In) vb. bir metal ile oksijen bileşiminden oluşurlar [75]. İlk çalışmalarda bildirilen metal oksit yarıiletkenler ikili bileşiklerdir ve bunlara kalay dioksit ( $\text{SnO}_2$ ), çinko oksit ( $\text{ZnO}$ ), indiyum oksit ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) ve galyum oksit ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) gibi yarıiletkenler örnek olarak verilebilir [91]. Bu malzemeler gaz sensörleri, diyotlar, fotovoltaiik güneş hücreleri ve elektrokromik pencereler de sıklıkla kullanılır. Metal oksitlerde oksijen eksikliği ve katyon değeri ayarlanarak, kullanım amacına yönelik uygun malzemeler üretmek mümkündür [79,92].

Metal oksit yarıiletkenler genellikle n-tipi yarıiletkenler olup, oksijen boşluklarından ve/veya metal atomlarından kaynaklan, yaklaşık  $10^{16} \text{ cm}^{-3} - 10^{21} \text{ cm}^{-3}$  mertebesinde yüksek taşıyıcı konsantrasyonuna sahiptir [91,93]. Aslında metal oksit yarıiletkenler, Si gibi kovalent yarıiletkenlerin aksine güçlü bir iyoniklik derecesine sahip bileşiklerdir. Metal oksit yarıiletkenlerde metal orbitallerinden (s) oksijen orbitallerine (2p) yük transferi gerçekleşir. İletim bandı minimumu aslında dağınık ve işgal edilmemiş metal orbitallerinden oluşurken değerlik bandı maksimumu tamamen işgal edilmiş ve lokalize olmuş oksijen orbitallerinden oluşur [91,94]. Sonuç olarak, elektron taşınması, komşu metal katyonlarındaki metal orbitallerinin doğrudan örtüşmesi yoluyla kolayca gerçekleşebilir. Bu durum mevcut metal oksit yarıiletkenlerin çoğunun n-tipi iletkenlik sağladığını açıklar [91].

## 2.2. Şeffaf İletken Oksitler

Şeffaf iletken oksitler  $(n-1)d^{10}ns^0$  ( $n \geq 4$ ) dış kabuk elektronik konfigürasyonuna sahip geçiş metal katyonlarından ve oksijen anyonlarından oluşan bir dizi metal oksittir [95]. Oksijenin büyük elektronegatifliği nedeniyle yüksek bir enerji bant aralığı ( $E_g > 3,1$  eV) sergilerler ve bu durum onları elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde yüksek oranda şeffaf (%80-90) hale getirir [96,98]. Bu oksitlerde, yüksek iletkenlik elde etmek için dejenere bir katkılama gerekir. Yüksek iletim, dışsal ikame (katyon katkısı) veya nokta kusurlarının oluşturulması (oksijen boşlukları) şeklinde iki kaynaktan elde edilebilir. Şeffaf ve iletken özellikler ilk olarak 1907'de kadmiyum oksit (CdO) ile gözlemlenmiş ve o zamandan beri optik ve elektriksel özellikleri için SnO<sub>2</sub>, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve ZnO gibi şeffaf iletken oksitler araştırılmıştır [97]. Çizelge 2.1'de şeffaf iletken oksit oluşturabilecek bazı adaylar ve elektronik konfigürasyonları verildi.

Çizelge 2.1. Şeffaf iletken oksit oluşturabilecek adaylar ve elektronik konfigürasyonları

Cu $[Ar]3d^{10}4s^1$	Zn $[Ar]3d^{10}4s^2$	Ga $[Ar]3d^{10}4s^24p^1$	Ge $[Ar]3d^{10}4s^24p^2$
Ag $[Kr]4d^{10}5s^1$	Cd $[Kr]4d^{10}5s^2$	In $[Kr]4d^{10}5s^25p^1$	Sn $[Kr]4d^{10}5s^25p^2$
Au $[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^1$	Hg $[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^2$	Tl $[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^25p^1$	Pb $[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^25p^2$

Şeffaf iletken oksitler, metal katyonlarının ns orbitallerinin iletim bandının alt kısmını oluşturduğu ve oksijen 2p orbitallerinin değerlik bandının üst kısmını oluşturduğu geniş bir enerji bant aralıklarına sahiptir [95].

ZnO, tipik bir şeffaf iletken oksittir ve malzemedeki iletkenlik, nokta kusuru ve/veya oksijen boşluklarından kaynaklanır. Bir oksijen boşluğu durumunda, iki değerlik bantı bölgesi mevcut değildir, bu nedenle bu bölgeleri işgal edecek olan iki elektron, iletim bantı bölgelerini işgal eder ve oksijen boşluğuna karşılık gelen kafes noktası lokalize +2 yük ile bırakılır. ZnO ayrıca bir çinko kafes noktasında bulunabilecek bir alüminyum iyonu

ile dışsal olarak katkılarına bilir. Bu durumda, +3 değerlikli bir alüminyum iyonu çinko kafes noktasına oturur, bu da iletim bandında ek bir elektron ile sonuçlanır. Temel olarak nokta kusur konsantrasyonları, ince film biriktirme parametrelerinin uygun seçimiyle veya numuneyi biriktirme sonrası tavlama işlemine tabi tutarak değiştirilebilir [98].

Şeffaf iletken oksitlerde, metal iyon yarıçapı, metal-oksijen bağ açısı ve uzunluğu taşıyıcı hareketliliğini belirleyen kritik parametreler arasındadır. Çizelge 2.2'den görüldüğü gibi, Zn-Zn 4s ve In-In 5s orbitalleri, diğer geçiş metal katyonlarına kıyasla büyük örtüşme değerlerine sahiptir. Sonuç olarak ZnO ve In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yüksek taşıyıcı hareketliliğine sahiptir.

Çizelge 2.2. Bazı şeffaf iletken oksitlerin özellikleri

Katyon	Oksit	İyon çapı (pm)	M-O uzunluğu (Å)	M-O-M açısı (derece)	Örtüşme
Zn	ZnO	1,16	1,976	108,2	0,6045
Ga	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,88	1,978	100,4	0,4632
Ge	GeO <sub>2</sub>	0,71	1,738	130,0	0,2848
Cd	CdO	1,25	2,348	90,0	0,6905
In	In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,95	2,180	98,2	0,5613
Sn	SnO <sub>2</sub>	0,77	2,052	101,9	0,4523

Tek kristal n-tipi ZnO'nun yaklaşık  $200 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  değerinde ve tek kristal n-tipi In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ün yaklaşık olarak  $160 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  değerinde elektron hareketliliğine sahip olduğu Hall etkisi ölçümleriyle kanıtlanmıştır [99]. Ayrıca, büyük ns-ns orbital örtüşmesi hareketliliği, metal-oksijen-metal (M-O-M) bağlarındaki herhangi bir açısal değişime veya bağ gerilmesine karşı daha az duyarlı hale getirir; bu nedenle, şeffaf iletken oksitlerin hareketliliği, bu tür iyonik bağ nedeniyle yapısal bozukluğa karşı dayanıklıdır. Sonuç olarak, amorf şeffaf iletken oksitler, kristal muadilleriyle karşılaştırılabilir önemli bir taşıyıcı hareketliliği sergiler [100].

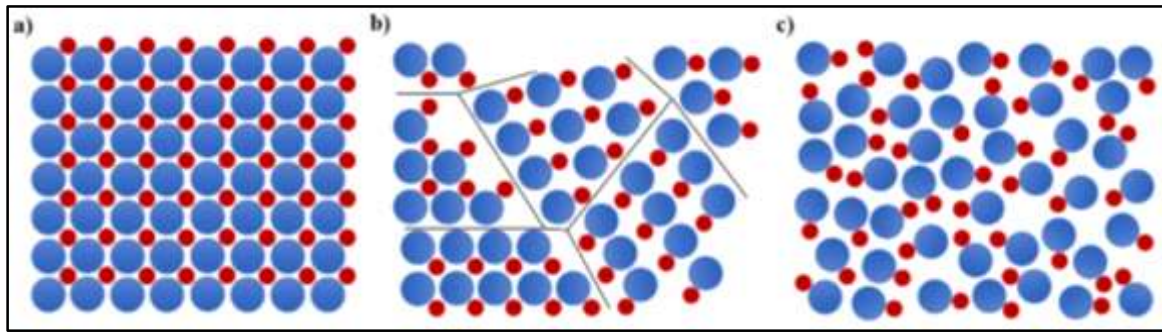
### 2.3. Amorf Oksit Yarıiletkenler

Kristal (tek-kristal ve poli-kristal) ve amorf katılar arasındaki temel fark, atomların periyodikliği veya uzun menzilli düzeni ile ilişkilidir. Tek-kristalin sonsuz periyodikliği,

poli-kristalin ise yerel periyodikliği vardır. Amorf malzemelerin ise diğer iki kristal formundan hariç uzun ya da kısa menzilli düzeni yoktur. Kristal ve amorf malzemelerin özellikleri dikkate alındığında;

- İdeal bir tek-kristal, tüm hacmi boyunca periyodik olarak tekrar eden bir atomik yapıya sahiptir. Sonsuz uzunluk ölçeklerinde bile, her atom yapıdaki diğer her eşdeğer atomla öteleme simetrisi ile ilişkilidir,
- Bir poli-kristal, birçok bireysel tane veya kristalitten oluşur. Her tane, atomik yapının uzun menzilli düzenine sahip olduğu tek bir kristal olarak düşünülebilir. İzotropik bir poli-kristal katıda, komşu taneler arasında hiçbir ilişki yoktur. Bu nedenle, yeterince büyük bir uzunluk ölçeğinde, bir poli-kristalin numune boyunca periyodikliği yoktur,
- Amorf malzemelerin, uzun ya da kısa menzilli düzeni yoktur, dolayısıyla bu malzemelerde öteleme simetrisinden bahsedilmez [101]. Bu durumda dislokasyonlar ve tane sınırları gibi kristal malzemelerin özelliklerine kısıtlama getiren kusurlar ile karşılaşmazlar [102-104].

gibi durumlardan bahsedilebilir. Şekil 2.5’de amorf ve kristal formların kristal yapı şematikleri verildi.



Şekil 2.5. Kristal ve kristal olmayan yapı şematikleri a) Tek kristal b) Poli-kristal c) Amorf yapı

Nispeten yüksek elektron hareketliliğiyle dikkat çeken amorf oksitler,  $(n-1)d^{10}ns^0$  ( $n \geq 4$ ) elektronik konfigürasyonuna sahip metal katyonlarından oluşur ve bu özellikleriyle şeffaf iletkenlerin ilginç bir alt kategorisini oluşturur [105]. Denton ve arkadaşlarının 1954 yılındaki çalışmasından bugüne, geçiş metallerine dayalı amorf oksit yarıiletken malzemelerin elektriksel özellikleri bilinmektedir [106]. Amorf oksit yarıiletken ailesinden en kapsamlı şekilde vanadyum pentaoksit ( $V_2O_5$ ) temelli malzeme incelenmiştir [107]. Bu

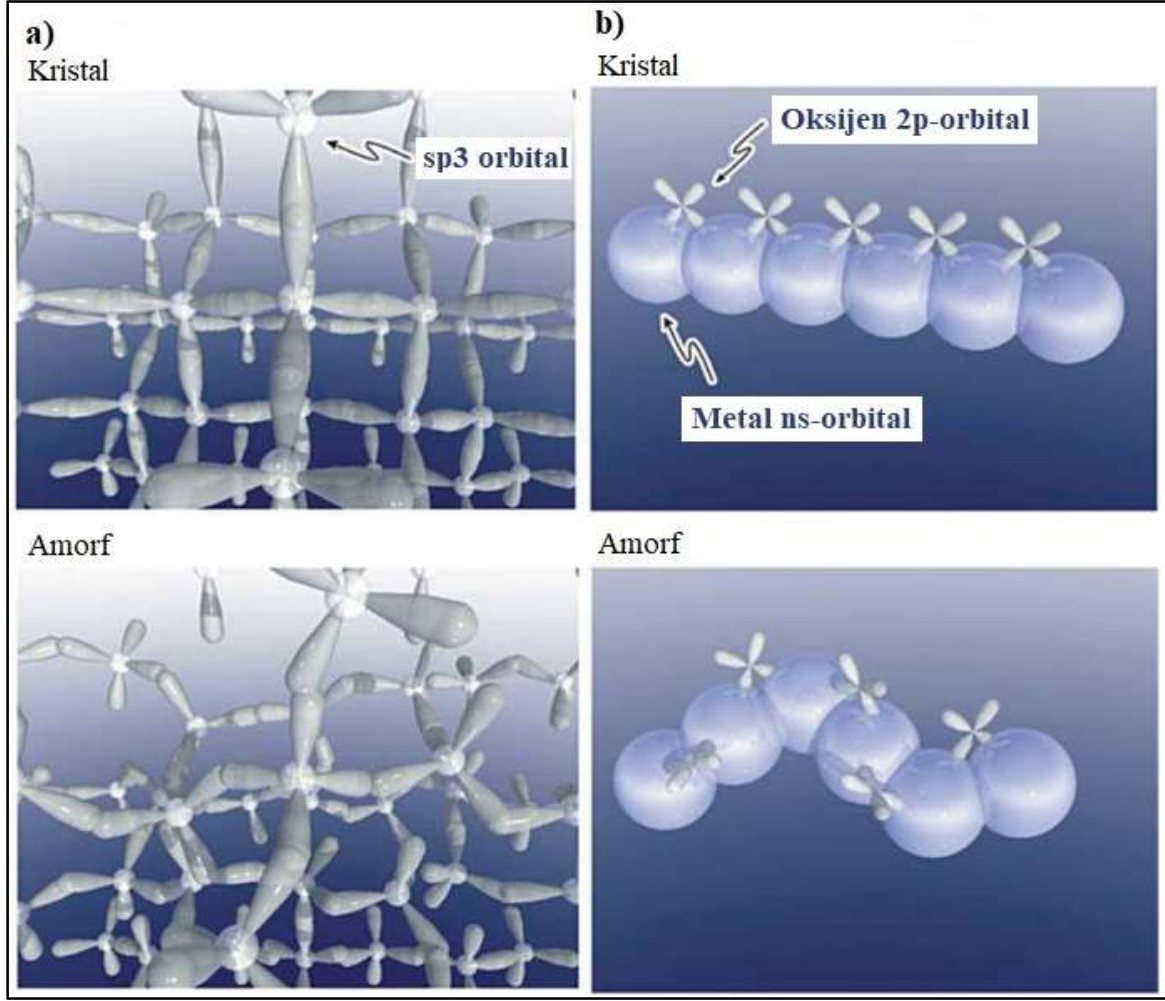
amorf oksit yarıiletkenlerdeki elektronların hareketliliği, oda sıcaklığında  $10^{-4} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  düzeyindedir. Bu düşük hareketlilik ve amorf oksit yarıiletkenin renkli olması, onu şeffaf bir yarıiletken oksit olarak uygunsuz kılar.

1995 yılında, Yasukawa ve arkadaşları şeffaf ve iletken olan n-tipi amorf  $\text{AgSbO}_3$  ince film hakkında rapor yayınlamıştır [108]. Püskürtme yöntemi ile biriktirilmiş filmlere  $500^\circ\text{C}$  tavlama işlemi uygulandıktan sonra oda sıcaklığındaki elektriksel iletkenliği,  $10^{-5} \text{ Scm}^{-2}$ 'den  $10^{-1} \text{ Scm}^{-2}$ 'ye arttığı gözlemlenmiştir. Tavlamanın ardından filmlerin amorf kalması ve oksijen boşluklarının oluşumu yoluyla taşıyıcı elektronlar üretilmesi ile gözlemlenen elektron hareketliliği oda sıcaklığında  $7 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 'e çıkmıştır. Diğer bir ilginç gözlem ise elektron hareketliliği, amorf filmin kristalleşmesiyle elde edilen çok kristalli  $\text{AgSbO}_3$ 'tekiyle hemen hemen aynı olmasıdır. Bu çalışmaya benzer şekilde  $\text{Cd}_2\text{GeO}_4$ ,  $\text{CdPbO}_5$  ve  $\text{MgIn}_2\text{O}_7$  gibi malzeme sistemlerinin aynı sonuçları vermesi nedeniyle, yarıiletken teknolojilerinde hem yüksek elektron hareketli hem de şeffaf olan amorf oksitlerin yeni bir sınıflandırmasına yol açılmıştır [109-111].

1996 yılında, Hosono ve arkadaşları, şu anda indiyum galyum çinko oksit (IGZO) olarak bilinen  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$  ve  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  malzemelerinin bir kombinasyonunu içeren dörtlü amorf oksit yarıiletkenini bildirdiler [95]. Bu tip şeffaf ve amorf oksit yarıiletkenler ilk olarak hidrojen ( $\text{H}^+$ ) katkılı  $\text{Cd}_2\text{GeO}_4$ ,  $\text{AgSbO}_3$  ve  $\text{Cd}_2\text{PbO}_4$  gibi ve elektron hareketliliği  $12 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 'ye kadar çıkabilen diğer çoklu sistemlerde gösterilmiştir. Ancak bu sistemlerin toksik elementlerden oluşması ve  $\text{H}^+$  katkısından dolayı, IGZO'yu şeffaf ve amorf oksit bir yarıiletken olarak üretmek için çok uygun bir seçenek haline getirmiştir [40,109,110,112,]. Bundan sonra esnek, şeffaf ve geniş alanlı elektronik uygulamalarında büyük ilerleme olmuş ve şimdiye kadar bu uygulamalar için tercih edilen silikonun yerini almaya başlamıştır. Ek olarak, a-IGZO gibi malzemelerin elektro aktif özellikleri, amorf silikon muadili ile karşılaştırıldığında daha büyük ölçüde elektriksel kararlılık sergiler [113]. Ayrıca, malzeme işlevselliği ile ilgili olarak, bu tür çoklu oksit yarıiletkenler, dönüştürücüler, halka osilatörler, depolama belleği ve sensörler gibi çeşitli uygulamaların yolunu açmıştır [114-118].

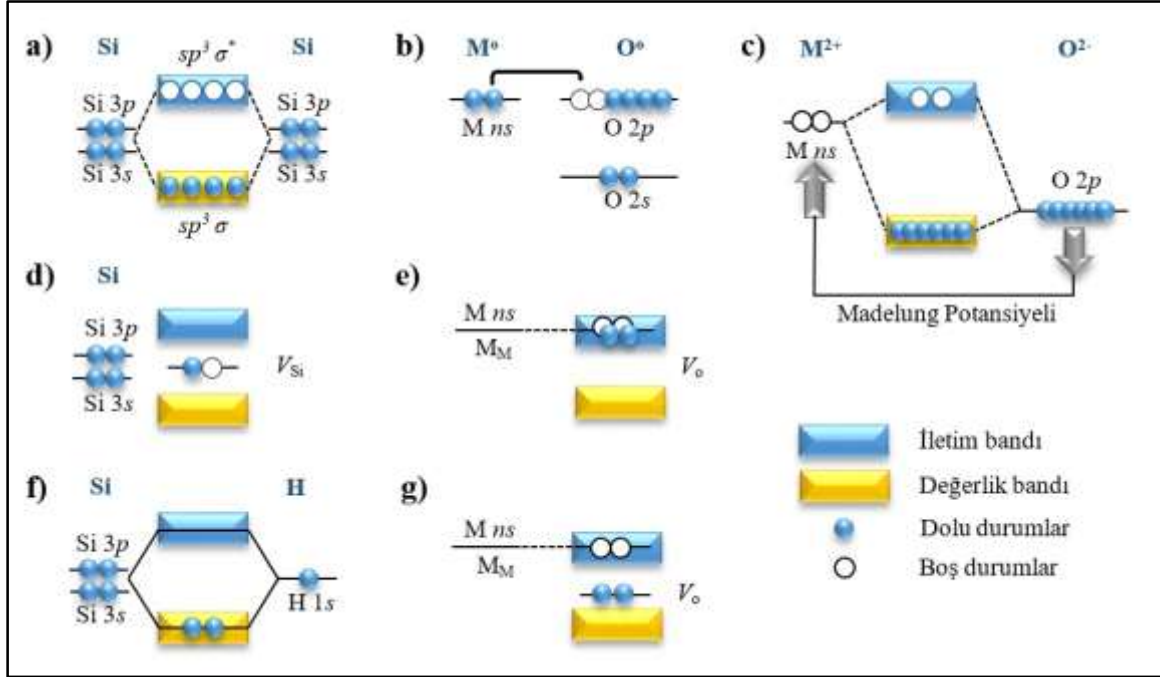
### 2.3.1. Amorf oksit yarıiletken fiziği

Amorf oksit yarıiletken malzemelerin üretilmesi için katyon seçimi,  $(n-1)d^{10}ns^0$  ( $n \geq 4$ ) elektronik konfigürasyonlu olan geçiş metallere yapılır. Bu tür malzeme seçiminin birincil nedeni, iletkenlik bandı minimumundaki en düşük işgal edilmemiş durumların, göreceli olarak küçük elektron etkin kütlesi ve yüksek bir elektron hareketliliği ile küresel metal  $ns^0$  orbitallerinin uzaysal yörüngesel yayılımından oluşmasıdır. İyonik oksit yarıiletkenlerinin kovalent silikon temelli yarıiletkenlere göre bu önemli avantajı, komşu atomların boş orbitalleri arasındaki örtüşmedeki bağ açısı bozulmasına karşı duyarsızlığından kaynaklanmaktadır. Kovalent yarıiletkenlerde ise bağ açısı bozulmaları, yük taşıyıcıların etkin hareketliliğini büyük ölçüde bozan, derin ve lokalize tuzak durumlarının yüksek konsantrasyonunu oluşturur [119]. Kristal ve amorf yarıiletkenlerde taşıyıcı iletim yollarını (yani, iletim bandı alt seviyeleri) gösteren şematik orbital örnekleri Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Kovalent yarıiletkenler, güçlü yönlendirici  $sp^3$  orbitallerinden oluşan taşıyıcı iletim yollarına sahiptir, bu nedenle yapısal rastgelelik, bağ örtüşmesinin büyüklüğünü, yani taşıyıcı hareketliliğini büyük ölçüde düşürür (Şekil 2.6a). Kürelerin metalin yörüngelerini belirttiği geçiş metal katyonlarından oluşan amorf oksit yarıiletkenlerde oksijen 2p-orbitallerinin katkısı küçüktür. Komşu metal orbitalleri arasındaki doğrudan örtüşme oldukça büyüktür ve amorf bir yapıda bile önemli ölçüde etkilenmez (Şekil 2.6b) [120].



Şekil 2.6. Kristal ve amorf yarıiletkenlerde taşıyıcı iletim yollarını gösteren şematik yörünge çizimleri

Şekil 2.7'de gösterildiği gibi, silisyum yarıiletkeninde enerji bant aralığı, değerlik bandı maksimumu ile iletkenlik bandı minimumu arasındaki boşluk olarak tanımlanır. İletim bandı minimumu ve değerlik bandı maksimumu, Si  $sp^3$  hibritleşmiş orbitallerin karşıt bağlayıcı ( $sp^3\sigma^*$ ) ve bağlayıcı ( $sp^3\sigma$ ) durumlarından oluşur ve bant aralığı,  $\sigma^*$ - $\sigma$  seviyelerinin enerji bölünmesiyle oluşur (Şekil 2.7a). İlki bağlayıcı  $sp^3$ -hibritlenmiş  $\sigma$ -orbitalleri ve ikincisi karşıt bağlayıcı  $sp^3$ -hibritlenmiş  $\sigma^*$ -orbitalleri olarak bilinir. Bir Si boşluğu ( $V_{Si}$ ) oluşursa, bant aralığı içinde n veya p-tipi Si aygıtlarda yük taşımına zarar veren, elektronlar ve deşikler için bir tuzak durumu olarak hareket edebilen, eşleşmemiş elektronlu boş bir bağ durumu üretilir (Şekil 2.7d). Bu boş bağlar veya tuzak durumları, genellikle bant aralığı içindeki tuzak durumlarını ortadan kaldıran hidrojen iyileştirme işlemiyle pasifleştirilir (Şekil 2.7f).



Şekil 2.7. Silisyum ve iyonik oksit yarıiletkenlerinin şematik elektronik yapıları

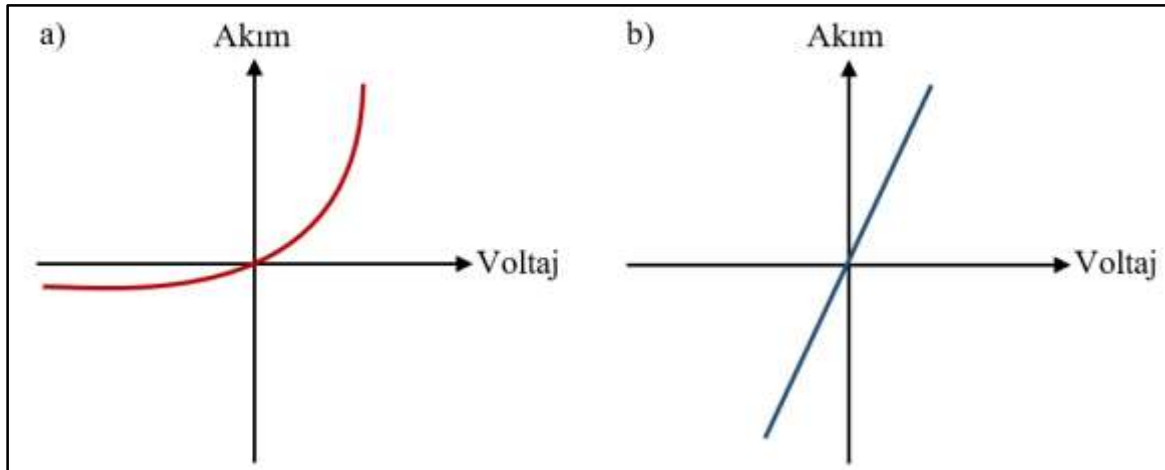
Bir amorf oksit yarıiletkenin bant diyagramı Şekil 2.7 b'de gösterilmektedir. Elektronların metalden oksijene transferi, bant yapısının yeniden düzenlenmesine yol açar, bu sayede Madelung potansiyeline göre metalik kationun enerji seviyesi artar ve oksijen anyonununki azalır (Şekil 2.7c). Madelung potansiyeli, metal kation bölgesindeki negatif elektrostatik potansiyel ile oksijen anyonu bölgesindeki pozitif potansiyel arasındaki farktır. Geçişsiz metal oksitlerde yük taşıyıcıların bant benzeri taşınımı, değerlik bandı maksimumunun tamamen dolu oksijen 2p-orbitallerinden, iletkenlik bandı minimumunun ise geniş bir uzaysal yayımlı boş metalik s-orbitallerden oluşturulduğu modifiyeli bant yapısı içinde meydana gelir (Şekil 2.7e). Bu anda bir oksijen boşluğu oluşturulursa, iletkenlik bandı minimumu durumlarının içinde veya yakınında, sığ vericiler olarak hareket edebilen, ancak elektronlar için tuzak merkezleri olarak hareket etmeyen durumlar görünür (Şekil 2.7g). Bu durumlar kararlı değildir ve artık elektron tuzak merkezleri olarak hareket edemeyen değerlik bandı maksimumu yakınındaki tamamen dolu durumlara gevşer. Amorf oksit yarıiletken malzemeleri için, Madelung potansiyeli, artan bant aralığı ve bant aralığı içindeki elektron tuzak durumlarının azaltılmış konsantrasyonunda çok önemli bir rol oynar [119,121-122].



### 3. METAL-YARIİLETKEN (MS) KONTAKLAR TEORİSİ

#### 3.1. MS Kontaklar

Metal ile yarıiletkenin uygun şartlar altında bir araya getirilmesi ile oluşturulan yapılar metal-yarıiletken (MS) kontaklar olarak adlandırılır. Yarıiletken ve metal arasında yüksek kalitede temasın sağlanabilmesi için metal ya da alaşımın mümkün olduğu kadar düşük dirençli, yarıiletken yüzeyinin ise temiz ve pürüzsüz olması gerekmektedir [123]. Metal ile yarıiletken bir araya getirildiğinde iki çeşit kontak oluşabilir. Bunlar ohmik ve doğrultucu (Schottky) kontak olarak adlandırılır. Şekil 3.1’de gösterildiği gibi Ohmik kontakın akım-gerilim karakteristiği lineer olan bir yapıya sahipken, doğrultucu kontak lineer olmayan bir akım-gerilim karakteristiğine sahiptir.



Şekil 3.1. Doğrultucu ve ohmik kontaklar için akım-gerilim grafikleri a) Doğrultucu kontak b) Ohmik kontak

Kontak türünün farklı olması yarıiletken ve metalin iş fonksiyonlarına ve yarıiletkenin tipine (n-tip ve p-tip) bağlıdır. Burada yarıiletkenin iş fonksiyonunu  $\Phi_s$ , metalin iş fonksiyonunu ise  $\Phi_m$  temsil etmektedir. Çizelge 3.1’de iş fonksiyonlarının farklılıkları ve yarıiletken tiplerine göre kontak oluşum çeşitleri verildi [124].

Çizelge 3.1. İş fonksiyonlarına göre yarıiletken ve metal kontak türleri

İş fonksiyonu	Yarıiletken Tipi	Kontak Biçimi
$\Phi_m < \Phi_s$	<i>n</i> -tipi	Ohmik kontak
$\Phi_m > \Phi_s$	<i>n</i> -tipi	Doğrultucu kontak
$\Phi_m < \Phi_s$	<i>p</i> -tipi	Doğrultucu kontak
$\Phi_m > \Phi_s$	<i>p</i> -tipi	Ohmik kontak

Yarıiletken tipi ve iş fonksiyonuna bağlı olarak, metal ile yarıiletkenin atomik ölçekte temas etmesi durumunda, doğrultucu kontak oluşur ve bariyer olarak tanımlanan bir potansiyel fark ortaya çıkar. Bu potansiyel fark, metal-yarıiletken arayüzündeki yüklerin difüzyonu sonucu meydana gelir. *n*-tipi doğrultucu kontaklarda, yarıiletken tarafında bulunan çoğunluk yük taşıyıcıları, metalin ön yüzeyine; aynı şekilde, metal tarafındaki çoğunluk yük taşıyıcıları da yarıiletkenin ön yüzeyine difüzyonla geçmesi MS ara yüzeyinde bir potansiyel bariyer oluştururlar. Bu şekilde MS ara yüzeyinde hareketli yüklerden arınmış bir bölge oluşur [125]. Metal/*n*-tipi yarıiletken ara yüzeyindeki bu potansiyel bariyer, diyota pozitif gerilim uygulandığında akımın iletilmesini, negatif gerilimde ise küçük bir kaçak akım dışında iletimin olmamasını sağlar.

Bir yarıiletkenin özelliklerini anlamak ve MS kontak türünün belirlenmesi için aşağıdaki tanımlamalardan faydalanılmaktadır;

**Fermi Enerjisi:** İletkenler için fermi enerjisi mutlak sıfırda (-273 °C) elektronlar tarafından işgal edilmiş olan en yüksek enerjili dolu seviyeyi belirtir. Yarıiletkenler için sıcaklık ve değerlik bandındaki taşıyıcı yoğunluğuna göre değişen, yasak enerji aralığındaki görece görece seviye olarak tanımlanır [126].

**Vakum Seviyesi:** Elektronik seviye olarak metalin dış kısmında ve kinetik enerji değeri sıfır olan elektron enerji seviyesi ya da bir elektronun serbest kalabilmesi için gereken en düşük enerji miktarını ifade eder [123].

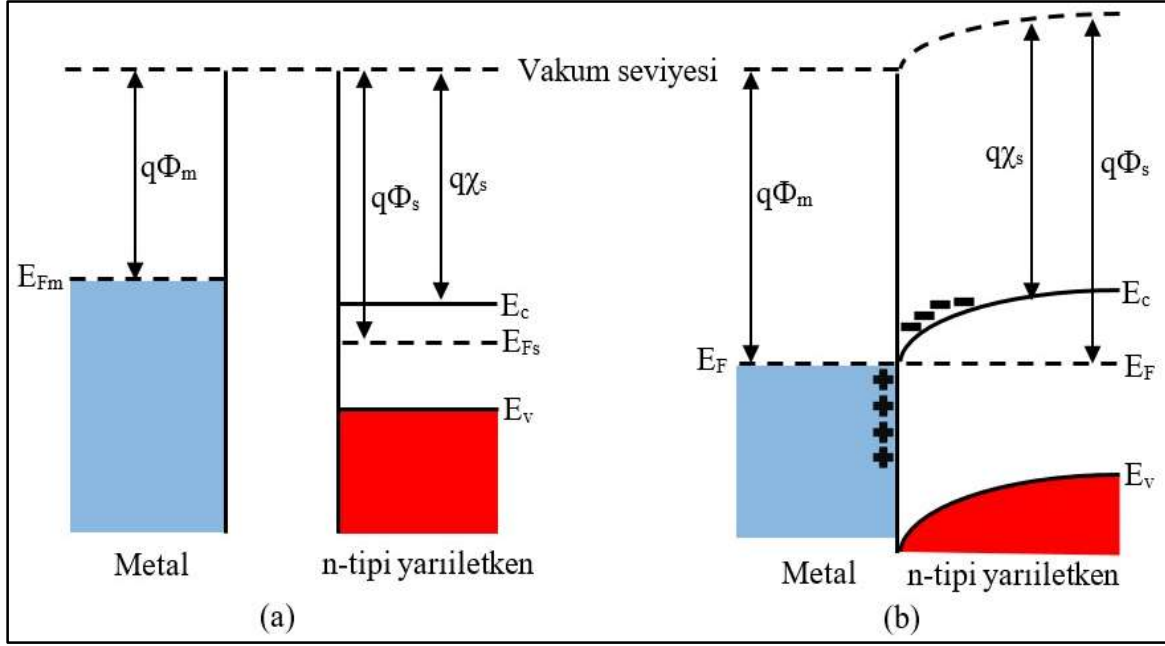
**İş Fonksiyonu:** Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine bir elektronu göndermek için elektrona verilmesi gereken en az enerji miktarıdır.  $\Phi_s$ , yarıiletken iş fonksiyonunu,  $\Phi_m$  ise

metalin iş fonksiyonu, temsil eder. Fermi enerjisi, katkılanan atom çeşidi ve yoğunluğuna bağlı olarak değiştiği için, iş fonksiyonu da bu değişkenlere bağlı olarak farklılık gösterebilen bir parametredir [126].

Elektron İlgisi: Yarıiletkenin iletkenlik bandı taban seviyesinde bulunan elektronun enerjisi ile vakum seviyesi arasındaki fark olarak tanımlanır. Elektron ilgisi, katkı atom çeşidi ve yoğunluğu ile değişmeyen bir ifadedir [127].

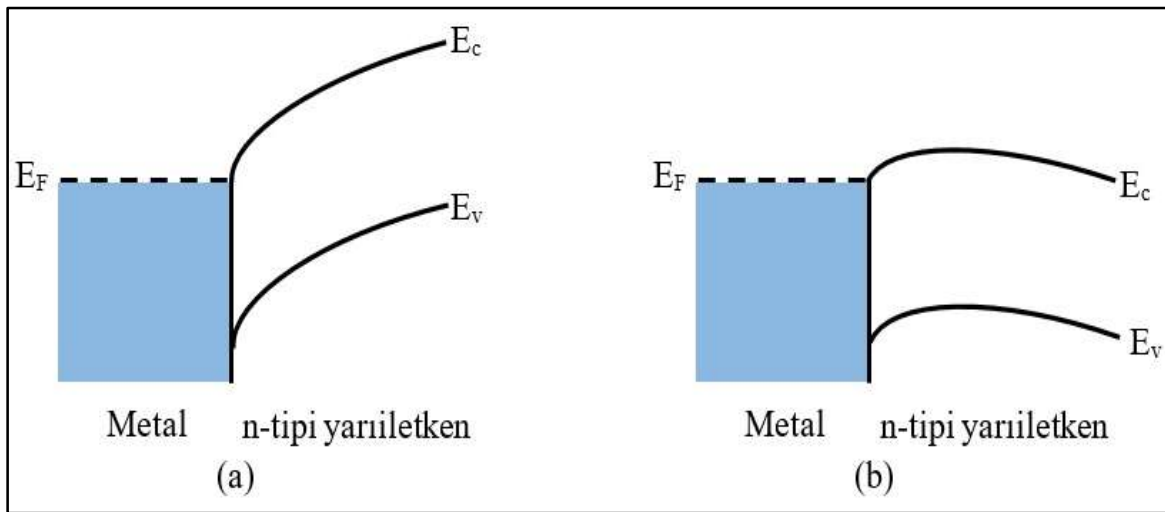
### 3.1.1. MS (n-tipi) ohmik kontak oluşumu

İş fonksiyonları açısından bakıldığında metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçük ( $\Phi_s > \Phi_m$ ) olduğu durumda metal ile yarıiletken temas edildiğinde oluşan kontak türü ohmik kontak türüdür. Bunun durum, termal denge durumunda dışarıdan uygulanan doğru veya ters gerilimin her ikisinin de akım iletimi ile sonuçlanması anlamına gelir [123]. Şekil 3.2’de metal ve n-tipi yarıiletken bant şematikleri verildi. Kontak öncesi enerji bant şematiğine göre, metalin Fermi seviyesi, yarıiletkenin Fermi seviyesinden  $\Phi_s - \Phi_m$  kadar yukarıda konumlanmıştır. Bu iki malzeme kontak haline getirildiğinde, metalden yani iş fonksiyonu küçük olan malzemeden yarıiletkene yani iş fonksiyonu büyük olan malzemeye yük akışı meydana gelir. Metalden kopan elektronlar yarıiletken tarafına geçer ve metal tarafına pozitif, yarıiletken tarafına negatif yüzey yükü oluştururlar. Oluşan yük akışı tamamlanıp termal denge oluştuğunda yarıiletken Fermi enerji seviyesi  $\Phi_s - \Phi_m$  kadar yükselmiş olur. [128].



Şekil 3.2. MS (n-tipi) ohmik kontak bant şematikleri a) Kontak öncesi b) Kontak sonrası

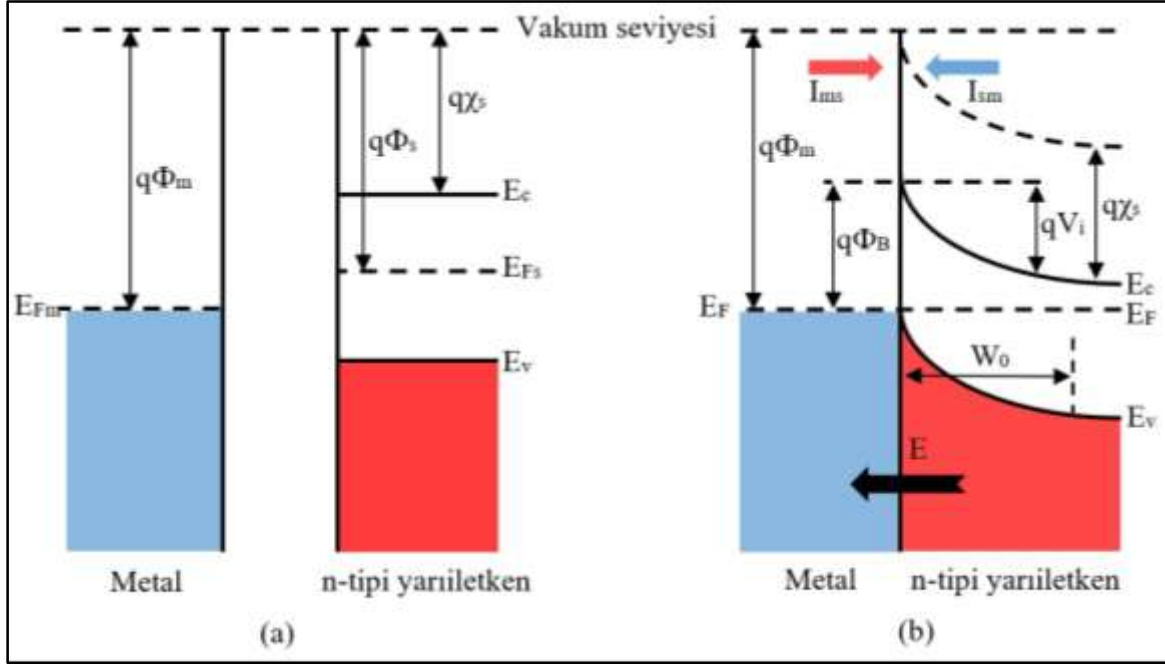
Şekil 3.3a'da gösterildiği gibi metal tarafına doğru gerilim uygulandığında, yarıiletken tarafından metal tarafına iletilecek elektronlar için herhangi bir bariyer olmayacağından kolayca hareket edebilirler. Bu gerilim yarıiletken tarafına uygulandığında bariyer yüksekliği az olacaktır ve Şekil 3.3b'de gösterildiği gibi elektronlar metalden yarıiletkene doğru rahatlıkla iletilecektir. Elektronların iki yönde de rahatça iletilebildiği bu yapılar Ohmik kontak olarak isimlendirilirler [129].



Şekil 3.3. MS (n-tipi) ohmik kontakın gerilim altında bant şematikleri a) Doğru gerilim şartlarında b) Ters gerilim şartlarında

### 3.1.2. MS (n-tipi) doğrultucu kontak oluşumu

Yarıiletken ile metal arasında  $\Phi_m > \Phi_s$  iş fonksiyonları ilişkisi olduğunda oluşan temas, doğrultucu (Schottky) kontak olarak adlandırılır. [124]. Bu kontak türünde akım taşıyıcıları (elektron ve boşluk), ohmik kontakın aksine bir doğrultudan diğer doğrultuya göre daha kolay akar [130]. Şekil 3.4a'da metal ile n-tipi yarıiletkenin bant şematığı verildi. Şematiğe göre, metal Fermi seviyesi ve yarıiletken Fermi seviyesi arasında  $\Phi_m - \Phi_s$  kadar fark vardır ve metal fermi seviyesi bu fark kadar aşağıda konumlanmıştır. Şekil 3.4b'de gösterildiği gibi Fermi enerji seviyeleri farklı olan bu iki malzeme kontak haline getirildiğinde, termodinamik etkilerin bir sonucu olarak, yarıiletkenden yani iş fonksiyonu küçük olan taraftan metale yani iş fonksiyonu büyük olan tarafa taşıyıcı iletimi gerçekleşir. Bu nedenle, yarıiletken yüzeyinden metal tarafına elektron geçer ve bu süreçte geride iyonize olmuş donörler bırakırlar. Yük alış-verişi tamamlandığında yani termodinamik denge oluştuğunda, metal ile yarıiletkenin Fermi seviyeleri aynı hizaya gelir. Fermi seviyelerinin aynı hizaya gelmesi ile ve yarıiletkenin yasak enerji aralığı kontak sebebi ile değişmeyeceğinden Şekil 3.4b'de görüldüğü gibi enerji seviyelerinde paralel olarak  $\Phi_m - \Phi_s$  kadar bir bükülme meydana gelir. Kontakta oluşan bir dipol tabakası nedeniyle metal-yarıiletken ara yüzeyinde bir potansiyel bariyer ortaya çıkar [131]. Bu potansiyel bariyer miktarı yarıiletken tarafından  $qV_i$ , metal tarafından ise  $q\Phi_B$  kadar görünecektir. MS yapı termal denge durumuna geldiğinde, yarıiletkenden metale iletilen elektronlar ( $I_{sm}$ ) ile metalden yarıiletkene iletilen elektronlar ( $I_{ms}$ ) birbirini dengeleyerek net bir akım oluşturmaz. Metal tarafında dik bir şekilde yükselen potansiyel bariyer, yarıiletken tarafında  $W_0$  genişliğinde ve yüklerden arınmış bir bölge oluşturacaktır. Bu  $W_0$  bölgesine uzay yükü bölgesi ya da deplasyon bölgesi olarak adlandırılır ve sığa özelliği göstererek ve bir kondansatör gibi davranır [132]. Uzay yükü bölgesinin kapasitesi tabakanın kalınlığına ve bu kalınlık içinde iyonize olmuş donör yoğunluğuna bağlıdır [133].



Şekil 3.4. MS (n-tipi) için doğrultucu kontak bant şematikleri a) Kontak öncesi b) Kontak sonrası

Yarıiletken tarafında oluşan ve  $W_0$  kalınlığında olan uzay yükü bölgesi, sınırlı miktarda taşıyıcı yoğunluğuna sahiptir. Bu bölgenin direnci metal ve yarıiletkenin bölgenin direnci ile karşılaştırıldığında oldukça yüksektir. Yüksek olan bu dirençten dolayı uygulanan dış gerilimin hemen hemen tamamı uzay yükü bölgesine gelir. Uygulanan ters veya doğru gerilim termal denge durumundaki enerji-bant diyagramında değişikliğe neden olur [132].

MS kantağa doğru gerilim ( $V_F$ ) uygulandığında, yani metal tarafına bataryanın pozitif kısmı yarıiletken tarafına ise negatif kısmı temas ettirildiğinde denge halinde kurulmuş iç elektrik alana karşı elektrik alan meydana gelir ve bu durumun etkisi ile uzay yükü bölgesi genişliği ( $W_0$ ) azalır. Uygulanan bu gerilim, eşit seviyede olan metal ile yarıiletkenin Fermi seviyeleri arasındaki dengeyi bozar ve yarıiletkenin Fermi seviyesi uygulanan gerilim kadar yukarı çıkar. Şekil 3.5a'da da görüldüğü üzere yarıiletken tarafından  $qV_i$  olarak görülen bariyer yüksekliği  $q(V_i - V_F)$ 'ye düşer. Bu potansiyel bariyer düşüşü, metal kısımdan yarıiletken tarafına doğru olan akımda değişikliğe sebep olmazken, yarıiletken tarafından metale tarafına iletilen elektron miktarında ve dolayısıyla akımda ciddi bir artışa neden olur [123]. Uygulanan bu gerilim, yarıiletken tarafından metale doğru üstel olarak artan net  $I$  akımına sebep olur ve bu net akım aşağıdaki ifade ile ifade edilir;

$$I_{net} = I_0 \left( \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (3.1)$$

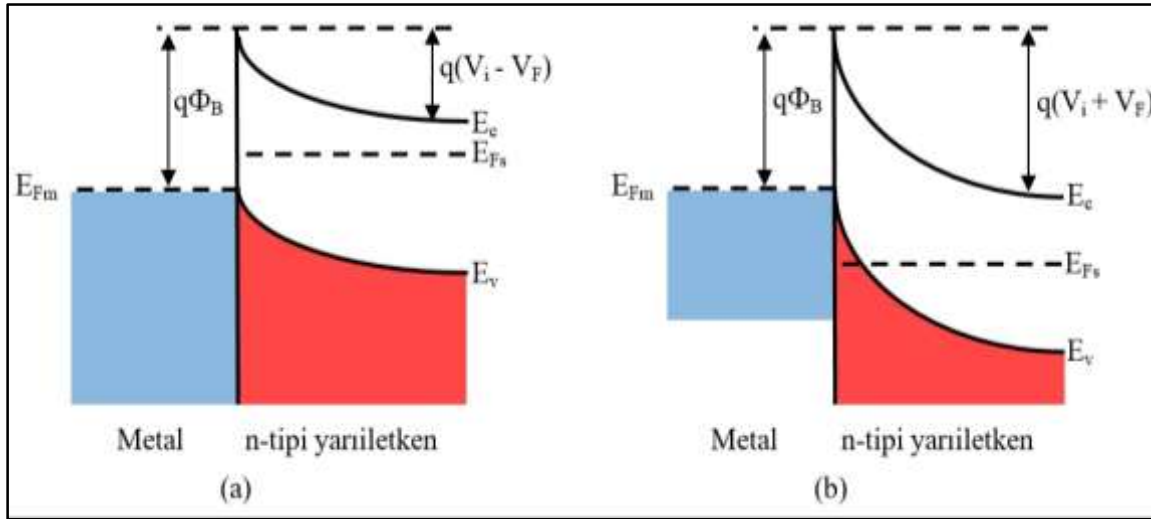
Bu eşitlikte  $I_0$  terimi doyma akımı,  $k$  terimi Boltzman sabiti ve  $T$  terimi Kelvin cinsinden sıcaklıktır.  $I_0$  yani doyum akımını aşağıdaki eşitlik ile verir;

$$I_0 = AA^* \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \quad (3.2)$$

Burada  $A$  terimi diyotun aktif kontak alanıdır,  $A^*$  terimi ise;

$$A^* = \frac{4\pi qm^* k^2}{h^3} \quad (3.3)$$

eşitliği ile ifade edilen ve n-tipi Si için  $120 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$  değerine sahip olan Richardson sabitidir.  $\Phi_B$  ise metal yarıiletken ara yüzeyinde oluşan bariyer yüksekliğidir [134].



Şekil 3.5. MS (n-tipi) doğrultucu kontakın gerilim altında bant şematikleri a) Doğru gerilim şartlarında b) Ters gerilim şartlarında

MS kontakta ters bir gerilim ( $V_F$ ) uygulandığında, yani metale bataryanın negatif tarafı yarıiletkene ise pozitif tarafı temas ettirildiğinde denge halinde kurulmuş iç elektrik alana benzer akışta elektrik alan meydana gelir ve bu elektrik alan etkisi ile uzay yükü bölgesi genişliği ( $W_0$ ) artar. Şekil 3.5b'de görüldüğü üzere yarıiletken tarafından  $qV_i$  olarak

görülen bariyer yüksekliği  $q(V_i+V_F)$ 'ye yükselir. Ters gerilimde metal tarafından yarıiletken tarafına iletilen elektron miktarında değişiklik olmuyorken, yarıiletkenenden metale iletilen elektron miktarı başlangıçtaki termal denge haline göre azalır. Bundan dolayı metal tarafından yarıiletken tarafına akım meydana gelir. Bu akım doğru gerilim altındaki akımla kıyaslandığında çok küçüktür. Doğrultucu kontaklar, ters gerilim altında oluşturulan akımı hemen hemen hiç iletmemeleri ve doğru gerilim altında oluşturulan akımı kolayca iletme özelliği ile bilinir. Bu özellik MS veya MIS Schottky diyotlarda "doğrultma özelliği" olarak adlandırılır [123].

### 3.2. MS Kontaklarda Akım-İletim Mekanizmaları

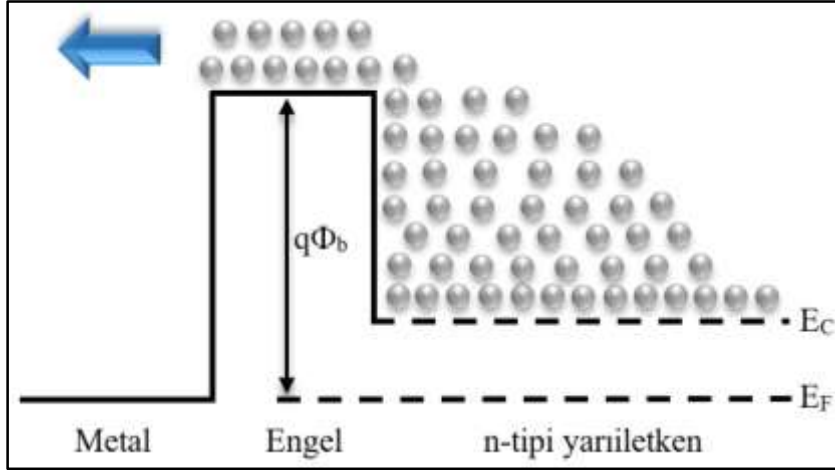
Akım iletimi MS kontaklarda ekseriyetle çoğunluk yük taşıyıcıları tarafından sağlanır. p-tipi yarıiletkenlerde holler çoğunluk yük taşıyıcıları durumundayken, n-tipi yarıiletkenlerde ise elektronlar çoğunluk yük taşıyıcıları durumundadır [124]. MS kontağa termal denge durumunda bir gerilim uygulandığı zaman taşıyıcılar hareket etmeye başlar. Bu taşıyıcılar metal-yarıiletken ara yüzeyinde karşılaştıkları potansiyel bariyeri aşarak akım oluştururlar. Akım, gerekli enerjiyi alan taşıyıcıların potansiyel bariyeri aşarak, engel boyunca kuantum mekaniksel tünelleme yaparak ya da taşıyıcıların yeniden birleşme ile oluşan farklı akım-iletim mekanizmaları ile oluşur [123]. Oluşan bu akım-iletim mekanizmaları; ara yüzey durumları, sıcaklık, yarıiletkenin tipi, seri direnç, katkı atomlarının yoğunluğu gibi faktörlerden oldukça etkilenir [135]. Bu nedenle metal-yarıiletken kontaklarda elektriksel karakteristiklerin belirlenmesi için hangi durumlarda hangi akım-iletim mekanizmasının baskın olduğunu belirlemek önemlidir. MS kontaklarda temel akım-iletim mekanizmaları;

- Termoiyonik emisyon teorisi (TE)
- Difüzyon teorisi
- Tüketim bölgesi üretim ve yeniden birleşme
- Kuantum mekaniksel tünelleme
- $T_0$  etkili akım iletimi

şeklinde sıralanabilir [138].

MS kontaklarda, oluşma ihtimali en yüksek olan mekanizma, gerekli enerjiyi kazanan taşıyıcıların potansiyel bariyeri atlayarak oluşturdukları termoiyonik emisyon akım-iletim





Şekil 3.7. MS (n-tipi) doğrultucu kontak için TE mekanizma şematifi

MS kontaklarda akım-iletim mekanizmasını ilk olarak Bethe bildirmiştir. Bethe bu tür kontaklarda akım iletiminin çoğunluk taşıyıcılar tarafından gerçekleştiğini kabul ederek termiyonik emisyon mekanizmasının varsayımlarını aşağıdaki şekilde sıralamıştır;

- Potansiyel bariyer yüksekliği ( $\Phi_b$ ),  $kT/q$  enerji değerinden oldukça büyüktür.
- Uzak yükü bölgesinde taşıyıcı çarpışmaları olmamaktadır. Yani taşıyıcıların, uzak yükü bölgesine kıyasla ortalama serbest yolları daha fazladır.
- Potansiyel bariyerin şekli önemsiz, akım sadece bariyer yüksekliğine bağlıdır.
- Görüntü (hayali) kuvvetlerin etkisi ihmal edilmektedir ve bariyerin şekli önemsizdir ve akım, potansiyel bariyer yüksekliğine çok zayıf bağlıdır [137].

Yukarıda zikredilen temel varsayımlara göre yarıiletkenden metale doğru akı yoğunluğu olan  $J_{S \rightarrow M}$  ifadesi, potansiyel bariyeri aşmaya yetecek enerjiye sahip elektronların hızı ve konsantrasyonu ile belirtilir.

$$J_{S \rightarrow M} = \int_{E_F + q\Phi_b}^{\infty} qV_x dn \quad (3.4)$$

Burada,  $E_F + q\Phi_b$  TE için gerekli minimum enerjidir,  $V_x$  ise kontak yüzeyine dik taşınma yönündeki hız bileşenidir. Bu yapılarda hızları  $V_x$  ile  $V_x + \Delta V_x$  arasında olan elektronların yoğunluk ifadesi aşağıdaki gibi verilir;

$$dn_x = N_d \left( \frac{m_n^*}{2\pi kT} \right)^{1/2} \exp\left( -\frac{m_n^* V_x^2}{2kT} \right)^{1/2} dV_x \quad (3.5)$$

Burada  $m_n^*$  terimi elektronun etkin kütlesi,  $N_d$  terimi yarıiletken katkı atom yoğunluğu,  $k$  terimi Boltzmann sabiti ve  $T$  terimi Kelvin cinsinden sıcaklıktır.  $m_n^* V_x^2 > 2eV_D$  şartını karşılayan elektronlar için  $J_{S \rightarrow M}$  akım yoğunluğu aşağıdaki gibi verilir;

$$\begin{aligned} J_{S \rightarrow M} &= \int_{V_{0x}}^{\infty} qV_x dn_x = \int_{V_{0x}}^{\infty} qN_d \left( \frac{m_n^*}{2\pi kT} \right)^{1/2} V_x \exp\left( -\frac{m_n^* V_x^2}{2kT} \right) dV_x \\ &= qN_d \left( \frac{kT}{2\pi m_n^*} \right)^{1/2} \exp\left( -\frac{m_n^* V_x^2}{2kT} \right) = qN_d \left( \frac{kT}{2\pi m_n^*} \right)^{1/2} \exp\left( -\frac{qV_D}{kT} \right) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Bu ifadede  $V_D$  terimi difüzyon potansiyelidir. MS kontağın metal kısmından görünen potansiyel bariyer yüksekliği ve elektronlar için etkin Richardson sabiti  $A^*$ ;

$$q\Phi_{Bn} = qV_D + E_F \quad (3.7)$$

$$A^* = \frac{4\pi q m_n^* k^2}{h^3} \quad (3.8)$$

şeklinde ifade edilirler. Bu değerler cinsinden  $J_{S \rightarrow M}$  ifadesi için aşağıdaki eşitlik yazılabilir;

$$J_{S \rightarrow M} = A^* T^2 \exp\left( -\frac{q\Phi_{Bn}}{kT} \right) \quad (3.9)$$

MS doğrultucu kontağa pozitif gerilim uygulandığında, bariyer yüksekliğinin azalması nedeniyle akım yoğunluğu değeri,  $\exp(eV/kT)$  terimiyle orantılı olarak artar. Bu durumda, yarıiletken ile metal arasındaki akım yoğunluğu  $J_{S \rightarrow M}$ , aşağıdaki ifade ile belirtilir;

$$J_{S \rightarrow M} = A^* T^2 \exp\left( -\frac{q\Phi_{Bn}}{kT} \right) \exp\left( \frac{qV}{kT} \right) \quad (3.10)$$

Her iki yönde akım yoğunlukları termal denge durumunda eşittir ve toplam akım yoğunluğu;

$$J_n = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.11)$$

şeklinde ifade edilir. Burada;

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (3.12)$$

ifadesi ters doyma akım yoğunluğudur. Bu ifade genellikle sızıntı akımı olarak da bilinir. Bariyer yüksekliğinde elektronlar ile deşikler arasındaki elektrostatik etkileşimden ve uygulanan gerilimden dolayı  $q(\Delta\Phi_{Bn})$  kadar alçalma olur. Bu alçalma;

$$q(\Delta\Phi_{Bn}) = \alpha_o (V_D + V)^{1/4} \quad (3.13)$$

şeklinde ifade edilir. Dolayısı ile akım yoğunluğu ifadesinde  $e\Phi_{Bn}$  yerine  $(\Phi_{Bn} - \Delta\Phi_{Bn})$  yazılırsa;

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \exp\left(\alpha_o (V_D + V)^{1/4}\right) \quad (3.14)$$

eşitliği ile ifade edilir. Buradan görüleceği üzere doyma akım yoğunluğunun gerilime bağımlılığı açıktır.  $\Phi_{Bn}$  ifadesi sıfır gerilimde ve Schottky etkisinin bulunmadığı durum için bariyer yüksekliğidir ve  $\alpha_o$  sabiti;

$$\alpha_o = \left[ \frac{q^4 N_d}{8(\epsilon_s \epsilon_o)^3 \pi^2} \right]^{1/4} \quad (3.15)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $\epsilon_o$  boşluğun  $\epsilon_s$  ise yarıiletkenin dielektrik sabitleridir [123,129,137-138].

### 3.2.2. Difüzyon teorisi

Farklı yük yoğunluğuna sahip iki bölge arasında, daha yüksek yoğunluktan daha düşük yoğunluğa doğru olan yük geçişleri, difüzyon olarak adlandırılır. 1938 yılında Schottky tarafından ifade edilen difüzyon teorisinin temeli aşağıdaki varsayımlardır.

- Potansiyel bariyer yüksekliği  $kT/q$  enerjisinden büyüktür.
- Uzak yük bölgesindeki elektronların çarpışma ihtimalleri dâhil edilmiştir.
- $x=0$  ve  $x=W_D$  bölgelerinde taşıyıcı konsantrasyonları termal denge hallerine sahiptirler ve akımdan etkilenmezler.
- Yarıiletken safsızlık yoğunluğu ( $n_i < 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) yüksek değildir. Yani yarıiletken dejenere değildir.

Bu temel varsayımlar ışığında, metal-n tipi yarıiletken kontaklarda uzak yük bölgesindeki akımın, bölgesel alan ve yoğunluk farklarına bağlı olarak değiştiği göz önüne alınarak aşağıdaki şekilde belirtilebilir.

$$J_x = J_n = q \left[ n(x) \mu_n E(x) + D_n \frac{\partial n}{\partial x} \right] = q D_n \left[ \left( -\frac{qn(x)}{kT} \right) \left( \frac{\partial V(x)}{\partial x} \right) + \frac{\partial n}{\partial x} \right] \quad (3.16)$$

Bu eşitlikte  $n(x)$  terimi elektron yoğunluğu,  $E(x)$  terimi konuma bağlı elektrik alan,  $\mu$  terimi elektron mobilitesi ve  $D_n$  terimi elektron difüzyon sabitidir. Bu durumda difüzyon teorisi gereğince akım yoğunluğu aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$J_x = J_{SD} \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.17)$$

Bu eşitlikte  $J_{SD}$  terimi doyum akım yoğunluğu olup,

$$J_{SD} = \left( \frac{q^2 N_c D_n}{kT} \right) \left[ \frac{q(V_d - V) 2N_D}{\epsilon_s} \right]^{1/2} \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT}\right) \quad (3.18)$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitlikte  $N_C$  terimi iletkenlik bandındaki taşıyıcı yoğunluğu,  $N_D$  terimi donör yoğunluğu,  $V_d$  terimi difüzyon gerilimi ve  $\epsilon_s$  terimi yarıiletkenin dielektrik geçirgenliğidir. Difüzyon teorisi ve termoiyonik emisyon teorisinden türeyen ifadeler çok benzerdir. Difüzyon teorisinin doyum akım yoğunluğu,  $J_{SD}$  gerilime daha hızlı tepki gösterir ancak sıcaklığa bağlı termoiyonik emisyon doyum akım yoğunluğuna göre daha küçüktür [123,136,139].

### 3.2.3. Tükenim bölgesi üretim ve yeniden birleşme

Tükenim bölgesinde, bilhassa orta sıcaklık değerlerinde etkili olan lokal durumlar sebebiyle doğan bir mekanizma, üretim (jenerasyon) ve yeniden birleşme (rekombinasyon) etkilerini içerir ve termoiyonik emisyon mekanizmasına benzer bir değişim sergiler. Shockley-Read ve Hall teorileri gereğince en baskın rekombinasyon merkezleri, yasak enerji bant aralığının ortasına yakın enerji değerlerine sahip durumlardır. Doğrultucu kontaklarda rekombinasyonun etkili olduğu durumlarda, doğrultucu kontak akım iletim mekanizması ile pn eklem diyotun akım iletim mekanizması benzerlik göstermektedir. Küçük bir doğru gerilimde baskın rekombinasyon akım yoğunluğu;

$$J_r = J_{ro} \exp\left(\frac{qV}{E_0}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)\right] \quad (3.24)$$

şeklinde yazılır. Burada  $J_{ro} = qn_i W / 2\tau_r$  olup  $n_i$  asal elektron yoğunluğu,  $\tau_r$  terimi elektronların bu alanı terk edene kadar geçen süre,  $W$  terimi tükenim bölgesinin genişliğidir. Rekombinasyon akımının termoiyonik akıma oranı;

$$T^2 T_r \exp\left[q\left(\frac{E_g + V - 2\Phi_B}{2kT}\right)\right] \quad (3.25)$$

şeklinde ifade edilir. Bu orantı ifadesine göre  $\tau_r$  ifadesi  $E_g$  ve  $V$  ile doğru orantılıyken,  $\Phi_B$  terimiyle ters orantılıdır. Doğru gerilimdeki rekombinasyon akımının sıcaklıkla ters orantılı değişimi, düşük ve yüksek sıcaklıklarda iki farklı eğimi olan bir doğru oluşturur. Aktivasyon enerjisi, düşük sıcaklıklarda  $E_g - V/2$  değerine yaklaşırken, yüksek sıcaklıklarda ise  $\Phi_B - V$  değerine benzer bir düzeyde olacaktır. Bu durumlar değerlendirildiğinde

doğrultucu diyotların ideal durumdan sapma nedenlerinden bir tanesi rekombinasyon akımıdır. Bu sapsmalar bilhassa düşük sıcaklıklarda daha belirgindir.

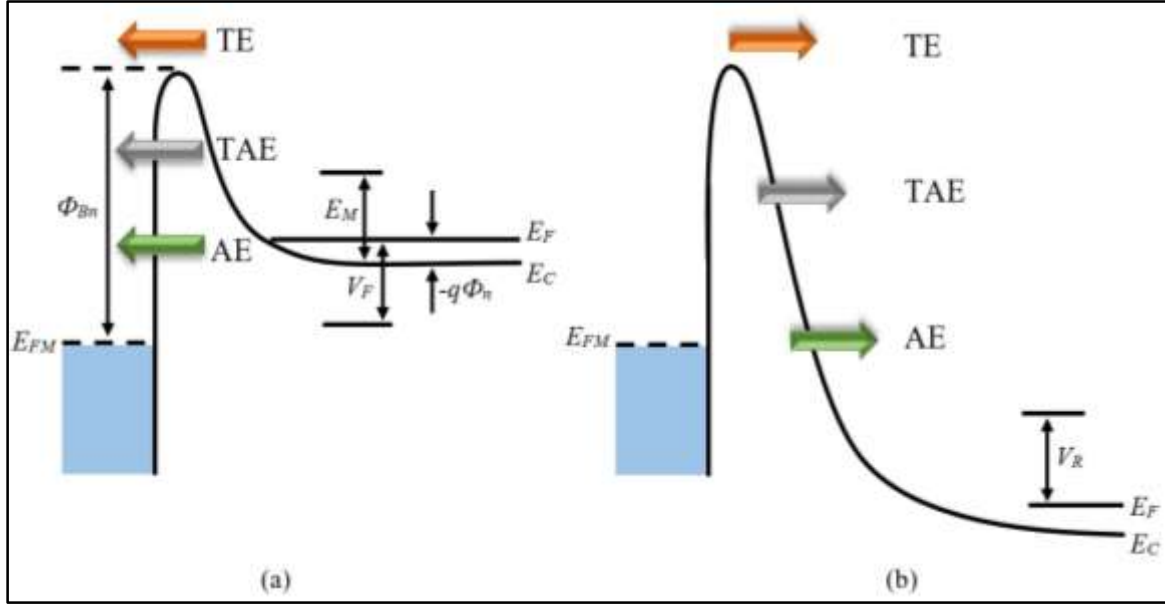
Eğer az bir katkı konsantrasyonu ile tünelleme ve hayali kuvvet etkisi azaltılır ise, uzay yükü bölgesinde elektron-deşik çiftlerinin jenerasyonundan yüzünden ters bir akım türeyebilir. Türeyen akım rekombinasyonun tersidir ve jenerasyon mekanizması ile oluşan akım;

$$J_g = \frac{qn_i w}{2r\tau} \quad (3.26)$$

ile verilir. Uzay yükü bölgesinin genişliği  $V_d+V$  ile orantılı olduğundan akım yoğunluğu negatif gerilimle artar. Jenerasyon akımı, termioyonik emisyon bileşeninden daha düşük aktivasyon enerjisine sahip olduğundan yüksek sıcaklıklardan ziyade düşük sıcaklıklarda çok önemlidir [123,137-138].

### 3.2.4. Kuantum mekaniksel tünelleme

Metal-yarıiletken doğrultucu kontaklarda, elektronlar sadece termioyonik emisyon mekanizması ile değil, aynı zamanda kuantum mekanik tünelleme fenomeni sayesinde de potansiyel bariyeri aşabilirler [139]. Kuantum mekaniksel tünelleme olayı yüksek katkılanmış yarıiletkenlerde ( $N > 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) ve çok düşük sıcaklıklarda doğru gerilimde gerçekleşirken, düşük sıcaklıklarda ve düşük katkı yarıiletkenlerde ters gerilimde meydana gelir. Kuantum mekanik tünelleme, termioyonik alan emisyonu (TAE) ve alan emisyonu (AE) olarak iki ana kategoriye ayrılır. Doğru gerilim yönündeki akım, aşırı katkı yarıiletkenlerde ve düşük sıcaklık durumunda, yarıiletkenin fermi seviyesine yakın olan elektronların tünellemesiyle artar. Bu durum alan emisyonu olarak tanımlanır. Sıcaklığın arttırılmasıyla beraber elektronlar daha yüksek enerji seviyelerine uyarılırlar ve böylece doğru orantılı olarak bariyer içinde tünelleme olasılıkları artar. Bu durumda ise doğru gerilim yönündeki akım artar. Bu mekanizma ise termioyonik alan emisyonu olarak adlandırılır. Doğru ve ters gerilimde kuantum mekaniksel tünelleme şematikleri şekil 3.8' de gösterilmiştir [135-136].



Şekil 3.8. MS (n-tipi) doğrultucu kontaklar için kuantum mekaniksel tünelleme bant şematikleri a) Doğru gerilim altında b) Ters gerilim altında

Sıcaklık değeri daha da arttığında, akım taşıyıcıları potansiyel bariyeri aşmak için gerekli enerjiyi elde ederler, bu sayede tünelleme olmadan da potansiyel bariyeri geçip karşı tarafa geçebilirler. Bu durum, daha önceden bahsedilen termoiyonik emisyon (TE) teorisiidir.

Termoiyonik alan emisyonu gereğince, doğru öngerilim I-V ilişkisi;

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{E_0}\right) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right) \right] \quad (3.27)$$

şeklinde verilir. Burada  $E_0$ ;

$$E_0 = E_{00} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \quad (3.28)$$

şeklinde verilir.  $E_{00}$  tünelleme ihtimalini veren enerji ifadesidir ve

$$E_{00} = \frac{qh}{4\pi} \left( \frac{N_D}{m^* \epsilon_s} \right)^{1/2} \quad (3.29)$$

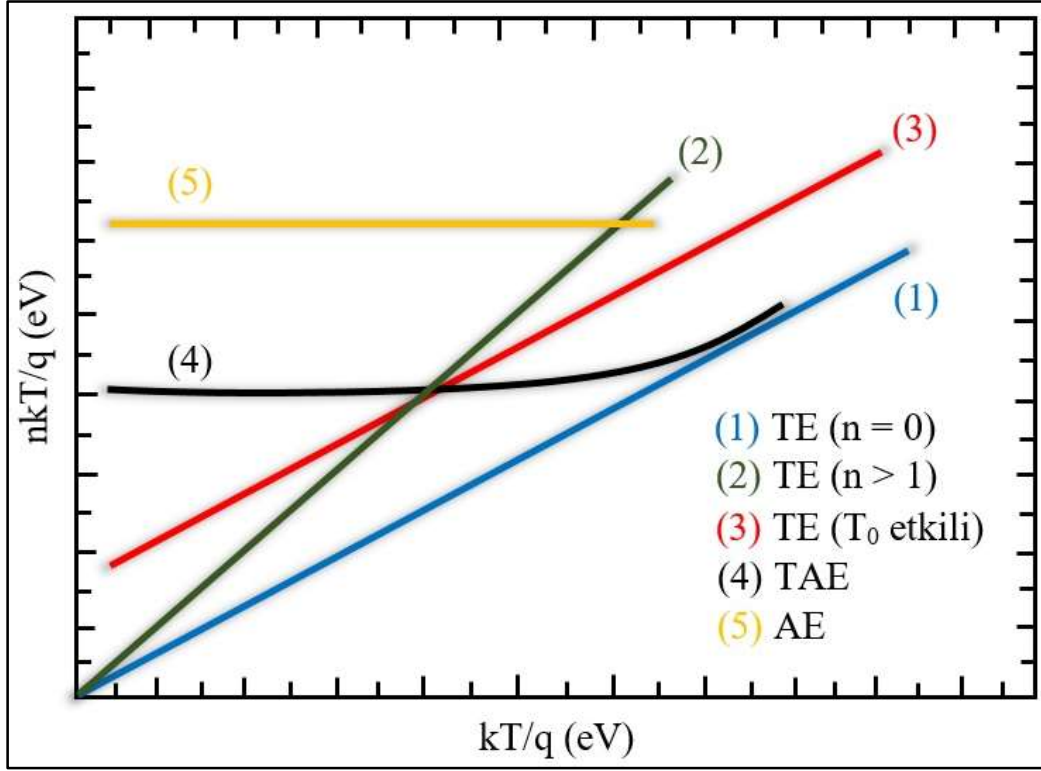
şeklinde ifade edilir.  $N_D$  donör konsantrasyonu,  $\epsilon_s$  yarıiletkenin dielektrik sabiti ve  $m^*$  elektronun etkin kütesidir.  $kT/qE_{00}$  oranı, kuantum mekanik tünelleme ve termoiyonik emisyon mekanizmalarına dair önemli bilgiler sağlamaktadır.  $E_{00}$ , uzay yükü bölgesi kenarında iletkenlik bandının tabanı ile aynı enerjiye sahip bir elektronun karşı tarafa geçme ihtimalinin  $1/e$ 'ye karşılık gelen Schottky bariyerinin difüzyon potansiyelidir.  $kT \ll qE_{00}$  durumu alan emisyonu,  $kT \sim qE_{00}$  durumu termoiyonik alan emisyonu ve  $kT \gg qE_{00}$  durumu ise termoiyonik emisyon mekanizmalarının gerçekleşmesi beklenir [125,135,137].

### 3.2.5. $T_0$ etkili akım iletimi

İdealite faktörün ( $n$ ) 1'den büyük olma durumu, ara yüzey durumlarından ya da hayali kuvvetlerden kaynaklanıyorsa,  $n$ 'nin sıcaklıktan bağımsız olması gerekmektedir. Ancak bu durum, uzay yük bölgesi rekombinasyon akımlarından veya termoiyonik alan emisyonundan kaynaklanıyorsa,  $n$  değeri sıcaklığa bağımlı değişebilir. İdealite faktörü doğrultucu kontaklarda çoğunlukla sıcaklığa bağımlıdır.  $T_0$  etkili akım yoğunluğu;

$$J = A^{**} T^2 \exp\left[-\frac{q\Phi_b}{k(T+T_0)}\right] \cdot \left[\exp\left(\frac{qV}{k(T+T_0)}\right) - 1\right] \quad (3.30)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadede  $T_0$  terimi sıcaklık ve gerilim değişiminden bağımsız olan sabit parametredir. İdealite faktörünün,  $n=1+(T_0/T)$  ifadesi ile sıcaklığa bağımlılığı gösterilebilir. Şekil 3.9'da voltaja bağlı bir şekilde oluşabilecek akım iletim mekanizmaları verilmiştir. (1), (2) ve (3) eğrileri termoiyonik emisyonun baskın olduğu mekanizmaları gösterir. (4) eğrisi termoiyonik alan emisyonu ve (5) eğrisi ise alan emisyonu iletim mekanizmalarının etkin olduğu durumları belirtir [135,137,140].



Şekil 3.9. Farklı akım-iletim mekanizmalarının voltaja bağlı  $nkT/q$  -  $kT/q$  eğrileri

## 4. METOD VE MALZEME ÜRETİMİ

Tezin bu bölümünde ilk önce üretimde ve karakterizasyonda kullanılan deneysel sistemler tanıtıldı. Sonrasında üretilmesi hedeflenen a-IGZO ince filmler ve Schottky diyotların üretim aşamaları ve parametreleri verildi. Öncelikle diyot yapısında altlık olarak kullanılacak n-Si alıttaşın arka kısmına ohmik kontak oluşturuldu. Daha sonra ince filmlerinin yapısal, morfolojik, optik ve diyot özelliklerinin belirlenmesi amacıyla n-Si, mikroskop camı ve ohmik kontağı alınmış n-Si alıttaş üzerine a-IGZO ince filmler kaplandı. Özellikleri belirlenen ince filmlerin diyot karakterizasyonlarının belirlenmesi amacıyla doğrultucu kontaklar alınarak diyot fabrikasyonu gerçekleştirildi.

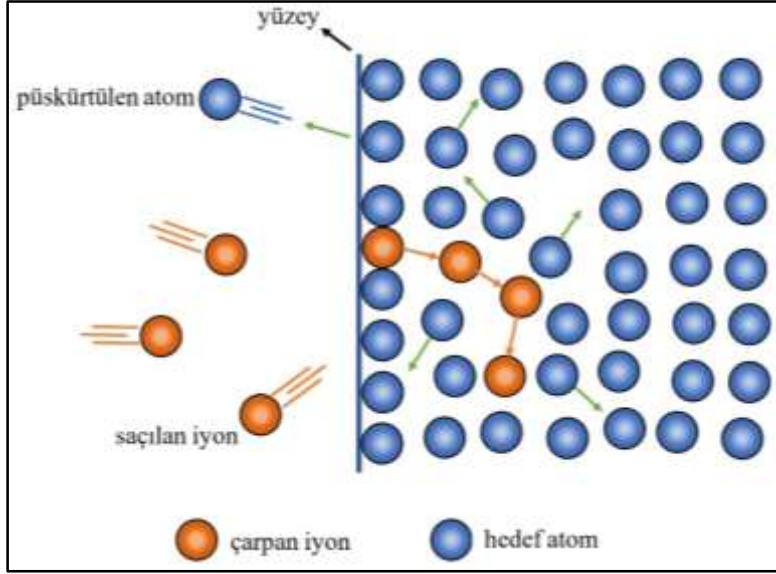
### 4.1. Tez Kapsamında Kullanılan Sistemler

Yarıiletken ince filmlerin geliştirilmesi ve üretimi için birçok deneysel yöntem mevcuttur. Darbeli lazer biriktirme (PLD), sol-jel ve radyo frekansı (RF) magnetron püskürtme gibi teknikler bu tip yarıiletken ince filmlerin üretilmesine olanak tanır [141]. Mevcut olan bu çeşitli biriktirme yöntemleri arasında düşük maliyetli, geniş alan üretiminin kolay elde edilmesi ve daha iyi film özellikleri nedeniyle RF magnetron püskürtme yaygın olarak kullanılır [63]. Bu özelliklerinde dolayı tez kapsamında üretilmesi planlan ince filmler için radyo frekansı (RF) magnetron püskürtme tekniği tercih edildi.

#### 4.1.1. İnce film üretim ve geliştirme sistemleri

##### Magnetron püskürtme tekniği

Püskürtme, enerjik iyonlarla bombardımana tutulan bir yüzeyden parçacıkların (atomlar, iyonlar ve moleküller) fırlatılması olarak tanımlanan bir tekniktir. Bu teknik, ince filmlerin yüksek vakum şartlarında biriktirilmesini içeren fiziksel bir püskürtme yöntemidir. Fiziksel püskürtme kavramı, enerjik parçacıkların katıya belirli bir mesafede nüfuz ettiği, burada çarpışma basamaklarına veya termal yükselmelere yol açacakları ve sonunda hedef malzemenin fırlamasına neden olacakları işlem olarak tanımlanır [142]. Şekil 4.1'de bu durum şematik olarak verildi.



Şekil 4.1. Püskürtme tekniği şematik gösterimi

Bu yöntemde, enerjisi yüksek argon (Ar) plazması yüksek vakum ortamında hedef malzemeye yönlendirilir. İyonlaştırılmış parçacıkların bombardımanı sonucunda malzemeden ayrılan atomlar veya moleküller, alttaş üzerine biriktirilerek ince bir film oluşturulur. Yüksek vakumun püskürtme tekniğine sağladığı avantaj atmosferde bulunan istenmeyen kirliliklerin sistemden uzaklaştırılmasını sağlamasıdır. Böylelikle iyonlaşma için ihtiyaç duyulan elektriksel güç daha düşük seviyelerde de yeterli olabilmektedir [143]. Anot ve katot olmak üzere püskürtme sistemi içerisinde iki elektrot vardır. Katot elektrot kısmına kaplanması istenen malzeme, üzerine biriktirme işlemi yapılacak malzeme ise anot elektrot kısmına yerleştirilir. Püskürtme sistemi kullanılarak reaktif olan ve olmayan süreçler ile malzemeler üretilir. Reaktif olmayan püskürtmeler, işlemin gerçekleştiği vakum odasına yalnızca yüksek saflıkta ve büyük atom boyutuna sahip inert bir gaz (Ar gibi) verilerek gerçekleştirilir. Reaktif püskürtmelerde ise, üretilecek malzemeye bağlı olarak püskürtme süresince vakum odasına inert gazına ilave Oksijen (O<sub>2</sub>) veya Azot (N<sub>2</sub>) gazı verilir.

Bu tez çalışmasında ince filmler Resim 4.1’de verilen ve Gazi-FOTONİK’de mevcut olan Nanovak NVT5-500 eş püskürtme sistemi ile üretildi. Sistemde iki adet RF ve bir adet DC püskürtme kaynağı bulunmaktadır. Bu sistemde alttaş tutucusu, püskürtme işlemi esnasında homojenliğin sağlanabilmesi için kendi etrafında dönebilme ve hedef ile alttaş arası mesafenin ayarlanabilmesi gibi avantajlara sahiptir.



Resim 4.1. Eş Püskürtme Sistemi (Nanovak NVTs-500)

### Termal buharlaştırma sistemi

Termal buharlaştırma süreci, katı kaynak malzemenin vakum odası içinde ısıtılmasını ve malzemenin belirli bir sıcaklıkta buhar basıncı üretmesini içerir. Termal buharlaştırma tekniği metal kaplama işlemlerinde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Buharlaştırılması istenen metal malzemeler, vakum odasında tungsten (W) materyalden üretilmiş potalar içerisine yerleştirilir. Bu potaların kutupları arasına uygulanan yüksek akım sayesinde metal buharlaştırılarak alttaş üzerine biriktirilir. Termal buharlaştırma tekniği istenilen kalınlıkta homojen kaplamalar gerçekleştirmeye imkân vermektedir.

Bu tez çalışmasında üretilen Schottky diyotların ohmik ve doğrultucu kontakları Resim 4.2'de verilen ve Gazi-FOTONİK'de mevcut olan Nanovak NVTH-350 termal

buharlaştırma sistemi ile gerçekleştirildi. Sistemde 4 adet pota ve 2 adet güç kaynağı bulunur. Bu potalar sayesinde metaller teker teker ya da aynı anda 2 metal birden buharlaştırılabilir. Bu sayede farklı metal malzemeler katmanlı bir şekilde ya da eş buharlaştırma yapılarak alaşım metal filmler elde edilebilir. 3-30 rpm arasında döndürme özelliğine sahip ve 400 °C ye kadar ısıtılabilen numune tutucu en fazla 4 inç çapındaki numunelerin yüklenebileceği şekilde sistem içinde konumlandırılmıştır. Bu özelliklere ek olarak sistemin vakum odası turbo moleküler pompa yardımı ile  $10^{-7}$  torr mertebesinde vakum altına alınabilir.



Resim 4.2. Termal Buharlaştırma Sistemi (Nanovak NVTH-350)

#### 4.1.2. İnce film karakterizasyon teknikleri

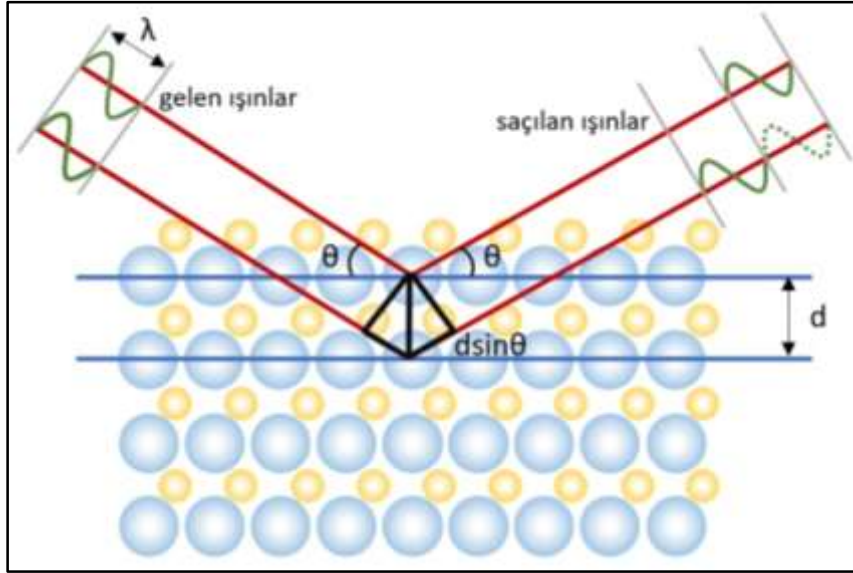
##### X-ışınları difraktometresi (XRD)

Malzemelere ait yapısal özellikleri belirlemede öne çıkan yöntemlerden biri x-ışınları kırınımı (XRD) yöntemidir. X-ışınları, elektromanyetik spektrumda gama ışınları ve ultraviyole arasında konumlanır. 0,1 ila 100 Å arasındaki dalga boylarına sahip olan X-ışınları, yüksek enerjili elektromanyetik dalgaların bir parçasıdır. Bu yüksek enerjili elektromanyetik dalgaların elde edilmesi için, vakum altına alınmış ve içinde anot-katot olarak iki elektrot bulunan bir X-ışını tüpü kullanılır. Anot ve katot elektrotları arasına yüksek gerilim uygulandığı zaman, katottan elektronlar çıkar ve gerilim etkisiyle hızlanarak anota çarparlar. Bu sayede enerjilerini anota aktaran elektronlar anottan

karakteristik ve sürekli spektrum olarak adlandırılan iki çeşit X-ışını yayımlanmasına neden olurlar. Malzemelerin yapısal analizinde kullanılan bu teknik numuneye zarar vermeyen ölçüm tekniklerindedir. Kristal düzlemlerinden X-ışınlarının saçılması şematik olarak Şekil 4.2’de verildi. Şekilden faydalanarak kırınım yöntemlerinin temelini oluşturan Bragg Kanunu Eş. 4.1 ile verilir.

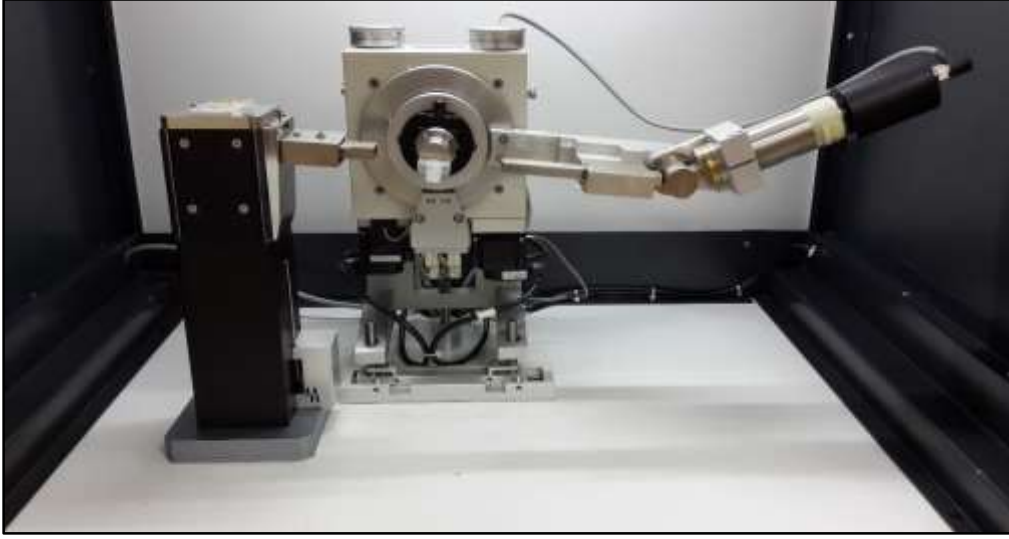
$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (4.1)$$

Burada  $d$  kristal düzlemleri arasındaki uzaklık,  $n$  kırınım mertebesi,  $\theta$  kırınım açısı ve  $\lambda$  ise X-ışını dalga boyudur.



Şekil 4.2. Kristal düzlemlerden X-ışınının saçılması

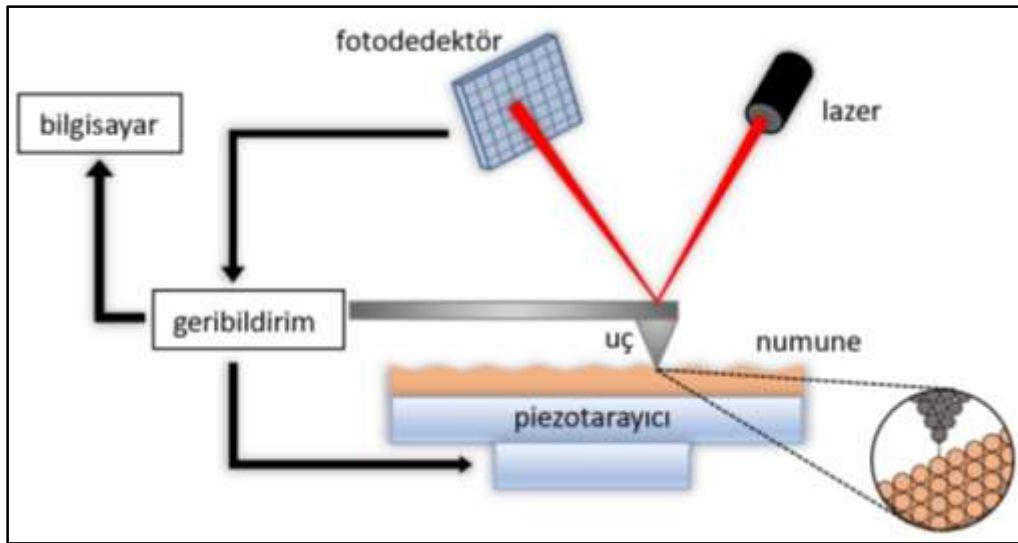
X-ışınları analizi sonucunda malzemenin içerdiği element ya da bileşiklere karşılık gelen pik pozisyonları belirlenir. Bu pik pozisyonları ve pik şekilleri kullanılarak örgü parametreleri, FWHM (pik yarı genişliği), kusur yoğunluğu ve parçacık büyüklükleri gibi malzemenin yapısal analizinde önemli olan değerler hesaplanır. Bu tez kapsamında hazırlanan numunelerin XRD ölçümleri Resim 4.3’de verilen ve Gazi-FOTONİK’de mevcut olan GNR APD2000 PRO XRD sisteminde gerçekleştirildi. Analizlerde  $\lambda=1,54052$  Å dalga boyuna sahip  $\text{CuK}\alpha$  X-ışınları tüpü kullanıldı.



Resim 4.3. X-ışınları sistemi (GNR APD2000 PRO)

#### Atomik kuvvet mikroskobu (AFM)

AFM, ince filmlerin yüzey morfolojisini hakkında bilgi sahibi olmak amacıyla yaygın olarak kullanılan tekniklerden biridir. AFM sistemi, Şekil 4.3'te gösterildiği gibi genel olarak lazer, fotodetektör, piezotarayıcı ve cantilever dirseğinden oluşur. Cantilever dirseğinin uç kısmı, numune yüzeyini taramak için kullanılan ve kalınlığı 2 nm ile 10 nm arasında değişen oldukça ince sivri bir iğne şeklindedir. Bu iğne şeklindeki uç genellikle Silikon (Si) ya da  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 'dan yapılır. Yüzeyin topografik görüntüsü iğne ile numune yüzeyi arasındaki atomik etkileşimlere dayanarak elde edilir.



Şekil 4.3. Atomik kuvvet mikroskobunun şematik gösterimi

İğne, numune yüzeyine ölçüm esnasında atomlar arası mesafe kadar ( $\sim 10 \text{ \AA}$ ) yaklaştırılır. Bu mesafelerdeki yakınlaşmada numune yüzeyi ve iğne arasında atomik kuvvet etkileşimleri meydana gelir. Bu etkileşim ile esnek kol nanometre boyutunda aşağı ve yukarı doğru hareket eder. Bu küçük yer değiştirmelerin seviyesi, cantilever dirseği üzerine düşürülen lazerin bir fotodedektör tarafından algılanması ile belirlenir. Cantilever dirseği üzerinden yansıyan lazer sinyallerindeki değişimler bize incelenen numunenin yüzeyi hakkında bilgi verir.

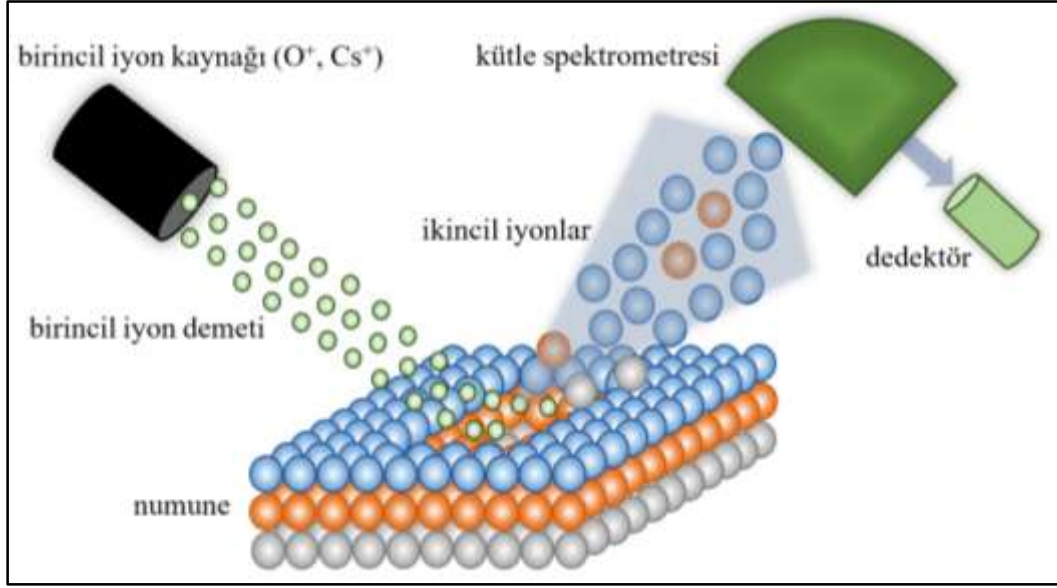
Bu tez kapsamında üretilen ince film yapılarının yüzey morfolojileri Resim 4.4'te verilen ve Gazi-FOTONİK'de mevcut olan NanoMagnetics AFM sistemi kullanılarak elde edildi.



Resim 4.4. Atomik kuvvet mikroskobu sistemi (NanoMagnetics)

#### İkincil iyon kütle spektrometresi (SIMS)

İkincil iyon kütle spektrometresi (Secondary-ion mass spectrometry-SIMS), yarıiletken ince filmlerin moleküler bileşimini ve katman sayısı birden fazla olan yapıların arayüzey geçişlerini belirlemek için kullanılan bir karakterizasyon tekniğidir. Bu teknikte, vakum ortamında numune yüzeyine odaklanmış birkaç kilo elektron-volt (keV) enerjili birincil iyon demeti, numune yüzeyinden ikincil iyonların püskürtülmesine neden olur. Püskürtülen bu ikincil iyonların kütle/yük oranları bir kütle spektrometresi ve dedektör aracılığı ölçülür (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. İkincil iyon püskürtme mekanizmasının şematik gösterimi

Püskürtme için pozitif iyon kaynağı olarak Sezyum (Cs), negatif iyon kaynağı olarak Oksijen (O) kullanılır. SIMS tekniği ile ince filmlerin moleküler bileşimi 2 ila 3 nm derinliğe kadar belirlenebilir. Bu tez kapsamında üretilen ince filmlerin moleküler bileşim analizleri Resim 4.5’de verilen ve Gazi-FOTONİK’de mevcut olan Hiden Analytic SIMS sistemi ile gerçekleştirildi. Kullanılan sistem ultra yüksek vakum ( $10^{-9}$ - $10^{-10}$  mbar) şartlarına sahiptir.



Resim 4.5. İkincil iyon kütle spektrometre sistemi

### Morötesi-görünür bölge (UV-Vis) spektrometresi

UV-Vis spektrometresi, elektromanyetik spektrumun morötesi (UV), görünür bölge (Vis) ve yakın kızılötesi (NIR) bölge boyunca fotonların soğrulma miktarını ölçmek için kullanılan bir tekniktir. Bu bölgede gelen foton madde ile etkileşime girdiğinde molekülleri düşük enerjili bir temel durumdan uyarılmış bir duruma geçirir. Burada fotonların bir kısmı optik olarak soğrulur, bir kısmı yansır ve bir kısmı ise madde içinden geçebilir. UV-Vis spektrometresi genellikle dört temel bileşenden oluşur. Bunlar ışık kaynağı, algılayıcı detektör, numune tutucu ve monokromatördür. Işık kaynağından gönderilen fotonlar numuneden geçer ve dedektör aracılığıyla elektrik sinyaline dönüştürülerek bilgisayar sistemine aktarılır. Böylece malzemenin optik spektrumları elde edilir. Bu spektrometre ile herhangi bir malzemenin UV-Vis-NIR bölgesindeki fotonları geçirmesi (T), soğurması (A) ve yansıtması (R) gibi özellikleri analiz edilir.

UV-Vis spektrometresi ile elde edilen veriler sayesinde, yarıiletken ince filmlerin yasak enerji bant aralığı ve soğurma katsayısı hakkında bilgiler elde edilebilir. Soğurma katsayısı ( $\alpha$ ) ince film kalınlığı (d) ve optik geçirgenlik (T) değerleri kullanılarak;

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln(T) \quad (4.2)$$

bağıntısı ile elde edilebilir. Yasak enerji bant aralığı ( $E_g$ ) ise Tauc eşitliği olarak bilinen;

$$(\alpha hv) = A(hv - E_g)^n \quad (4.3)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanabilir. Burada hv foton enerjisi A bir sabittir. n değeri ise yarıiletkenin yasak enerji bant aralığının direkt geçişli ya da indirekt geçişli olduğu durumları karakterize etmektedir. n değeri, bant aralığı direk geçişli ise 2, indirekt geçişli ise 1/2 değerine sabittir. Tauc eşitliği kullanılarak yarıiletken ince filmlerin yasak enerji bant aralığı, gelen foton enerjisine (hv) karşılık  $(\alpha hv)^2$ 'nin grafiğinin çizilmesiyle beraber bu grafikte yer alan lineer bölgenin fit edilmesiyle bulunur. Lineer bölgede fit edilen doğrunun hv eksenini kestiği ve  $(\alpha hv)^2$ 'nin sıfır olduğu nokta bant aralığı enerjisinin belirlenmesinde kullanılır.

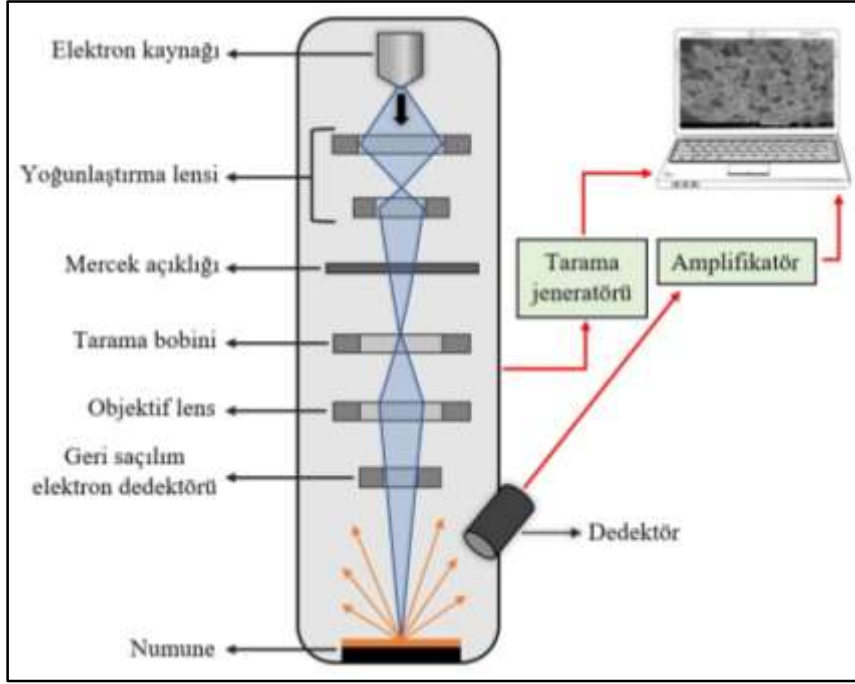
Bu tez kapsamında üretilen ince filmlerin optik özellikleri, Resim 4.6’da verilen ve Gazi-FOTONİK’de mevcut olan Perkin Elmer Lambda 2S UV-Vis spektrometresi ile gerçekleştirildi. Bu sistemde 200-340 nm ve 340-1100 nm arasındaki dalga boylarını tarayan Döteryum ve Halojen olmak üzere iki tane lamba, Si dedektör ve iki ayrı numune tutucu bulunmaktadır.



Resim 4.6. Morötesi-görünür bölge spektrometresi (Perkin Elmer Lambda 2S)

#### Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Malzeme yüzeylerinin incelenmesinde yaygın olarak kullanılan tekniklerinden biri olan taramalı elektron mikroskobu; biyolojik numunelerden ince filmlere kadar çok geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir. Bu yüzey görüntüleme tekniğinde yüksek voltaj aracılığıyla hızlandırılmış elektronlar vakum altında numune üzerine odaklanır. Numunedeki atomlar ile hızlandırılmış bu elektronlar etkileşime girerek numune yüzeyindeki topografi hakkında bilgiler içeren ikincil elektronları üretir. Bu ikincil elektronlar, ilgili dedektörler tarafından toplanarak bilgisayar ekranına aktarılır ve bu sayede detaylı bir görüntü elde edilir. Bu süreç ve taramalı elektron mikroskobunun içeriği şematik olarak Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5. Taramalı elektron mikroskobunun şematik gösterimi

Taramalı elektron mikroskobunda elektronlar ile numune yüzeyinin etkileşimi sonucunda yüzey topografisi haricinde yüzeyin kimyasal bileşimi hakkında da bilgi alınabilir. Bu bilgiyi, yüzeydeki atomlar ile esnek çarpışma yaparak geri saçılan elektronlar verir. Büyük ve küçük atom numarasına sahip atomlardan saçılan elektronlar arasında bir kontrast farkı oluşur. Bu kontrast farkı kullanılarak yüzeyin kimyasal bileşimi hakkında bilgi sahibi olunur. Bunun yanında elektron yüzey etkileşimi sonucunda karakteristik X-ışınları da oluşur. Bu X-ışınları detektör ile toplanıp analiz edilerek malzemenin elementel analizi de yapılabilmektedir. Bu tez kapsamında üretilen ince filmlerin SEM görüntüleri Resim 4.7’de verilen ve Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Merkez Laboratuvarı’nda mevcut olan Hitachi SU5000 SEM sistemi ile elde edildi.



Resim 4.7. Taramalı elektron mikroskobu sistemi (Hitachi SU500)

#### Akım-gerilim (I-V) ölçüm sistemi

I-V ölçüm sistemi ile numuneye uygulanan farklı gerilimler altında akım ölçümleri yapılabilmektedir. Bir Schottky kontağının akım-gerilim ölçümleri sonucunda elde edilen akım-gerilim eğrileri kullanılarak doğrultma oranı ( $I_{on}/I_{off}$ ), idealite faktörü ( $n$ ), seri direnç ( $R_s$ ) ve bariyer yüksekliği ( $\Phi_B$ ) gibi birçok elektriksel parametre hesaplanabilir. Tez kapsamında üretilen Schottky diyotların I-V ölçümleri Resim 4.8’de verilen ve Gazi-FOTONİK’de mevcut olan Keithley 2400 SCS yarıiletken karakterizasyon ölçüm sistemi ile gerçekleştirildi. Bu sistemde, maksimum güç; 1A-20W ve minimum güç; 100mA-2W şeklinde ayarlanabilir. Akım-gerilim ölçümleri için gerekli kaynaklar ve bir numune tutucu ölçüm istasyonu bulunmaktadır. Ölçüm istasyonu, dört test bağlantı telini ve altın uçlu bacakları sahip yaylı pinleri içerir. Bu özel bağlantılar, örneğin elektriksel özelliklerini ölçmek için kullanılır. Ölçüm istasyonu, elektriksel olarak dış etkenlerden izole edilmiştir ve hem karanlık hem de aydınlık ortamlarda ölçüm yapma imkânı sunmaktadır.

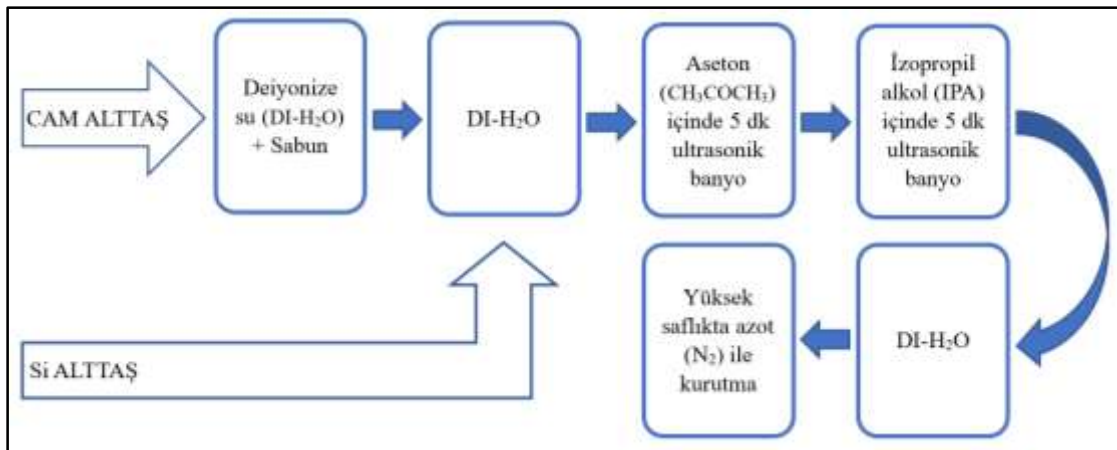


Çizelge 4.1. Ohmik kontak oluşturma parametreleri

Biriktirme Parametreleri	Metal	
	AuNiGe	Au
Alttaş Sıcaklığı (°C)	250	250 => 90
Biriktirme Süresi (dk)	11	35
Taban Basıncı (Torr)	4 x 10 <sup>-6</sup>	
Kaplama Basıncı (Torr)	2 x 10 <sup>-5</sup>	
Rotasyon (rpm)	5	
Biriktirme Kalınlığı (nm)	50	150

#### 4.2.2. Alttaş temizleme prosedürü

Püskürtme yöntemi ile üretilen ince filmlerin yüksek kalitede olması ve filmin alttaş yüzeyine iyi tutunması için en temel şart alttaş temizliğidir. Alttaş üzerindeki kirliliklerin iyi temizlenmemesi durumunda ince filmlerin yapısal, elektriksel ve optik özellikleri bu kirliliklerden olumsuz etkilenir. Bu olumsuzlukları en aza indirmek amacıyla alttaşlar, ince film biriktirilmeden önce çeşitli prosedürler ile temizlenirler. Bu tez çalışmasında alttaş olarak yapısal ve morfolojik analizler için silisyum, optik analizler için ise mikroskop camı kullanıldı. Alttaşlar Şekil 4.6'da gösterilen adımlar izlenerek yüzey temizliği yapıldı.



Şekil 4.6. Si ve cam alttaşları temizlemek için kullanılan temizlik prosedürü

#### 4.2.3. a-IGZO ince filmlerin üretilmesi

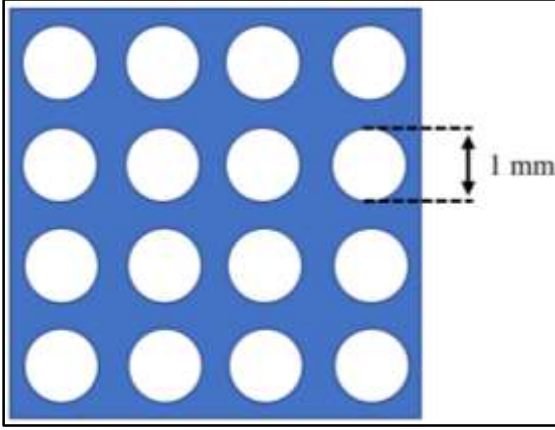
Bu tez kapsamında üretilen tüm ince filmler Nanovak NVTS-500 eş püskürtme sistemi kullanılarak biriktirildi. İnce filmlerin biriktirme işleminde plazma ortamının oluşturulması için asal bir gaz olan Ar kullanıldı. Hedef malzeme olarak InGaZnO<sub>4</sub> (%99 saflıkta, 2 inç çapında) kullanıldı. Kaplama basıncının ince filmlere ve diyot özelliklerine etkisinin incelenmesi adına 6 set numune üretildi. Üretilen filmlerde biriktirme basıncı 5 mTorr dan 30 mTorr a 5'er birim aralıklarla artırılarak değiştirildi. Tümü oda sıcaklığında biriktirilen numuneler IGZO1, IGZO2, IGZO3, IGZO4, IGZO5 ve IGZO6 olarak isimlendirildi. Çizelge 4.2'de biriktirme parametreleri verildi.

Çizelge 4.2. Farklı kaplama basınçlarında üretilen numunelerin biriktirme parametreleri

Biriktirme Parametreleri	Numuneler					
	IGZO1	IGZO2	IGZO3	IGZO4	IGZO5	IGZO6
Kullanılan Alttaşlar	n-Si, mikroskop camı, n-Si/AuNiGe/Au					
Taban Basıncı (Torr)	3 x 10 <sup>-6</sup>					
Kaplama Basıncı (mTorr)	5	10	15	20	25	30
RF Gücü (W)	50					
Film Kalınlığı (nm)	~ 100					
Rotasyon (rpm)	5					

#### 4.2.4. Doğrultucu kontak yapılarının oluşturulması

a-IGZO ince filmler biriktirildikten sonra 1x1 cm boyutlarında olan numuneler Nanovak NVTH-350 termal buharlaştırma sistemine yerleştirildi. Metal buharlaştırma işlemi yapılacak hazne, mekanik ve turbo moleküler pompa yardımı ile 10<sup>-6</sup> Torr taban basınç seviyesine getirildi. a-IGZO ince filmler üzerine nokta kontak oluşturabilmek için Şekil 4.7'de şematığı verilen metal maske kullanıldı. Metal buharlaştırma esnasında 10<sup>-5</sup> kaplama basıncı mertebesinde 150 nm AuNiGe alaşım metali biriktirildi. Bu işlemde sonra, sistem atmosfer basıncına getirilerek numune transfer edildi. Schottky kontakın oluşturulması ile ilgili parametreler Çizelge 4.3'de verildi.

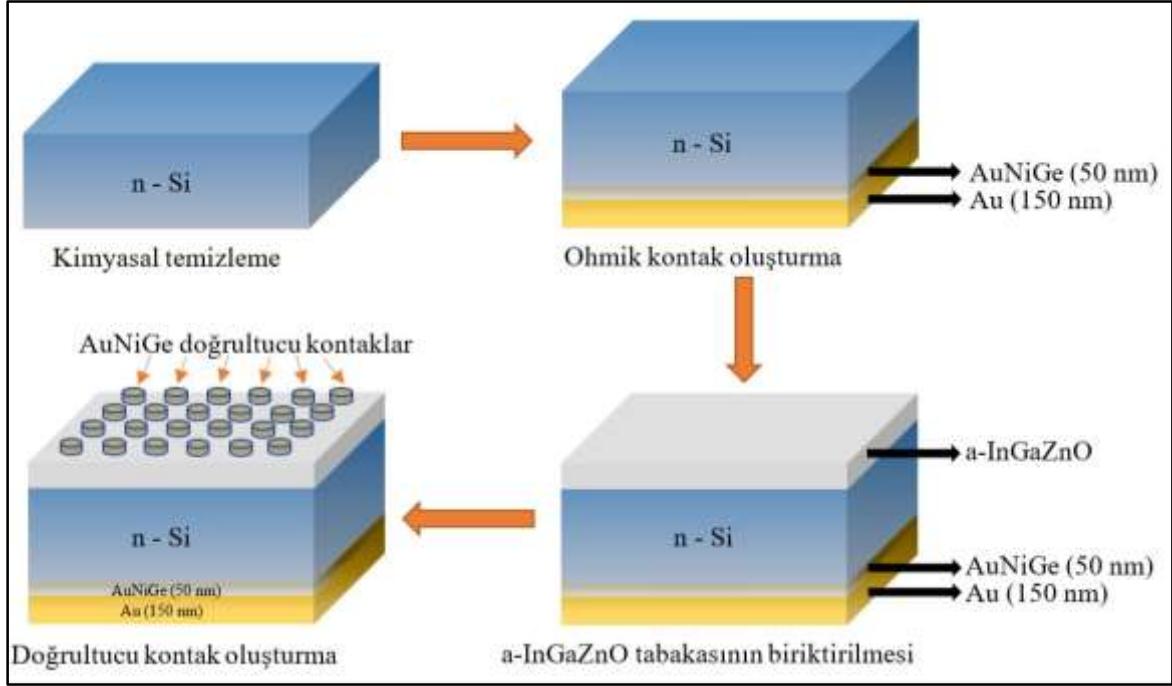


Şekil 4.7. Schottky kontak oluşturmak için kullanılan maske şematığı

Çizelge 4.3. Doğrultucu kontak oluşturma parametreleri

Biriktirme Parametreleri	Metal
	AuNiGe
Alttaş Sıcaklığı (°C)	24 (Oda sıcaklığı)
Biriktirme Süresi (dk)	33
Taban Basıncı (Torr)	$6 \times 10^{-6}$
Kaplama Basıncı (Torr)	$2 \times 10^{-5}$
Rotasyon (rpm)	5
Biriktirme Kalınlığı (nm)	150
Kontak Genişliği (mm)	1

Özet olarak AuNiGe/a-IGZO/n-Si/AuNiGe/Au yapılarının üretim aşamaları Şekil 4.8’de adım adım şematik olarak verildi.



Şekil 4.8. Schottky diyot yapıların üretim aşamalarının şematığı



## 5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında a-IGZO ince filmler, magnetron sputtering ince film biriktirme tekniği kullanılarak üretildi. Sadece kaplama basıncının etkisini gözlemleyebilmek adına diğer biriktirme parametreleri sabit tutuldu. Bu hedef doğrultusunda 6 set numune üretildi. Her set oda sıcaklığında, 50 W RF gücünde ve yaklaşık 100 nm ince film kalınlığı planlanarak üretildi. Sabit RF gücü altında farklı Argon (Ar) kaplama basınçlarında üretilen a-IGZO ince filmlerin öncelikle yapısal, morfolojik ve optik karakterizasyonları yapıldı. Sonraki aşamada ise bu karakterizasyonlar ışığında fabrikasyonu tamamlanan AuNiGe/a-IGZO/n-Si/AuNiGe/Au Schottky diyot yapısının elektriksel analizleri yapıldı.

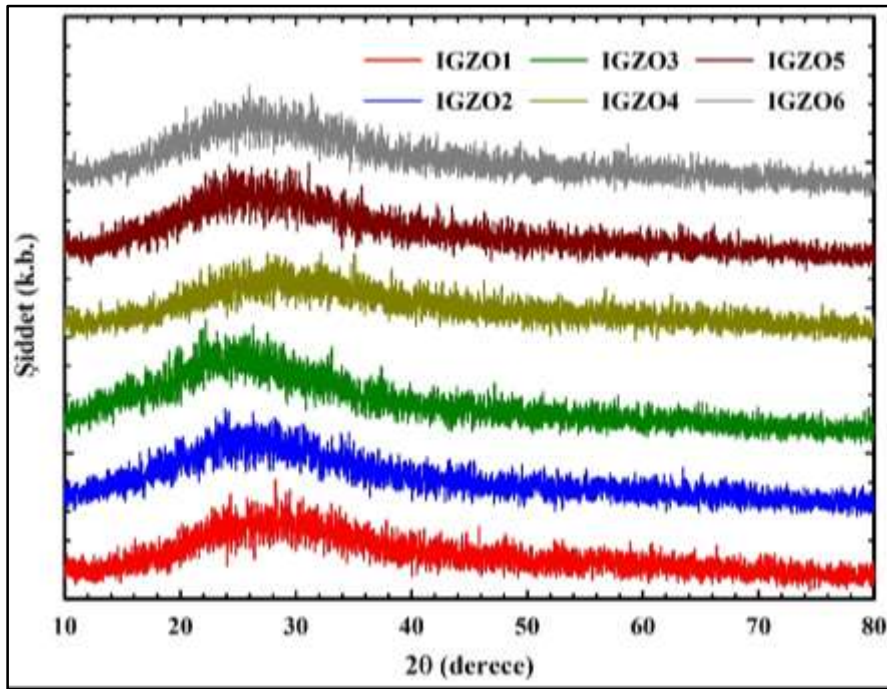
### 5.1. Farklı Kaplama Basınçlarında Üretilen a-IGZO İnce Filmlerin Analizleri

Bu kısımda çizelge 4.2’de ki parametreler altında biriktirilen ve IGZO1 (5 mTorr), IGZO2 (10 mTorr), IGZO3 (15 mTorr), IGZO4 (20 mTorr), IGZO5 (25 mTorr), IGZO6 (30 mTorr) olarak isimlendirilen numunelerin yapısal, morfolojik ve optik analizleri yapıldı. Bu analizlerden ince film kalınlığı hem SIMS hem de SEM analizlerinden elde edildi. Yüzey pürüzlülükleri ve RMS (root mean square-karekök ortalama) değerleri AFM ve SEM analizleri ile belirlendi. UV-Vis ile alınan optik ölçümlerden ise ince filmlerin farklı dalga boylarındaki optik geçirgenlikleri ve optik bant aralıkları çıkarıldı.

#### 5.1.1. Yapısal analizler

Üretilen IGZO ince filmlerin, yapısal analiz kapsamında XRD ve SIMS ölçümleri alındı. İlk olarak, IGZO ince filmlerinin amorf yapısı X-ışını kırınımı ile doğrulandı. Oksit yarıiletkenlerin amorf özelliğinde olması ince film transistörler (TFT), giyilebilir cihazlar, esnek ekran uygulamaları, özellikle yakın zamanda piyasaya sürülen mobil cihazların katlanır ekranları dahil olmak üzere yeni nesil elektroniklerin kullanımı için son derece geniş bir kullanım yelpazesi sunmaktadır [147]. Amorf oksit yarıiletkenlerin (AOS) sağladığı bu avantajlardan dolayı ve geleneksel amorf silisyum (a-Si) ile kıyaslandığında daha iyi optoelektronik özellikler taşımasından dolayı kapsamlı bir şekilde araştırılmaya devam edilmektedir [148]. Bu tez kapsamında farklı kaplama basınçlarında üretilen tüm IGZO ince filmlerin omega-2teta ( $\omega$ -2 $\theta$ ) XRD grafiklerinde ZnO, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>’e ait

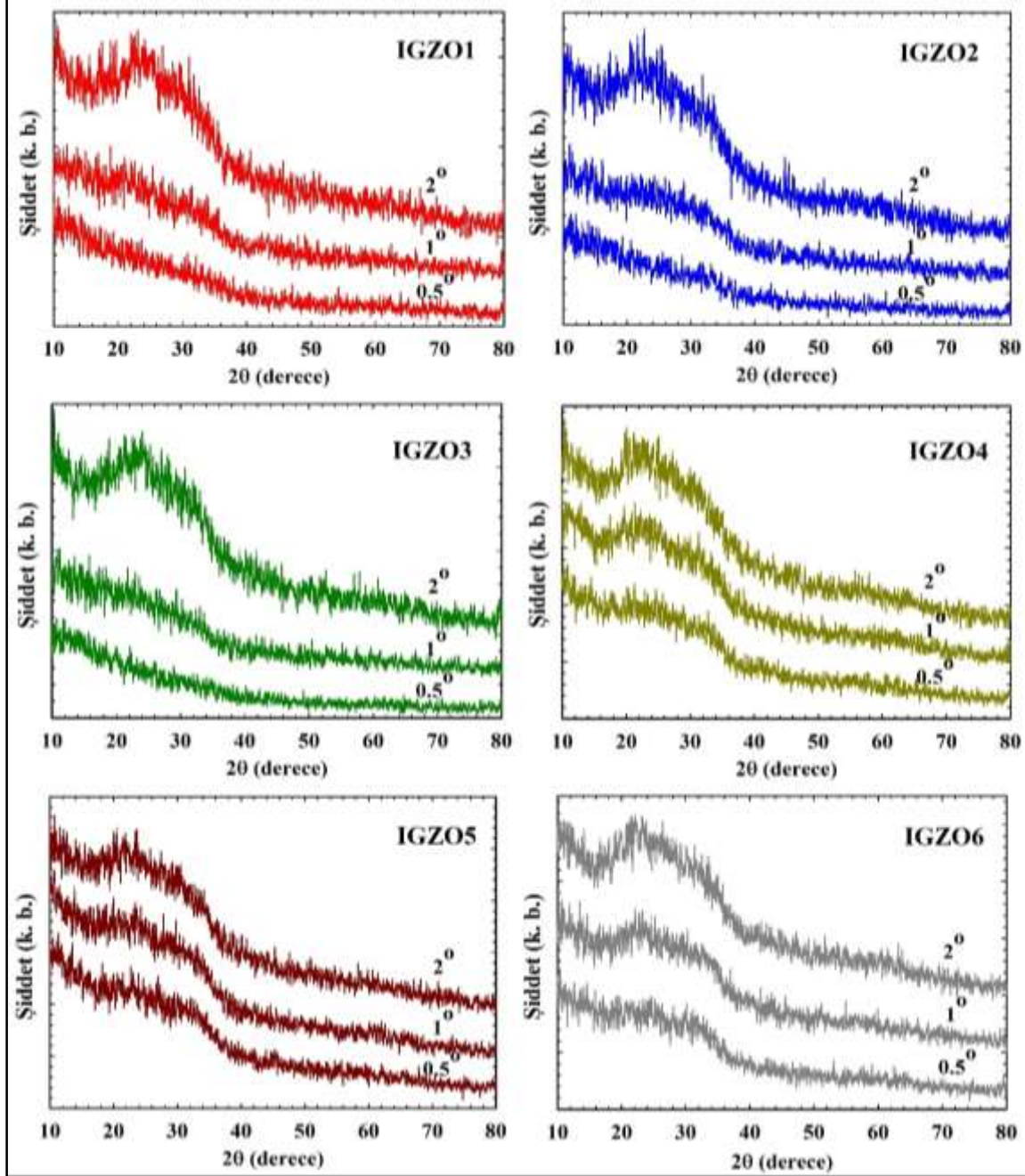
kırınım tepe noktaları görülmedi, böylece tüm IGZO ince filmlerinin iyi bir amorf yapıya sahip olduğunu belirlendi. Şekil 5.1’de farklı Ar kaplama basınçları altında üretilen 6 set numunenin XRD desenleri verildi. İnce filmlerin amorf fazda oluşmasında biriktirme parametreleri olan RF gücü, kaplama basıncı ve alttaş sıcaklığı gibi etkenlerin önemi büyüktür. Bu parametrelere ek olarak a-IGZO gibi ince filmlerin amorf yapıda oluşmasının nedeni çoklu katyon sisteminin kullanılmasına da bağlanabilir. Farklı iyonik yüklere ve boyutlara sahip iki veya daha fazla katyonun karıştırılmasının amorf fazın oluşumunu etkili bir şekilde arttırması bakımından, filmlerin geleneksel işleme koşulları altında amorf kalmasını sağlar. a-IGZO filmlerin oda sıcaklığında amorf fazda oluşması hatta biriktirildikten sonra 400°C’ye kadar olan ısıtma işlemlerinde amorf fazı koruması literatürde de birçok çalışmada belirtilmiştir [39,62,63].



Şekil 5.1. a-IGZO ince filmlerin XRD desenleri

Amorf faz oluşumunun kanıtını güçlendirmek amacıyla aynı zamanda mikroskop camı üzerinde biriktirilen IGZO ince filmleri, düşük açı ölçüm tekniği kullanılarak (Grazing Incidence X-Ray Diffraction-GIXRD) ölçüldü. GIXRD ile X-ışınları demeti bir numune üzerine genellikle 1 derece civarında çok düşük bir geliş açısı ile yönlendirilir. Bu durum X-ışınlarının yalnızca en üstte birkaç nanometre ile etkileşime girmesine neden olur ve yüzey bölgesinin kristalografik özelliklerine oldukça duyarlı bir kırınım modeliyle sonuçlanır. Üretilen a-IGZO ince filmlerin yüzeylerinden kırınım deseni almak amacıyla,

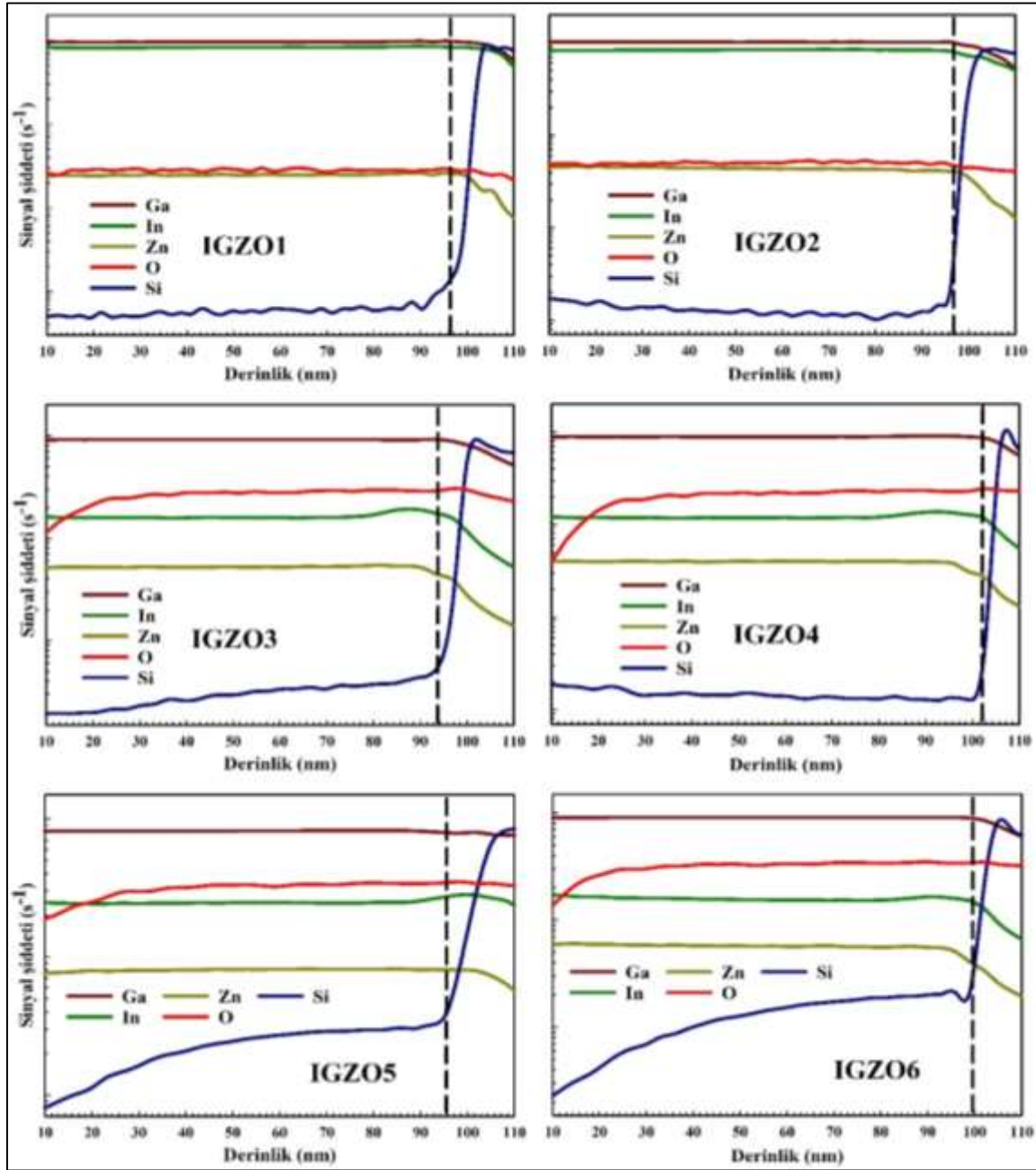
X-ışını ışın geliş açısı  $0,5^\circ$ ,  $1^\circ$  ve  $2^\circ$ 'de sabit tutularak her numune için üç farklı ölçüm alındı. Şekil 5.2, IGZO ince filmlerinin GIXRD desenlerini göstermektedir. Cam altlık dışında belirgin herhangi bir kırınım tepe noktasının bulunmaması, IGZO ince filmlerinin amorf bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.2. a-IGZO ince filmlerin GIXRD desenleri

Amorf IGZO ince filmlerin derinlik profilini ve arayüz özelliğini incelemek amacıyla SIMS ölçümleri yapıldı. SIMS, bir numunenin en üst yüzey katmanından alt katmalara

kadar yüzey bileşimi ve derinlik profilinin belirlenmesi için yüksek hassasiyetli bir yüzey analiz tekniği olduğundan, çok düşük konsantrasyonlarda katkı maddeleri ve safsızlıkları tespit edebilir [149]. In (indiyum), Ga (galyum), Zn (çinko), O (oksijen) ve Si (silisyum) elementlerinin ppm (parts per million-milyonda bir) mertebesindeki atomik dağılımları SIMS ölçümleri ile belirlendi. Ölçümlerde Oksijen (O) iyonlarının varlığı Sezyum (Cs) tabancası ile In, Ga, Zn ve Si elementlerinin varlığı  $O_2$  tabancası kullanılarak ölçüldü. SIMS grafikleri Şekil 5.3'de verildi.



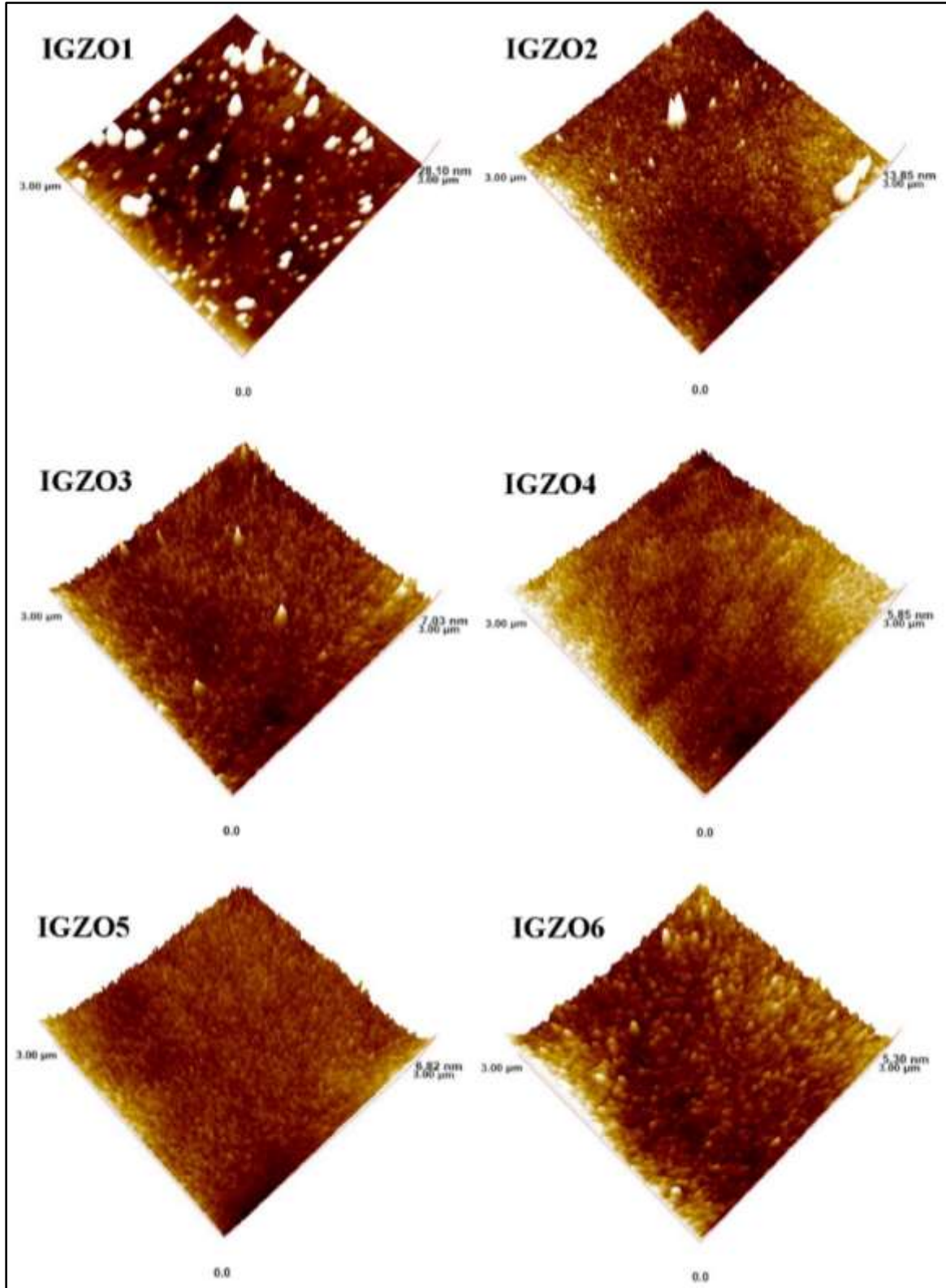
Şekil 5.3. a-IGZO ince filmlerin SIMS profilleri

SIMS ölçümleri esnasında numune yüzeyinde oluşan krater alanı stylus tipi profilometre ile ölçülerek filmlerin kalınlıkları belirlendi. Filmlerin kalınlıkları IGZO1, IGZO2, IGZO3, IGZO4, IGZO5, IGZO6 numunelerinde sırasıyla 96, 97, 94, 102, 95 ve 99 nm olarak belirlendi. Ölçülen bu kalınlıklar ince film biriktirme esnasında kalınlık sensörü yardımı ile okunan ve ~100 nm olarak planlanan kalınlık değerine oldukça yakın olduğu görüldü.

SIMS profilleri değerlendirildiğinde tüm numunelerde, Si altına girildiğinde In, Ga ve Zn element dağılımlarının düşmeye başladığı ve Si dağılımının keskin bir şekilde arttığı gözlemlendi. Film kalınlığı boyunca In, Ga ve Zn dağılımları düzgün bir şekilde devam ettiği görülmektedir, bu durum filmin oluşması ve yapısal stabilite için oldukça önemlidir. Bu gözlemlere dayanarak a-IGZO filmlerinin magnetron püskürtme tekniği ile stabil bir yapıda oluşturulabileceğini sonucuna varabiliriz. Ayrıca SIMS sonuçlarına göre IGZO1 (5 mTorr) ve IGZO2 (10 mTorr) ince filmlerinde In oranının diğer basınçlarda üretilenlere kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlendi. Yüksek kaplama basınçlarına doğru In oranındaki bu düşüş nispeten daha büyük olan atomik boyutlarına bağlanabilir. Yüksek kaplama basınçlarında daha çok çarpışmaya ve dolayısı ile daha çok saçılmaya uğrayan atom ve moleküllerin büyük çoğunluğu altına yüzeyine ulaşamaz. Bu durum aynı zamanda biriktirme hızını düşürür ve yüksek kaplama basınçları yavaş biriktirme ile sonuçlanır. In atomik boyutunun nispeten daha büyük olduğu ve yüksek kaplama basınçlarında daha fazla çarpışmaya uğrayacağı ve bu çarpışmaların daha enerjik olacağı düşünülürse In atomik dağılımının yüksek kaplama basınçlarında düşeceği sonucuna varılabilir. SIMS grafiklerinde görülen bu değişimin olası açıklamasını bu duruma atfedebiliriz.

### 5.1.2. Morfolojik analizler

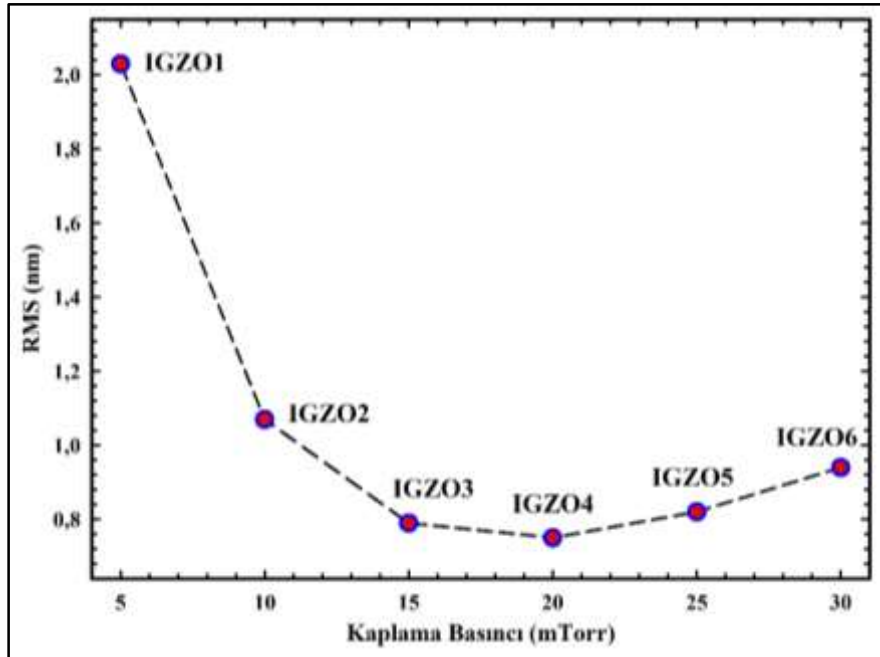
Elektronik cihazların en temel yapı taşlarından olan Schottky diyotlar gibi birçok yarıiletken cihazın performansı üzerinde en önemli etkilerden bir tanesi, yarıiletken ince film ile metal kontak arasında oluşan arayüzey durumlarıdır. Schottky diyotların birçok özelliğini olumsuz yönde etkileyen arayüzey durumlarını kontrol edebilmek için yarıiletken ince filmlerin yüzey özelliklerini belirlemek ve bunları analiz etmek oldukça önemlidir. Bu doğrultuda farklı kaplama basınçlarında üretilen a-IGZO ince filmlerin yüzey pürüzlülüğünü belirlemek amacıyla  $3 \times 3 \mu\text{m}^2$  alanda AFM ölçümleri alındı. Yüzey görüntüleri Şekil 5.4'de verildi.



Şekil 5.4. a-IGZO ince filmlerin AFM görüntüleri

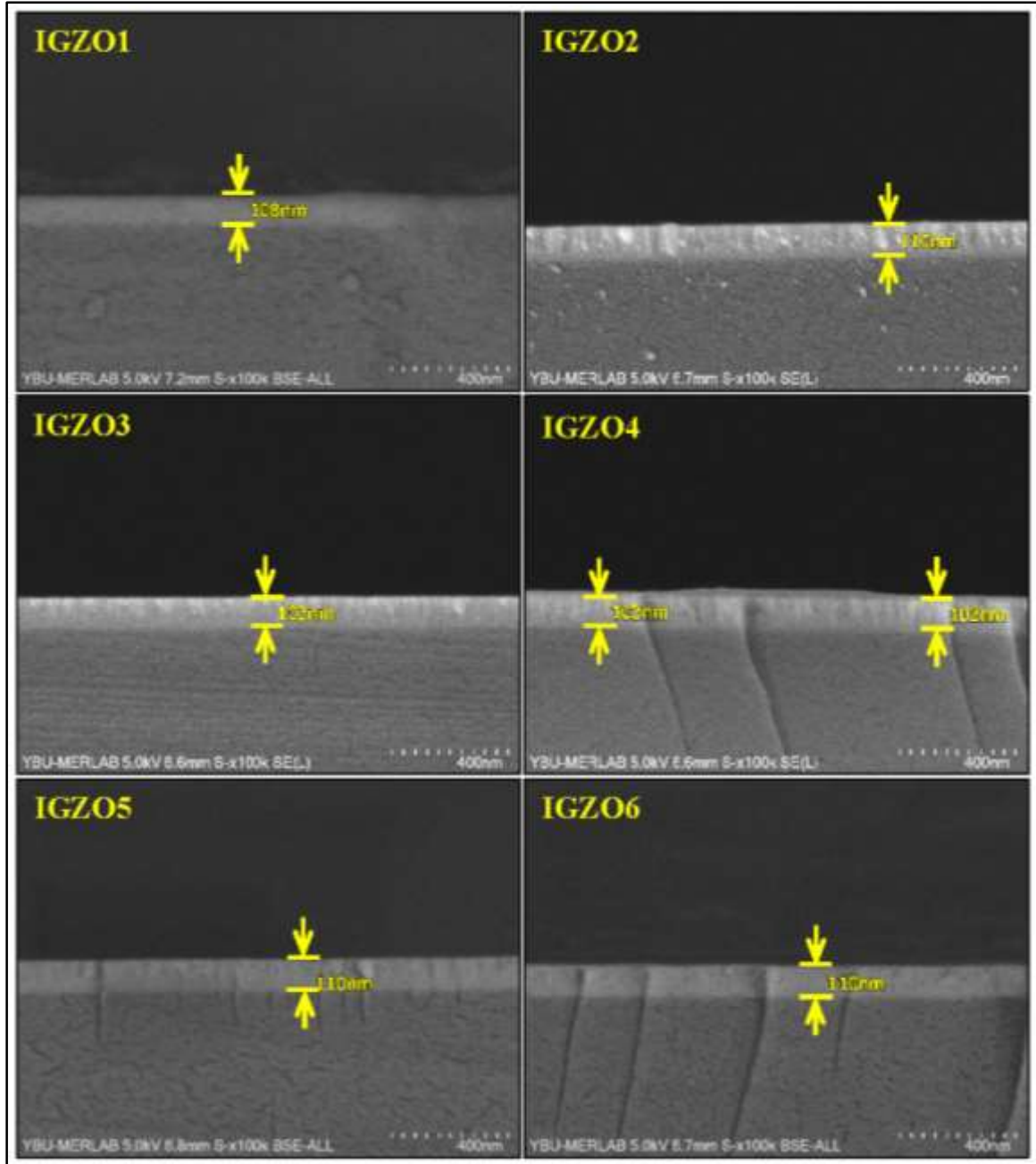
Sırasıyla IGZO1 (5 mTorr), IGZO2 (10 mTorr), IGZO3 (15 mTorr), IGZO4 (20 mTorr), IGZO5 (25 mTorr) ve IGZO6 (30 mTorr) numunelerinde RMS değerleri 2,03 nm, 1,07 nm,

0,79 nm, 0,75 nm, 0,82 nm ve 0,94 nm olarak belirlendi. Analiz sonuçlarına göre kaplama basıncının artması ile yüzey pürüzlülüğünün 20 mTorr değerine kadar azaldığı ve sonrasında 30 mTorr kaplama basıncına nispeten düşük miktarda arttığı belirlendi. 5 mTorr kaplama basıncında, yüzey pürüzlülüğü 2,03 nm ile en yüksek değerde çıktığı görüldü. SIMS analizlerinde belirtilen In oranının düşük kaplama basınçlarında daha yüksek olması AFM sonuçlarıyla birlikte değerlendirilebilir. Nispeten daha büyük olan In atomik boyutu düşük basınçlarda yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilemiştir. In oranının azalmasıyla beraber yüzey pürüzlülüğünün olumlu yönde etkilendiği AFM görüntülerinden görülebilir. RF püskürtme ile biriktirilen ince filmlerde, püskürtülen atomlar veya moleküller için yeterli kinetik enerjiye ihtiyaç vardır, böylece adsorbe edilen atomlar veya moleküller alttaş üzerinde yeniden düzenlenebilir. Yüksek kaplama basınçlarında ise püskürtülen atomlar veya moleküller birbirleri ile çarpışma olasılığı artacağından alttaşa daha düşük kinetik enerjilerle ulaşır ve bu durum ince film yüzeyinde pürüzlülüğün artmasına neden olur [39]. Alınan AFM ölçümleri değerlendirildiğinde 20 mTorr sonrasında artan yüzey pürüzlülüğü bu duruma bağlanabilir. Şekil 5.5’de verilen RMS-Kaplama basıncı grafindeki eğilim göz önünde bulundurulduğunda üretilen a-IGZO ince filmlerin yüzey pürüzlülüğü adına optimum kaplama basınçları 15 ile 25 mTorr arasında olduğu değerlendirildi.



Şekil 5.5. a-IGZO ince filmlerin RMS-Kaplama basıncı grafiği

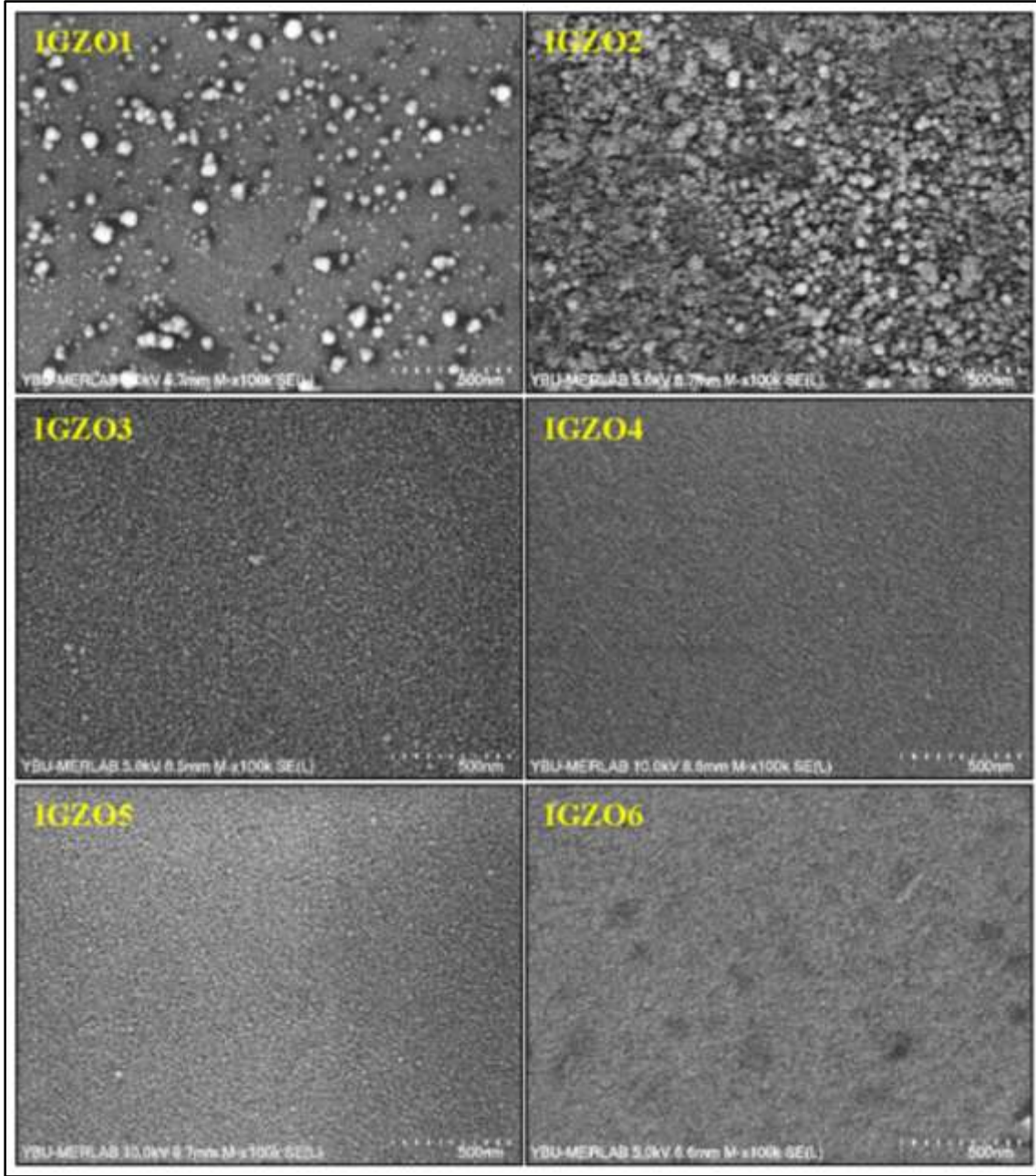
Amorf IGZO ince filmlerin yüzey yapılarını daha detaylı incelemek amacıyla SEM ölçümleri yapıldı. Numunelere ait yanal kesit ve yüzey SEM görüntüleri Şekil 5.6 ve 5.7’de verildi. Yanal kesit görüntüleri incelendiğinde ince film kalınlıkları 100-110 nm arasında değişmekte olduğu ve SIMS ölçümlerinde krater derinliğinden alınan ölçümler ile uyumlu olduğu görüldü.



Şekil 5.6. a-IGZO ince filmlerin yanal SEM görüntüleri

Yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde ise kaplama basıncındaki değişimin tıpkı AFM analizlerinde olduğu gibi biriktirilen a-IGZO ince film yüzey morfolojisini etkilediği ve

değişime neden olduğu görüldü. IGZO1 ve IGZO2'de 5 mTorr ve 10 mTorr kaplama basınçlarında biriktirilen a-IGZO ince filmlerin yüzeyleri oldukça pürüzlüdür. AFM analizleri kısmında belirtilen In miktarındaki düşüşün yüzey görüntülerini olumlu yönde etkilediği SEM görüntülerinden de açıkça görülmektedir. Buradan 5 ve 10 mTorr kaplama basınç değerleri altında yüzey homojenliği daha az olan ince filmlerin oluşacağı sonucuna varılabilir. IGZO3, IGZO4 ve IGZO5'de 15 mTorr, 20 mTorr ve 25 mTorr kaplama basınçları için a-IGZO ince filmlerinin yüzeyinin çok sayıda küçük düz tanelerden oluştuğu ve sonuç olarak daha homojen bir yüzey elde edildiği görüldü. Artan kaplama basıncı ile yüzey morfolojisinin düzelmeye başladığı ve daha homojen bir film oluştuğu gözlemlenmiş olsa bile, IGZO6'da 30 mTorr kaplama basıncında yüzey morfolojisinin bozulmaya ve gözenekli bir yapı haline gelmeye başladığı gözlemlendi. Bu durum, kaplama basıncındaki artışın ya da düşüşün, tane boyutunun veya yüzey morfolojisinin düzenli olarak iyileşmesi veya bozulması üzerinde sıralı bir etkisinin olmadığını gösterir. AFM analizlerinde de değinilen, püskürtülen atomların yüzey göçü için yeterli enerjiye ihtiyaç duyması ve bu enerjinin artan basınç değeri ile sağlandığı düşünülürse, yüzey morfolojisinin gelişmesi buna bağlanabilir. Ancak numunelerden alınan SEM görüntüleri kaplama basıncında bir sınırlama olabileceğini göstermektedir. Artan kaplama basıncıyla, püskürtülen atomların diğer atomlarla çarpışma olasılığı artar ve bu da hem enerji kaybına hem de yüzeye ulaşamayan atom ve moleküllere neden olur. Daha düşük enerji ile yüzeye ulaşan atom ve moleküller a-IGZO ince film yüzeyinde püskürtülen atomların göçünü sınırlar ve düzensiz taneciklerin oluşmasına yol açabilir [61].

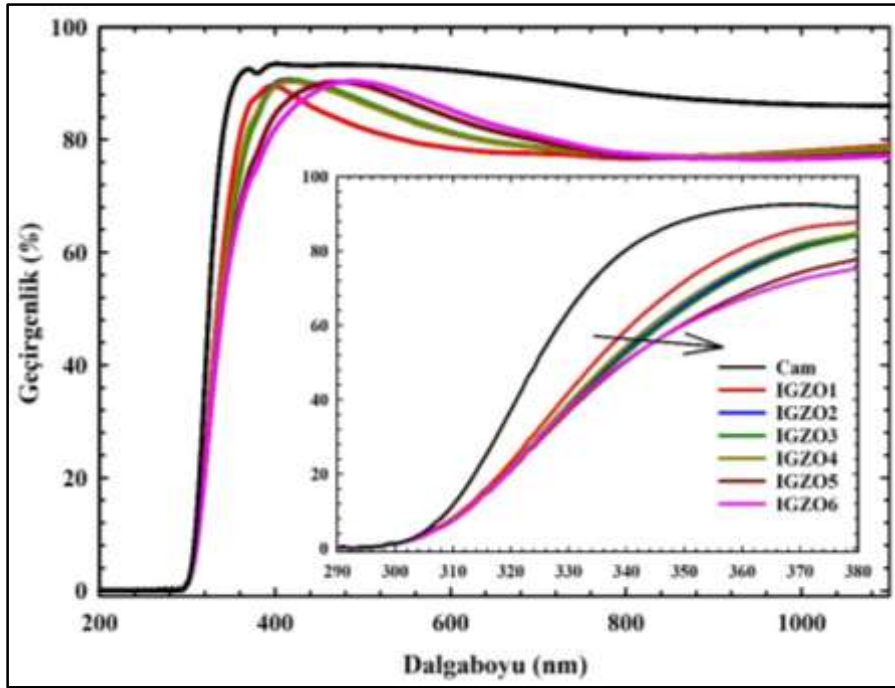


Şekil 5.7. a-IGZO ince filmlerin yüzey SEM görüntüleri

### 5.1.3. Optik analizler

Optik özellikleri değerlendirmek amacıyla mikroskop camı üzerine biriktirilen a-IGZO ince filmlerin optik geçirgenlik karakteristikleri, 200-1100 nm dalga boyu aralığına sahip UV-Vis spektrometresi kullanılarak belirlendi. Şekil 5.8’de a-IGZO ince filmler ve boş mikroskop cam alttaşın dalga boylarına karşılık gelen optik geçirgenlik grafikleri verildi. Şekil 5.8 incelendiğinde a-IGZO ince filmlerinin ultraviyole aralığındaki ortalama geçirgenliğin artan kaplama basıncı ile azaldığını belirlendi. Özellikle 380 nm civarında

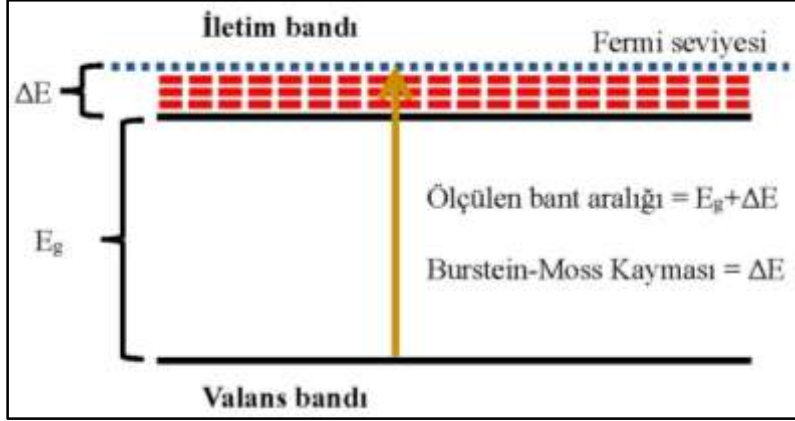
ortalama geçirgenlik %85'ten %70'e düşmüştür ve ek olarak a-IGZO ince filmlerin tümü 320 nm yakınında keskin bir soğurma kenarı sergilemiştir. Görünür bölge (400-750 nm) aralığında ise artan kaplama basıncı ile ortalama geçirgenlik artma eğilimindedir. Bu aralıkta ortalama geçirgenlik tüm filmlerde %80 in üzerinde olduğu belirlendi. Ayrıca 800-1100 nm aralığındaki a-IGZO ince filmlerin ortalama geçirgenliği aynı film kalınlığına rağmen kaplama basıncının değişiminden etkilenmemiştir. Bu tez çalışmasındaki a-IGZO ince filmlerin optik iletim eğilimleri literatürde elde edilenlere benzer olduğu belirlenmiştir [44,144].



Şekil 5.8. a-IGZO ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları

Şekil 5.8 içindeki grafikte görüldüğü gibi kaplama basıncı arttıkça soğurma kenarının nispeten daha uzun bir dalga boyuna doğru kaydığını görülmektedir. Tersine düşünüldüğünde düşük kaplama basınçlarında soğurma kenarı daha küçük dalga boylarında oluşmaktadır. ITO, IZO, ZnO ve IGZO gibi dejenere yarı iletkenlerde, optik bant aralığı, taşıyıcı konsantrasyonundaki değişiklikten etkilenir ve bu durum bant aralığı genişleme veya daralma etkisi ile açıklanabilir. Optik bant aralığının genişlemesi (maviye kayma), iletim bandına yakın bazı durumların bir sonucu olarak soğurma kenarı daha yüksek enerjilere itildiğinde gerçekleşir. Bu durum bazı dejenere yarıiletkenlerde bulunan ve Fermi seviyesinin iletim bandına kayması olarak bilinen Burstein-Moss (BM) kayması ile açıklanabilir (Şekil 5.9). Bu etki; elektron taşıyıcı konsantrasyonu, yarı iletkenlerde

dejenere katkılmaya karşılık gelen durumların iletim bandı kenar yoğunluğunu aştığında ortaya çıkar.



Şekil 5.9. Burstein-Moss (BM) Kayması şematığı

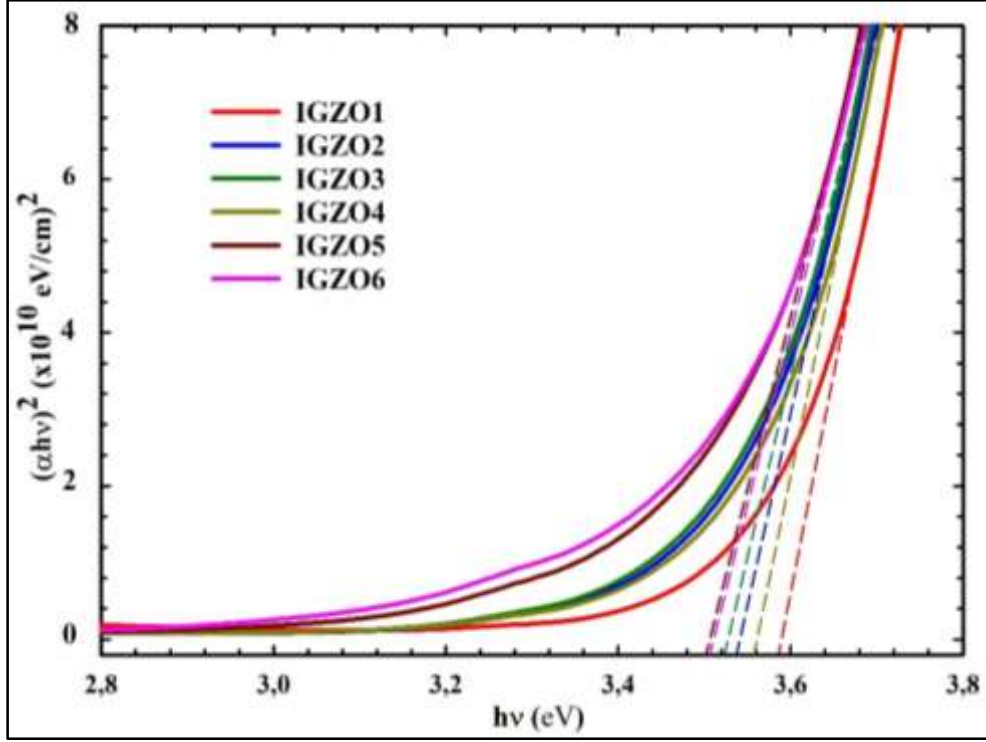
Normal olarak katkılı yarıiletkenlerde Fermi seviyesi iletim ve valans bantları arasındadır. n katkılı bir yarıiletken düşünüldüğünde katkı konsantrasyonu arttıkça elektronlar, Fermi seviyesini daha yüksek enerjiye iten iletim bandı içindeki durumları doldurur. Taşıyıcı konsantrasyonundaki bu artış, soğurma kenarının daha kısa dalga boyu bölgesine kaymasına neden olur. Böylece yarı iletkenin bant aralığı, iletim bandına yakın tüm durumların doldurulmasının bir sonucu olarak soğurma kenarı daha yüksek enerjilere (daha düşük dalga boylarına) itildikçe artar. Görünen bant aralığı, gerçek bant aralığı ile BM kaymasının toplamı olarak ifade edilebilir. Soğurma kenarının maviye kayması genel olarak optik bant aralığının genişlemesiyle sonuçlanan bant doldurma etkisi olarak yorumlanır [60, 150].

Direkt geçişli bir yarı iletkende, optik bant aralığı ( $E_g$ ), Eşitlik 5.1 ile verilen Tauc ilişkisi tarafından belirlendi.

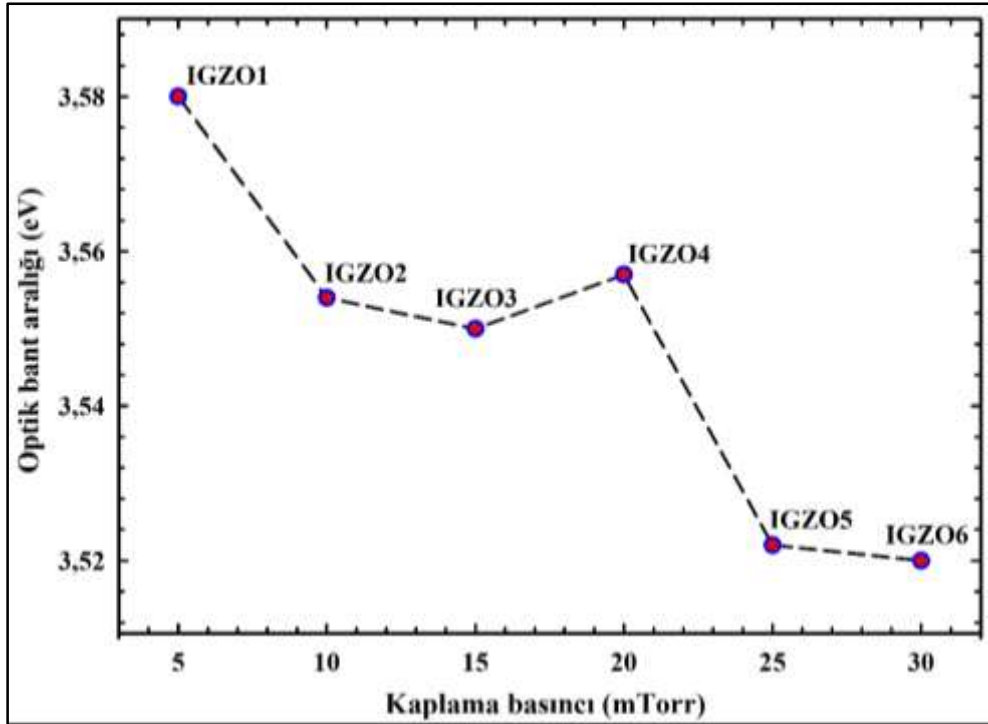
$$(\alpha h\nu^2) = \beta(h\nu - E_g) \quad (5.1)$$

Şekil 5.10'da verilen grafiklerde ince filmlerin hesaplanan optik bant aralığı 3,50 eV'dan 3,58 eV'a değiştiği görüldü. Artan kaplama basıncı ile a-IGZO ince filmlerin optik bant aralığının düşüş eğiliminde olduğu Şekil 5.11'de verildi. Bu optik bant aralığı değerleri yukarıda bahsedilen BM kaymasını da doğrulamasının yanı sıra literatürde de hem diğer

oksit bazlı ince filmlerde hem de a-IGZO ince filmler için benzer davranışlar bildirilmiştir [145,146].



Şekil 5.10. a-IGZO ince filmlerin optik bant aralıkları



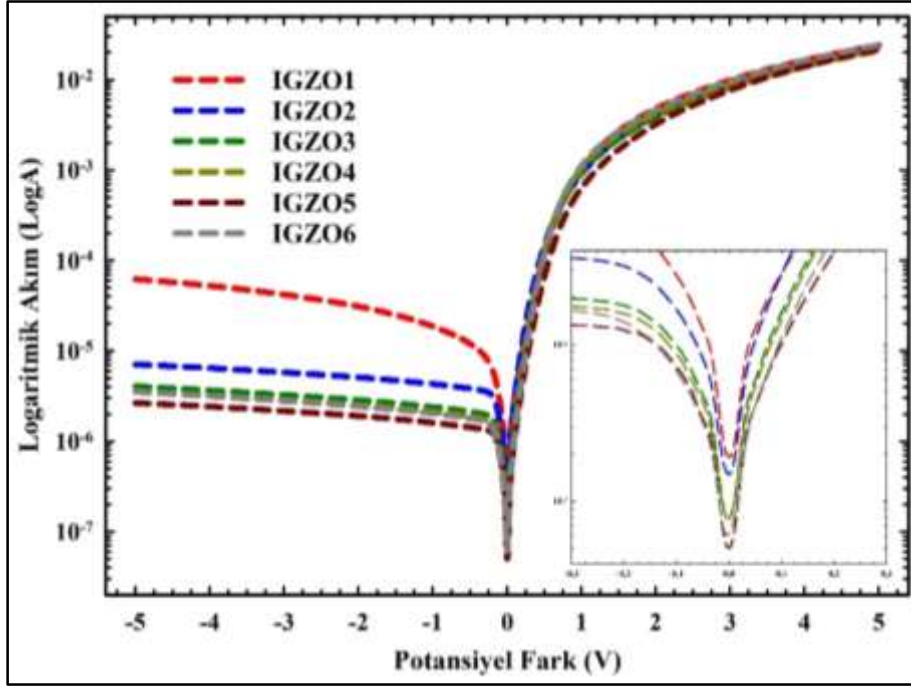
Şekil 5.11. a-IGZO ince filmlerin Optik bant aralığı-Kaplama basıncı değişimi

## 5.2. Farklı Kaplama Basınçlarında Üretilen a-IGZO Schottky diyot analizleri

Tez çalışmasının bu kısmında yapısal, morfolojik ve optik analizleri tamamlanan ince filmlerin elektriksel analiz aşamasına geçildi. Çizelge 4.3'deki parametrelere göre oluşturulan doğrultucu kontaklar ile AuNiGe/a-IGZO/n-Si/AuNiGe/Au yapısı haline gelen Schottky diyotların akım-gerilim analizleri yapıldı. Üretilen Schottky diyotların özellikleri oda sıcaklığında karanlık ortamda incelendi. I-V ölçümleri yapıdaki tüm davranışların net bir şekilde görülebilmesi için -5V ile +5V gerilim altında alınarak  $I_0$  (doyum akımı),  $n$  (idealite faktörü),  $\Phi_b$  (potansiyel bariyer yüksekliği),  $R_s$  (seri direnç) ve  $R_{sh}$  (şönt direnci) gibi temel elektriksel parametreler hesaplandı.

### 5.2.1. Termoiyonik emisyon teorisi ile diyot parametrelerinin belirlenmesi

I-V verilerinden çizilen yarı logaritmik  $\ln(I)$ -V grafikleri Şekil 5.12'de verildi. Şekilde görüldüğü gibi tüm diyotlar doğrultma özelliği göstermektedir. Schottky diyot performanslarını değerlendirmede en temel parametre olan doğrultma oranı, ters ve doğru gerilimler altındaki akımların oranı ( $RR=I_F/I_R$ ) olarak tanımlanır. Bu tez çalışmasında üretilen Schottky diyotların doğrultma oranları, kaplama basıncının 5 mTorr dan 25 mTorr a kadar artması ile artma eğiliminde olduğu görüldü. 30 mTorr da ise bu oran bir miktar düşmüştür. Diyotların doğrultma oranları IGZO1 (5 mTorr), IGZO2 (10 mTorr), IGZO3 (15 mTorr), IGZO4 (20 mTorr), IGZO5 (25 mTorr) ve IGZO6 (30 mTorr) numunelerinde sırasıyla 385, 3370, 5160, 5955, 8185 ve 6340 olarak belirlenmiştir. Tüm diyotlarda ters gerilim akımı, uygulanan gerilimle zayıf bir ilişkisi bulunurken, doğru gerilim altında ise gerilim arttıkça akımın üstel olarak arttığı gözlemlendi. Doğru gerilim bölgesinde ~1,2 V civarında tüm diyotlarda lineer artışın sapmaya uğradığı görüldü.



Şekil 5.12. a-IGZO Schottky diyotların Ln(I)-V grafikleri

Uygulanan voltaj çok yüksek olmadıkça ideal Schottky diyotlarda akım-iletim mekanizması termiyonik emisyon teorisine uyar. a-IGZO bazlı Schottky diyotların elektriksel çıktı parametrelerini belirlemek için standart termiyonik emisyon (TE) teorisi kullanıldı [152]. Bu teoriye göre akım-voltaj ilişkisi Eşitlik 5.2'deki gibi ifade edilir.

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (5.2)$$

Bu ifadede, V terimi uygulanan gerilim, q terimi elektron yükü, n terimi idealite faktörü, T terimi Kelvin cinsinden mutlak sıcaklık ve k terimi Boltzmann sabitidir.  $IR_s$  terimi a-IGZO bazlı Schottky diyotun seri direnci boyunca voltaj düşüşüdür [20].  $IR_s$  terimi orta ve düşük gerilim bölgelerinde diyota uygulanan voltaja kıyasla ihmal edilecek kadar düşüktür.  $I_0$  terimi ise doyum akımı olup, ln(I)-V çiziminden türetilir ve Eşitlik 5.3'deki gibi verilir.

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \quad (5.3)$$

Burada  $\Phi_b$ ,  $A^*$ , ve  $A$  sırasıyla MS arasında oluşan sıfır gerilim potansiyel bariyer yüksekliği, Richardson sabiti ve diyotun yüzey alanıdır.  $A^*$ , n-tipi Si için  $120 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$ 'dir. Eşitlik 5.4'de verilen  $\Phi_b$ , Eşitlik 5.3'de verilen formülde  $I_0$ 'ın yeniden düzenlenmesi ile elde edilir.

$$\Phi_b = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (5.4)$$

İdealite faktörü  $n$ , doğru gerilim  $\ln(I)$ - $V$  eğrilerinin eğiminden bulunabilir ve eşitlik 5.5'de olduğu gibi verilir.

$$n = \frac{q}{kT} \left( \frac{dV}{d(\ln I)} \right) \quad (5.5)$$

Yukardaki eşitlikler ve Şekil 5.12'de  $\ln(I)$ - $V$  grafiklerinin lineer bölgelerinin eğimlerinden  $n$  ve  $\Phi_b$  değerleri hesaplanmıştır. IGZO1 (5 mTorr), IGZO2 (10 mTorr), IGZO3 (15 mTorr), IGZO4 (20 mTorr), IGZO5 (25 mTorr) ve IGZO6 (30 mTorr) numaralı numunelerde  $n$  idealite faktörü değeri sırasıyla 3,79, 3,16, 3,03, 2,94, 3,17 ve 2,84 şeklinde hesaplanmıştır.  $\Phi_b$  değerleri ise sırasıyla 0,66 eV, 0,67 eV, 0,69 eV, 0,69 eV, 0,70 eV, 0,70 eV şeklinde hesaplanmıştır. Bu değerler ayrıca Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Termioyonik teorisi ile hesaplanan a-IGZO Schottky diyot I-V sonuçları

Parametre	Metot	Numune					
		IGZO1 (5 mtorr)	IGZO2 (10 mtorr)	IGZO3 (15 mtorr)	IGZO4 (20 mtorr)	IGZO5 (25 mtorr)	IGZO6 (30 mtorr)
$I_0 (\mu A)$	$\ln(I)$ - $V$	1,08	0,91	0,49	0,42	0,32	0,30
$n$	$\ln(I)$ - $V$	3,79	3,16	3,03	2,94	3,17	2,84
$\Phi_b (eV)$	$\ln(I)$ - $V$	0,66	0,67	0,69	0,69	0,70	0,70

İdeal bir diyot için idealite faktörü 1'e eşittir, ancak hesaplanan idealite faktörlerin hepsi 1'den daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durum arayüz durumları, seri direncin etkisi

ve üretim rekombinasyon akımlarından kaynaklanmaktadır [8,151]. Şekil 5.12’de a-IGZO tabanlı Schottky diyotların  $\ln(I)$ - $V$  grafiklerinden görüleceği gibi gerilim arttıkça seri direnç ( $R_s$ ) etkisiyle diyotlarda lineer bölge daralmakta ve lineerlikten sapma meydana gelmektedir [153]. Genelde metal-yarıiletken veya metal-oksit-yarıiletken Schottky diyotlarda  $\ln(I)$ - $V$  grafiği orta ve düşük doğru gerilim değerlerinde doğrusal bir fonksiyona uyar, fakat yüksek doğru gerilimlerde özellikle seri direnç etkisi ile lineerlikten sapar [13,161]. Yüksek gerilimlerde seri direncin bu etkisi önemlidir, bu yüzden tüm a-IGZO tabanlı Schottky diyotların seri dirençleri Cheung fonksiyonları ve Norde metodu ile ayrıca hesaplandı.

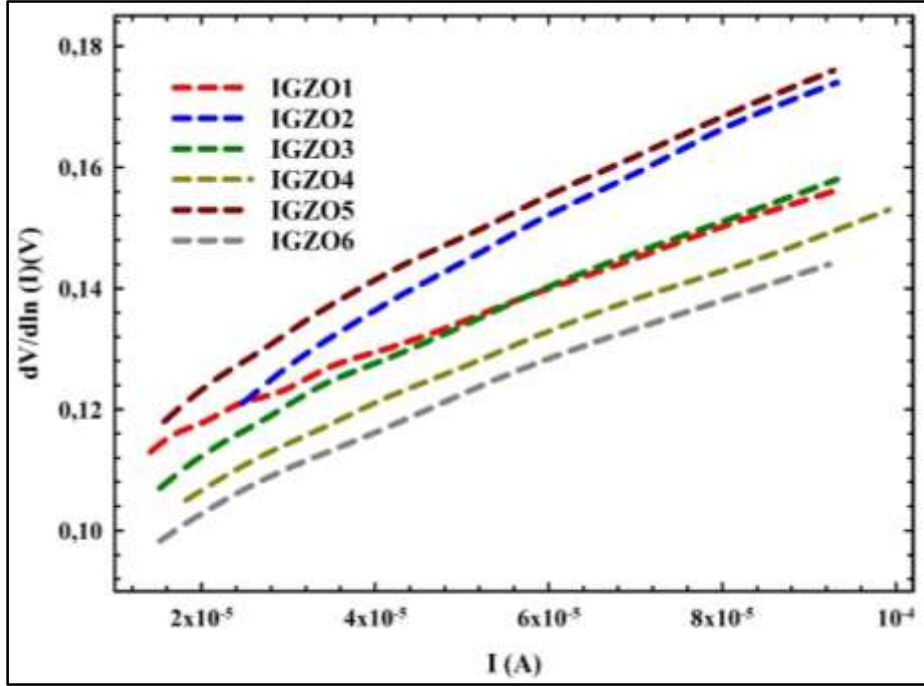
### 5.2.2. Cheung ve Norde fonksiyonları ile diyot parametrelerin belirlenmesi

Cheung fonksiyonları Eşitlik 5.6 ve 5.7’deki gibi ifade edilir [154]. Bu fonksiyonlar ile yalnızca  $R_s$  değil aynı zamanda  $n$ ,  $\Phi_b$  ve değerleri elde edilebilir.

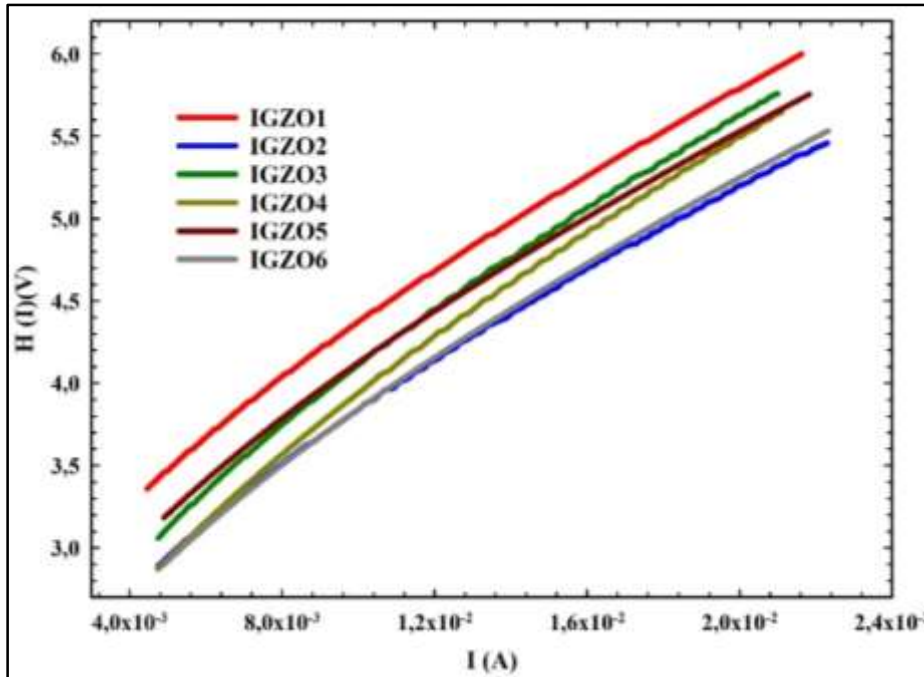
$$\frac{dV}{d(\ln I)} = n \left( \frac{kT}{q} \right) + IR_s \quad (5.6)$$

$$H(I) = V - n \left( \frac{kT}{q} \right) \ln \left( \frac{I}{AA^*T^2} \right) = IR_s + n\Phi_b \quad (5.7)$$

Şekil 5.13 ve 5.14, a-IGZO bazlı diyotların oda sıcaklığında  $dV/d(\ln I)$ - $I$  ve  $H(I)$ - $I$  grafiklerini göstermektedir. Eşitlik 5.7’de denklemin son kısımda olan  $IR_s$  ifadesi diyotun seri direnci boyunca voltaj düşüşüdür. Burada  $dV/d(\ln I)$ - $I$  ve  $H(I)$ - $I$  grafiklerinin eğimleri  $R_s$  değerlerini,  $y$  eksenini kesişimleri ise sırasıyla  $n$  ve  $\Phi_b$  değerlerini vermektedir.  $dV/d(\ln I)$ - $I$  grafiğinden hesaplanan  $n$  ve  $R_s$  değerleri ile,  $H(I)$ - $I$  grafiğinden hesaplanan  $R_s$  ve  $\Phi_b$  değerleri Çizelge 5.2’de verildi.



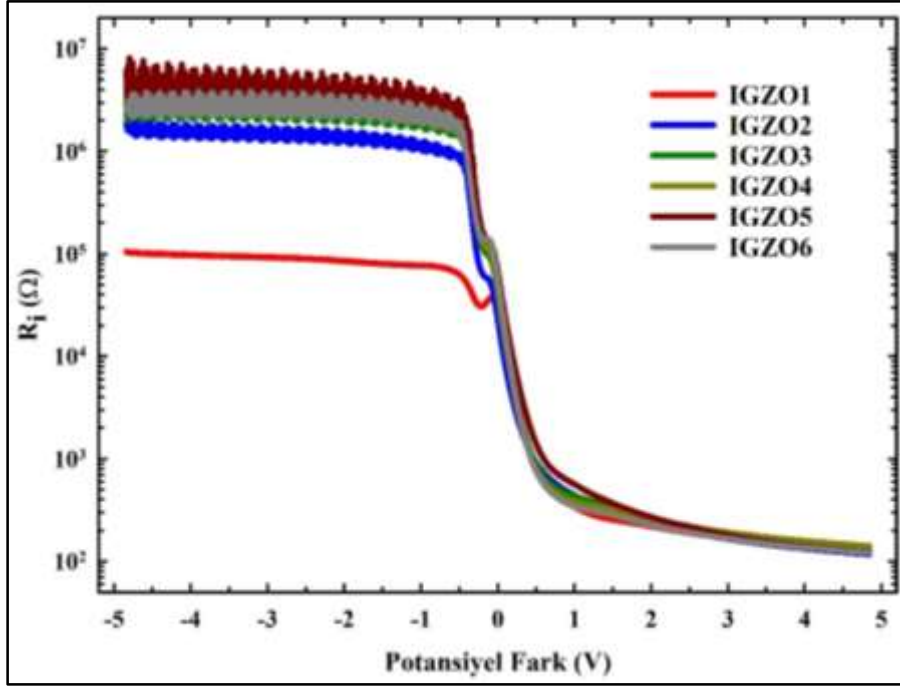
Şekil 5.13. a-IGZO Schottky diyotların deneysel  $dV/d\ln(I)$  - akım (I) grafiği



Şekil 5.14. a-IGZO Schottky diyotların deneysel  $H(I)$  - akım (I) grafiği.

Ek olarak,  $dV_i / dI_i$  kullanılarak  $R_s$  ve  $R_{sh}$  elde edildi. Şönt direnci ( $R_{sh}$ ) tıpkı seri direnç gibi diyotun performansını ve kalitesini anlamamızı sağlayan diğer bir önemli parametredir. İdeal bir Schottky diyotta seri direnç değeri sıfıra giderken şönt direnci sonsuza gitmelidir [8]. AuNiGe/a-IGZO/n-Si/AuNiGe/Au Schottky diyot yapısının seri ve

şönt direnci doğru ve ters gerilim I-V karakteristiklerinden Ohm yasası ( $R_i=dV_i/dI_i$ ) kullanılarak hesaplanabilir. Yapı Direnci ( $R_i$ )-Uygulanan Doğru Gerilim ( $V_i$ ) grafiği Şekil 5.15'de verildi.



Şekil 5.15. a-IGZO Schottky diyotların  $R_i - V$  grafiği

Şekil 5.15'de doğru gerilim arttıkça yapı direncinin minimum değerlere indiği, ters gerilimde ise hemen hemen sabit bir maksimum değere gittiği görülmektedir. Minimum bölgeler seri dirençlere ( $R_s$ ), maksimum bölgeler şönt ( $R_{sh}$ ) dirençlere karşılık gelir. Yüksek bir cihaz performansı elde etmek için seri direnç değeri olabildiğince düşük olmalıdır, ancak eklemdeki kısmında akım kayıplarını önlemek adına şönt direnç değeri olabildiğince yüksek olmalıdır [156,157]. Hesaplanan  $R_s$  ve  $R_{sh}$  değerleri Çizelge 5.2'de verildi. Tablodan görüldüğü gibi literatürle uyumlu olarak  $R_{sh}$  değerlerinin yeterince yüksek,  $R_s$  değerlerinin ise yeterince düşük olduğu söylenebilir.

Karşılaştırma yapmak için  $R_s$  ve  $\Phi_b$  parametreleri Norde yöntemi kullanılarak da belirlendi [155]. Norde metodu aşağıda görüldüğü gibi Eşitlik 5.8 ile ifade edilebilir.

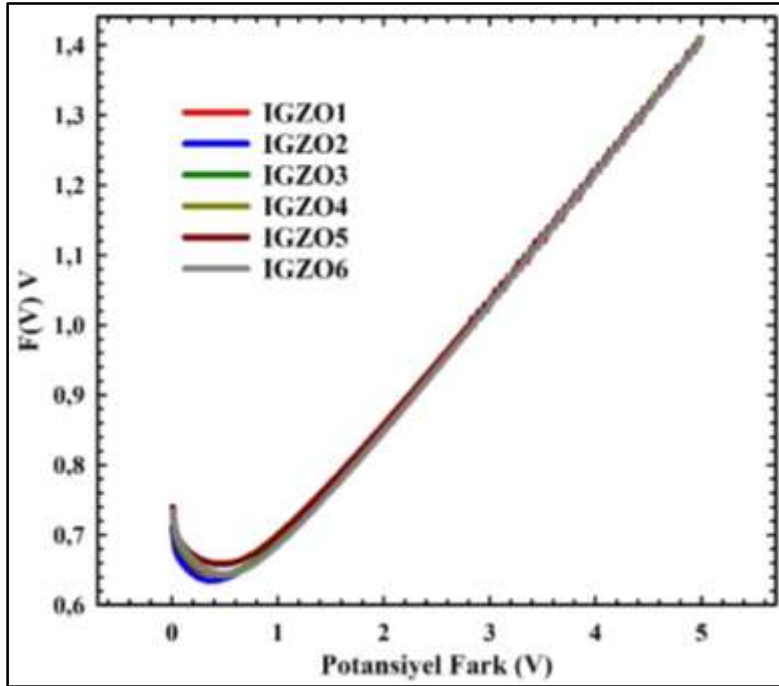
$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{q}{kT} \ln \left( \frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (5.8)$$

burada  $I(V)$  akım ve  $\gamma$  ise diyotun idealite faktöründen daha büyük boyutsuz bir tam sayıdır. Şekil 16'de gösterilen  $F(V)$ - $V$  grafiğinin minimum noktası,  $R_s$  ve  $\Phi_b$  değerlerine karşılık gelir. İlgili parametreler ise Eşitlik 5.9 ve 5.10'dan hesaplanabilir.

$$\Phi_b = F(V_{\min}) + \frac{V_{\min}}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (5.9)$$

$$R_s = \frac{kT}{qI_{\min}}(\gamma - n) \quad (5.10)$$

$F(V_{\min})$  ve  $V_{\min}$ ,  $F(V)$ - $V$  grafiğindeki minimum noktanın koordinatlarıdır.  $I_{\min}$ ,  $V_{\min}$ 'e karşılık gelen akım değeridir. Çizelge 5.2'de Norde metodundan yararlanarak hesaplanan  $\Phi_b$  ve  $R_s$  değerleri verildi.



Şekil 5.16. a-IGZO tabanlı diyotların  $F(V)$  -  $V$  grafiği.

Tablodaki değerler incelendiğinde kaplama basıncının Schottky diyot parametreleri üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir.  $\ln(I)$ - $V$  ve  $d\ln(I)$ - $V$  ile hesaplanan idealite faktörü ( $n$ ) ve farklı metotlar ile hesaplanan bariyer yüksekliği ( $\Phi_b$ ) değerleri uyum içerisinde. Seri dirençlerde ise tüm diyotlar için Cheung ve Norde metodu ile hesaplanan değerler

farklılık göstermektedir. Bu farklılığın sebebi, Norde fonksiyonunun ideal diyotlar için geçerli olmasından kaynaklanmaktadır. Norde fonksiyonları, ileri gerilim I-V eğrisinin tüm genişliğini kullanarak hesaplanırken, Cheung fonksiyonları daha sınırlı bir bölge üzerinde hesaplanmaktadır [154,155].

Çizelge 5.2. a-IGZO Schottky diyotların tüm I-V sonuçları

Parametre	Metot	Numune					
		IGZO1 (5 mtorr)	IGZO2 (10 mtorr)	IGZO3 (15 mtorr)	IGZO4 (20 mtorr)	IGZO5 (25 mtorr)	IGZO6 (30 mtorr)
$I_o (\mu A)$	$\ln(I)-V$	1,08	0,91	0,49	0,42	0,32	0,30
$n$	$\ln(I)-V$	3,79	3,16	3,03	2,94	3,17	2,84
	$d\ln(I)-dV$	4,14	4,03	3,86	3,72	4,25	3,54
$\Phi_b (eV)$	$\ln(I)-V$	0,66	0,67	0,69	0,69	0,70	0,70
	$H(I)$	0,74	0,74	0,80	0,75	0,83	0,81
	$F(V)$	0,71	0,68	0,71	0,71	0,73	0,72
$R_s (\Omega)$	$d\ln(I)-dV$	540,43	771,09	652,09	589,01	738,50	589,66
	$H(I)$	152,25	145,22	164,64	168,27	148,43	149,66
	$F(V)$	393,49	793,76	636,25	538,11	903,93	439,70
	$R_i$	125,43	117,12	136,58	140,62	122,04	120,53
$R_{sh} (k\Omega)$	$R_i$	104,99	1934,47	3048,20	3593,08	6264,68	2589,42

Yüksek kaplama basınçlarına doğru idealite faktörü değerlerinde (n) düşme eğilimi ve bariyer yüksekliği ( $\Phi_b$ ) değerlerinde artma eğilimi görülmektedir. Bu durum AFM ve SEM görüntüleri ile kıyaslandığında pürüzlülüğü az ve homojenliği iyi olan ince film yüzeylerinde Schottky kontakların daha ideal oluşacağı ile ilişkilendirilebilir. Tez çalışmasının bu kısmı, 15-25 mTorr aralığındaki kaplama basınçlarında üretilen a-IGZO ince filmlerin daha düşük kaplama basınçlarında üretilenlerden daha iyi diyot performansı sergilediğini gösterdi.



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, amorf InGaZnO (a-IGZO) ince filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özelliklerinin belirlenmesi, bu malzeme tabanlı Schotkky diyotların üretilmesi ve elektriksel karakterizasyonlarının detaylı bir şekilde incelenmesi hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda öncelikle a-IGZO ince filmlerin üzerine biriktirileceği Si alttaşın arka kısmına ohmik kontak oluşturuldu. Ohmik kontakın ince film biriktirilmesinden önce oluşturulmasının sebebi, ohmik kontak oluşturulma aşamasında yapılacak tavlama işlemlerinin ince film özellikleri üzerine herhangi bir etki yaratmasının önüne geçmektedir. Bu sayede, üretimi yapılan ince filmlerden elde edilecek sonuçlar tamamen yapıya ait olacaktır. Bu amaç doğrultusunda, 3 inç n tipi silisyum alttaşın arka kısmına Altın (Au) ve Altın-Nikel-Germanyum (AuNiGe) metalleri buharlaştırıldı. Ohmik kontakın sağlanması amacıyla AuNiGe metali buharlaştırılırken alttaş sıcaklığı 250 °C sabit tutuldu, Au metali buharlaştırılırken ise alttaş sıcaklığı kademeli olarak 250 °C'den 90 °C'ye düşürüldü. Ohmik kontakı oluşturulmuş ve yapı olarak n-Si/AuNiGe/Au şeklini almış 3 inç Si alttaş 1x1 cm boyutlarında kesilerek ince film biriktirmeye hazır hale getirildi. Tezin hedefi doğrultusunda RF magnetron sputtering tekniği ile farklı kaplama basınçlarında (5, 10, 15, 20, 25, 30 mTorr) 6 set numune üretildi. IGZO ince film biriktirmeleri yapılan her sette ohmik kontakı tamamlanmış n-Si/AuNiGe/Au yapısı, optik karakterizasyonlar için cam ve diğer karakterizasyonlar için yine n-Si alttaş kullanıldı. Sadece kaplama basıncının etkisini gözlemleyebilmek adına diğer biriktirme parametreleri sabit tutuldu. Her set oda sıcaklığında, 50 W RF gücünde ve 100 nm ince film kalınlığı planlanarak üretildi.

Üretilen IGZO ince filmlerin, hedeflendiği gibi amorf yapıda olduğu X-ışınları kırınımı ile doğrulandı. Bu doğruluk ayrıca düşük açılı X-ışınları ölçümleri ile desteklendi. X-ışınları ölçümleri değerlendirildiğinde, 50 W RF gücünde kaplama basıncının filmlerin amorf yapısı üzerinde bir etkisinin olmadığı görüldü. SIMS ölçümlerinde oluşan derinlik profilleri incelendiğinde a-IGZO ince filmlerin kalınlıkları hedeflendiği gibi yaklaşık 100 nm olduğu ve ince film kalınlığı boyunca In, Ga ve Zn elementlerinin atomik dağılımının düzgün olduğu görüldü. SIMS ölçüm sonuçlarına göre üretilen ince filmlerde yüksek kaplama basınçlarına doğru In atomik dağılımında bir düşüş gözlemlendi. Bu durum In atomik boyutları ile ilişkilendirildi. Nispeten daha büyük atomik boyutlara sahip olan In, yüksek kaplama basınçlarında daha fazla çarpışmaya ve saçılmaya uğrayacağı düşünüldü.

Böylece yüksek kaplama basınçlarında üretilen a-IGZO ince filmlerde daha az oranda In bulunabileceği sonucuna varıldı. Yüzey morfolojisi analiz sonuçları değerlendirildiğinde kaplama basıncının a-IGZO ince filmlerinin yüzey özelliklerini kuvvetli bir şekilde etkilediği belirlendi. Kaplama basıncının 5 mTorr dan (IGZO1) 20 mTorr'a (IGZO4) artması ile yüzey RMS değerinin 2,03 nm'den 0,75 nm değerine kadar düştüğü görüldü. 20 mTorr dan (IGZO4) 30 mTorr a (IGZO6) çıkan kaplama basınçlarında ise yüzey RMS değerinin 0,94 nm'ye yükseldiği görüldü. İnce film yüzey özelliklerine kaplama basıncının etkisi SEM ölçümleriyle de doğrulandı. Düşük kaplama basınçlarında üretilen a-IGZO ince filmlerin yüzeyleri oldukça pürüzlü olduğu görüldü. Artan kaplama basıncı ile 25 mTorr a (IGZO5) kadar yüzeyin çok sayıda küçük düz tanelerden oluştuğu, 30 mTorr da (IGZO6) yüzeyin bozulmaya ve gözenekli bir yapı oluşmaya başladığı SEM yüzey görüntülerinden görüldü. Bu tez çalışmasında AFM ve SEM ölçümleri birlikte değerlendirildiğinde düşük yüzey pürüzlülüğü istenilen opto-elektronik cihazlar için 20 mTorr (IGZO4) basıncında üretilen ince film yapısının kullanılması önerilmektedir. SEM yanal görüntüleri değerlendirildiğinde ise a-IGZO ince film kalınlıkları, SIMS ölçümlerini destekler nitelikte ve yaklaşık 100-110 nm aralığında olduğu görüldü. Üretilen ince filmlerin optik sonuçları incelendiğinde görünür bölgedeki (400-750 nm) ortalama geçirgenlik %80 in üzerinde olduğu belirlendi. Elde edilen yüksek geçirgenlik değeri bu ince film yapıların optik uygulamalar (optik pencere, vb.) için oldukça elverişli olduğunu göstermektedir. Şekil 5.8 incelendiğinde artan kaplama basıncı ile soğurma kenarının daha uzun dalga boyuna kaydığı görüldü. Soğurma kenarındaki bu kayma taşıyıcı konsantrasyonundaki değişime atfedildi. Tauc ilişkisi ile hesaplanan yasak enerji aralıkları artan kaplama basıncı ile 3.58 eV'dan 3,52 eV'a düştüğü ve bant değerinde maviye kayma olduğu belirlendi.

a-IGZO ince filmlerin yapısal, morfolojik ve optik karakterizasyonları tamamlandıktan sonra üretilen yapıların elektriksel özelliklerini detaylı irdelemek için a-IGZO/n-Si/AuNiGe/Au yapısının doğrultucu kontaklarının alınması aşamasına geçildi. Farklı kaplama basınçlarında üretilmiş 6 adet numune üzerine oda sıcaklığında AuNiGe metali buharlaştırılarak diyot fabrikasyonları tamamlandı. Metal maske yardımı ile oluşturulan kontaklar 1mm çapında, nokta kontak yapısında ve 150 nm kalınlığında oluşturuldu. Hazırlanan AuNiGe/a-IGZO/n-Si/AuNiGe/Au Schottky diyot yapısının I-V ölçümleri yapıdaki tüm davranışların net bir şekilde görülebilmesi için geniş bir voltaj (-5V ile +5V) aralığında oda sıcaklığında alındı.

Farklı kaplama basınçlarında üretilen a-IGZO ince film tabanlı Schottky diyotların I-V ölçümlerinden idealite faktörü ( $n$ ), potansiyel bariyer yüksekliği ( $\Phi_b$ ), doyum akımı ( $I_0$ ), seri direnç ( $R_s$ ) ve şönt direnci ( $R_{sh}$ ) gibi parametreler Termoyonik emisyon teorisi, Cheung fonksiyonları ve Norde metodu kullanılarak hesaplandı. Diğer karakterizasyonlar ve Çizelge 5.1’de verilen I-V sonuçlarına göre a-IGZO ince filmlerin ve dolayısıyla üretilen Schottky diyotların özelliklerinin kaplama basıncından oldukça etkilendiği belirlendi. Schottky diyot karakteristiklerinin en temel parametrelerinden biri olan idealite faktörü, ideal bir diyot için 1’dir. Ancak bu değer genellikle arayüzey durumlarının varlığı, bariyer homojensizliği, tünelleme akımı ve uzay yükü bölgesinde jenerasyon-rekombinasyon akımlarından dolayı 1’den büyüktür. Tez kapsamında üretilen diyotların Çizelge 5.1’de verilen idealite faktör değerleri incelendiğinde bulunan değerlerin 1’den büyük olması bu nedenlere atfedildi. Üretilen a-IGZO ince filmlerin SEM ve AFM görüntüleri incelendiğinde düşük kaplama basınçlarında yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu görülmektedir. Bu yüzey durumlarından dolayı metal-yarıiletken arasında düzgün bir arayüzey oluşmaması ve dolayısı ile bariyer homejensizliğinin varlığından bahsedilebilir. Bu durumun idealite faktörünün düşük kaplama basınçlarında nispeten daha yüksek çıkmasında etkili olduğu söyleyebiliriz.  $\ln(I)$ -V grafikleri incelendiğinde özellikle 5 mTorr (IGZO1) kaplama basıncında üretilen diyot hem doğrultma oranı hem de idealite faktörü açısından en düşük performansı sergilemiştir. Tüm diyotlarda  $dV/d\ln(I)$ -I grafiklerinden hesaplanan idealite faktörü değerleri  $\ln(I)$ -V grafiklerinden hesaplanan idealite faktörlerinden büyük olarak elde edildi. Bunun nedeni, idealite faktörü her iki yöntemde I-V karakteristiklerinin farklı bölgelerinden hesaplanmasıdır. Farklı iki yöntemle hesaplanan idealite faktörleri uyum içinde olduğu ve düşük kaplama basınçlarında ideallikten sapmanın daha fazla olduğu Çizelge 5.1’deki değerler incelenerek söylenebilir.

Schottky diyotun elektriksel performansını önemli şekilde etkileyen parametrelerden biri seri direnç ( $R_s$ ) olarak bilinmektedir. Şekil 5.12’de verilen  $\ln(I)$ -V grafikleri incelendiğinde, farklı kaplama basınçlarında üretilen tüm diyotlarda 1,2 V dan daha yüksek voltajlarda seri direnç etkisiyle lineer artışın sapmaya uğradığı görülmektedir. Bu gözlem tüm a-IGZO tabanlı diyotlar için geçerlidir. Çizelge 5.2’de verilen seri direnç değerleri Ohm yasası, Cheung fonksiyonları ve Norde metodu kullanılarak hesaplandı. Farklı metotlardan elde edilen değerler birbirinden farklı olsa da kaplama basıncı açısından değerlendirildiğinde eğilimin aynı yönde olduğu görüldü. Tüm kaplama basınçlarında hem  $\ln(I)$ -V hem de Cheung fonksiyonları ile hesaplanan idealite faktörleri seri direncin

değişmesi ile uyum içindedir. Şönt direnci ( $R_{sh}$ ) tıpkı seri direnç gibi diyotun performansını ve kalitesini anlamamızı sağlayan diğer bir önemli parametredir. Diyot performansı değerlendirilirken seri direncin düşük, şönt direncinin yüksek olması beklenmektedir. Çizelge 5.2 incelendiğinde 6264,68 k $\Omega$  değeriyle en yüksek şönt direnci 25 mTorr (IGZO5) da üretilen diyota ait olduğu belirlendi. Elde edilen sonuçlara göre, elektronik bir cihaz üretilmesi hedeflendiğinde 25 mTorr (IGZO5) kaplama basıncında üretilen ince filmin kullanılması optimal bir yapı elde etmek için uygun olacaktır. Termoyonik emisyon, Cheung fonksiyonları ve Norde metodundan hesaplanan potansiyel bariyer yüksekliği ( $\Phi_b$ ) değerleri birbirleri arasında mükemmel bir uyum içinde olduğu görüldü. Bu sonuçlar, kararlı bir yapı üretimi gerçekleştirdiğimizi göstermektedir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, 25 mTorr (IGZO5) kaplama basıncında üretilen diyotun en optimum değeri gösterdiği belirlendi.

## KAYNAKLAR

1. Moss, S. J. and Ledwith, A. (1989). *Chemistry of the Semiconductor Industry*. (First edition). UK: Springer Dordrecht., 426-427.
2. Sancakoglu, O. (Pham, P., Goel, P., Kumar, S., Yadav, K.). (2020). *21st Century Surface Science-a Handbook*. UK: IntechOpen, 1-10.
3. Rahman, M. A. (2014). A review on semiconductors including applications and temperature effects in semiconductors. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*, 7(1), 50-70.
4. Łukasiak, L. And Jakubowski, A. (2010). History of semiconductors. *Journal of Telecommunications and information technology*, (1), 3-9.
5. Morris, P. R. (1990). *A history of the world semiconductor industry*. (First edition). UK: Peter Peregrinus Ltd., 12-18.
6. Braun, E. and MacDonald, S. (1982). *Revolution in miniature: The history and impact of semiconductor electronics*. (First edition). UK: Cambridge University Press, 33-37.
7. Welker, H. (1976). Walter Schottky. *Physics Today*, 29(6), 63.
8. Rhoderick, E. H. and Williams, R. H. (1988). *Surfaces, Interfaces, and Schottky Barriers, Metal-Semiconductor Contacts*. (Second edition). UK: Clarendon Press, 1-47.
9. Neamen, D. A. (1997). *Semiconductor physics and devices*. (Fourth edition). USA: Mc Graw-Hill, 517-523.
10. Cooke, M. J. (1990). *Semiconductor devices*. (First edition). USA: Prentice Hall, 294-308.
11. Cowley, A. M. and Sze, S. M. (1965). Surface states and barrier height of metal-semiconductor systems. *Journal of Applied Physics*, 36(10), 3212-3220.
12. Tyagi, M. S. (2008). *Introduction to semiconductor materials and devices*. (First edition). USA: John Wiley & Sons, 271-291.
13. Sharma, B. L. (1984). *Physics of Schottky barrier junctions. Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their applications*. (First edition). USA and UK: Plenum Press, 1-56.
14. Bardeen, J. (1947). Surface states and rectification at a metal semi-conductor contact. *Physical review*, 71(10), 717.

15. Haus, H. A., Statz, H., and Pucel, R. A. (1971). Noise measure of metal-semiconductor--metal Schottky-barrier microwave diodes. *Electronics Letters*, 22(7), 667-669.
16. Rhoderick, E. H. (1970). The physics of Schottky barriers. *Review of Physics in Technology*, 1(2), 81.
17. Lee, C. W., Afzalain, A., Akhavan, N. D., Yan, R., Ferain, I., and Colinge, J. P. (2009). Junctionless multigate field-effect transistor. *Applied Physics Letters*, 94(5), 053511.
18. Rideout, V. L. (1978). A review of the theory, technology and applications of metal-semiconductor rectifiers. *Thin Solid Films*, 48(3), 261-291.
19. Huang, Z., Carey, J. E., Liu, M., Guo, X., Mazur, E., and Campbell, J. C. (2006). Microstructured silicon photodetector. *Applied Physics Letters*, 89(3), 033506.
20. Sze, S. M., (1981). *Metal-Semiconductor Contacts , Physics of Semiconductor Devices*. (Second edition). USA: John Wiley & Sons, 250-270.
21. Barret, C., and Vapaille, A. (1979). Interface states in a cleaved metal-silicon junction. *Journal of Applied Physics*, 50(6), 4217-4222.
22. Evtushenko, Y. M., Romashkin, S. V., Trofimov, N. S., and Chekhlova, T. K. (2015). Optical properties of TiO<sub>2</sub> thin films. *Physics Procedia*, 73, 100-107.
23. Kang, M., Kim, S. W., and Park, H. Y. (2018). Optical properties of TiO<sub>2</sub> thin films with crystal structure. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 123, 266-270.
24. Amakali, T., Daniel, L. S., Uahengo, V., Dzade, N. Y., and De Leeuw, N. H. (2020). Structural and optical properties of ZnO thin films prepared by molecular precursor and sol-gel methods. *Crystals*, 10(2), 132.
25. Vyas, S. (2020). A Short Review on Properties and Applications of Zinc Oxide Based Thin Films and Devices: ZnO as a promising material for applications in electronics, optoelectronics, biomedical and sensors. *Johnson Matthey Technology Review*, 64(2), 202-218.
26. Liang, L. Y., Liu, Z. M., Cao, H. T., and Pan, X. Q. (2010). Microstructural, optical, and electrical properties of SnO thin films prepared on quartz via a two-step method. *ACS applied materials & interfaces*, 2(4), 1060-1065.
27. Yadav, A. A., Masumdar, E. U., Moholkar, A. V., Neumann-Spallart, M., Rajpure, K. Y., and Bhosale, C. H. (2009). Electrical, structural and optical properties of SnO<sub>2</sub>:F thin films: Effect of the substrate temperature. *Journal of Alloys and Compounds*, 488(1), 350-355.

28. Kumar, D., Priya, B., Jasrotia, P., Kumar, A., Singh, V., Jire, J., and Kulriya, P. K. (2022). Structural, optical, and electrical properties of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films: Nitrogen implantation and role of different substrates. *Frontiers in Materials*, 9, 1049189.
29. Asar, T., Baran, V., Kurtuluş, G., Dönmez, M., ve Özçelik, S. (2018). Platinum doping effect on In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MSM IR photodetectors. *Superlattices and Microstructures*, 122, 650-660.
30. Kwong, W. L., Qiu, H., Nakaruk, A., Koshy, P., and Sorrell, C. C. (2013). Photoelectrochemical properties of WO<sub>3</sub> thin films prepared by electrodeposition. *Energy Procedia*, 34, 617-626.
31. Addonizio, M. L., Aronne, A., Daliento, S., Tari, O., Fanelli, E., and Pernice, P. (2014). Sol-gel synthesis of ZnO transparent conductive films: the role of pH. *Applied Surface Science*, 305, 194-202.
32. Salam, S., Islam, M., and Akram, A. (2013). Sol-gel synthesis of intrinsic and aluminum-doped zinc oxide thin films as transparent conducting oxides for thin film solar cells. *Thin Solid Films*, 529, 242-247.
33. Lee, J. H., and Park, B. O. (2003). Transparent conducting ZnO: Al, In and Sn thin films deposited by the sol-gel method. *Thin solid films*, 426(1-2), 94-99.
34. Lee, M. I., Huang, M. C., Legrand, D., Lerondel, G., and Lin, J. C. (2014). Structure and characterization of Sn, Al co-doped zinc oxide thin films prepared by sol-gel dip-coating process. *Thin Solid Films*, 570, 516-526.
35. Bang, K., Son, G. C., Son, M., Jun, J. H., An, H., Baik, K. H., and Ham, M. H. (2018). Effects of Li doping on the structural and electrical properties of solution-processed ZnO films for high-performance thin-film transistors. *Journal of Alloys and Compounds*, 739, 41-46.
36. Ruzgar, S., and Caglar, M. (2019). The effect of Sn on electrical performance of zinc oxide based thin film transistor. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 485-490.
37. Li, Q., Li, X., and Zhang, J. (2013). Microstructure, optical and electrical properties of gallium-doped ZnO films prepared by sol-gel method. *Journal of alloys and compounds*, 572, 175-179.
38. Zhou, X., Han, D., Dong, J., Li, H., Yu, W., Yi, Z., and Wang, Y. (2019). High-performance Al-Zn-O thin-film transistors sputtering at different power. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 66(11), 4774-4777.
39. Thakur, A., Kang, S. J., Baik, J. Y., Yoo, H., Lee, I. J., Lee, H. K., and Shin, H. J. (2012). Effects of working pressure on morphology, structural, electrical and optical properties of a-InGaZnO thin films. *Materials Research Bulletin*, 47(10), 2911-2914.

40. Orita, M., Ohta, H., Hirano, M., Narushima, S., and Hosono, H. (2001). Amorphous transparent conductive oxide  $\text{InGaO}_3(\text{ZnO})_m$  ( $m \leq 4$ ): a  $\text{Zn}4s$  conductor. *Philosophical magazine B*, 81(5), 501-515.
41. Takagi, A., Nomura, K., Ohta, H., Yanagi, H., Kamiya, T., Hirano, M., and Hosono, H. (2005). Carrier transport and electronic structure in amorphous oxide semiconductor,  $\alpha\text{-InGaZnO}_4$ . *Thin Solid Films*, 486(1-2), 38-41.
42. Ow-Yang, C. W., Spinner, D., Shigesato, Y., and Paine, D. C. (1998). A time-resolved reflectivity study of the amorphous-to-crystalline transformation kinetics in dc-magnetron sputtered indium tin oxide. *Journal of Applied Physics*, 83(1), 145-154.
43. Lin, T. C., Huang, W. C., and Lan, W. C. (2014). A study on the electrical and optical characteristics of IGZO films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 25(7), 3077-3084.
44. Nomura, K., Ohta, H., Takagi, A., Kamiya, T., Hirano, M., and Hosono, H. (2004). Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors. *Nature*, 432(7016), 488-492.
45. Ide, K., Nomura, K., Hiramatsu, H., Kamiya, T., and Hosono, H. (2012). Structural relaxation in amorphous oxide semiconductor,  $\alpha\text{-In-Ga-Zn-O}$ . *Journal of Applied Physics*, 111(7), 073513.
46. Chang, C. H., Hsu, C. J., and Wu, C. C. (2017). Rectified Schottky diodes based on PEDOT: PSS/InGaZnO junctions. *Organic Electronics*, 48, 35-40.
47. Xin, Q., Yan, L., Luo, Y., and Song, A. (2015). Study of breakdown voltage of indium-gallium-zinc-oxide-based Schottky diode. *Applied Physics Letters*, 106(11), 113506.
48. Du, L., Zhang, J., Li, Y., Xu, M., Wang, Q., Song, A., and Xin, Q. (2018). High-performance flexible Schottky diodes based on sputtered InGaZnO. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 65(10), 4326-4333.
49. Dehuff, N. L., Kettenring, E. S., Hong, D., Chiang, H. Q., Wager, J. F., Hoffman, R. L., and Keszler, D. A. (2005). Transparent thin-film transistors with zinc indium oxide channel layer. *Journal of Applied Physics*, 97(6), 064505.
50. Miyasako, T., Senoo, M., and Tokumitsu, E. (2005). Ferroelectric-gate thin-film transistors using indium-tin-oxide channel with large charge controllability. *Applied Physics Letters*, 86(16), 162902.
51. Hoffman, R. L. (2006). Effects of channel stoichiometry and processing temperature on the electrical characteristics of zinc tin oxide thin-film transistors. *Solid-state Electronics*, 50(5), 784-787.

52. Su, J., Ma, Y., Yang, H., Li, R., Jia, L., Liu, D., and Zhang, X. (2019). Electrical characteristics of Li and N co-doped amorphous InZnSnO thin film transistors. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 37(6), 061511.
53. Lee, Y. S., Chen, W. J., Huang, J. S., and Wu, S. C. (2012). Effects of composition on optical and electrical properties of amorphous In–Ga–Zn–O films deposited using radio-frequency sputtering with varying O<sub>2</sub> gas flows. *Thin Solid Films*, 520(23), 6942-6946.
54. Ling, L., Tao, X., Zhongxiao, S., Chunliang, L., and Fei, M. (2016). Effect of sputtering pressure on surface roughness, oxygen vacancy and electrical properties of a-IGZO thin films. *Rare Metal Materials and Engineering*, 45(8), 1992-1996.
55. Yan, L., Xin, Q., Du, L., Zhang, J., Luo, Y., Wang, Q., and Song, A. (2016). High performance InGaZnO-based Schottky diodes fabricated at room temperature. *Physica Status Solidi (c)*, 13(7-9), 618-622.
56. Du, L., Li, H., Yan, L., Zhang, J., Xin, Q., Wang, Q., and Song, A. (2017). Effects of substrate and anode metal annealing on InGaZnO Schottky diodes. *Applied Physics Letters*, 110(1), 011602.
57. Yan, S., Wang, Y., Zhang, J., Xin, Q., and Song, A. (2021). High-Performance Thin-Film IGZO Schottky Diodes With Sputtered PdO<sub>x</sub> Anode. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 68(9), 4444-4449.
58. Choi, J. H., Hwang, S. M., Lee, C. M., Kim, J. C., Park, G. C., Joo, J., and Lim, J. H. (2011). Effect of Ga content and sintering time on electrical properties of InGaZnO thin film transistors fabricated by sol–gel process. *Journal of Crystal Growth*, 326(1), 175-178.
59. Suresh, A., Gollakota, P., Wellenius, P., Dhawan, A., and Muth, J. F. (2008). Transparent, high mobility InGaZnO thin films deposited by PLD. *Thin Solid Films*, 516(7), 1326-1329.
60. Chen, J., Wang, L., Su, X., Kong, L., Liu, G., and Zhang, X. (2010). InGaZnO semiconductor thin film fabricated using pulsed laser deposition. *Optics Express*, 18(2), 1398-1405.
61. Chen, X. F., He, G., Liu, M., Zhang, J. W., Deng, B., Wang, P. H., and Sun, Z. Q. (2014). Modulation of optical and electrical properties of sputtering-derived amorphous InGaZnO thin films by oxygen partial pressure. *Journal of Alloys And Compounds*, 615, 636-642.
62. Shi, J., Dong, C., Dai, W., Wu, J., Chen, Y., and Zhan, R. (2013). The influence of RF power on the electrical properties of sputtered amorphous In-Ga-Zn-O thin films and devices. *Journal of Semiconductors*, 34(8), 084003.

63. Li, L., Fan, L., Li, Y., Song, Z., Ma, F., and Liu, C. (2014). Effect of thermal annealing on the properties of transparent conductive In–Ga–Zn oxide thin films. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 32(2), 021506.
64. Xin, Q., Yan, L., Du, L., Zhang, J., Luo, Y., Wang, Q., and Song, A. (2016). Influence of sputtering conditions on room-temperature fabricated InGaZnO-based Schottky diodes. *Thin Solid Films*, 616, 569-572.
65. Lee, D. H., Nomura, K., Kamiya, T., and Hosono, H. (2011). Diffusion-Limited a-IGZO/Pt Schottky Junction Fabricated at 200°C on a Flexible Substrate. *IEEE Electron Device Letters*, 32(12), 1695-1697.
66. Chasin, A., Nag, M., Bhoelokam, A., Myny, K., Steudel, S., Schols, S., and Heremans, P. (2013). Gigahertz operation of a-IGZO Schottky diodes. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 60(10), 3407-3412.
67. Chasin, A., Volskiy, V., Libois, M., Myny, K., Nag, M., Rockele, M., and Heremans, P. (2014). An integrated a-IGZO UHF energy harvester for passive RFID tags. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 61(9), 3289-3295.
68. Zhang, J., Li, Y., Zhang, B., Wang, H., Xin, Q., and Song, A. (2015). Flexible indium–gallium–zinc–oxide Schottky diode operating beyond 2.45 GHz. *Nature Communications*, 6(1), 1-7.
69. Kim, Y. S., Lee, H. M., Lim, J. H., and Park, J. S. (2020). Impact of tandem IGZO/ZnON TFT with energy-band aligned structure. *Applied Physics Letters*, 117(14), 143505.
70. Zhang, H., Wang, Y., Wang, R., Zhang, X., and Liu, C. (2019). Optimizing the properties of InGaZnO<sub>x</sub> thin film transistors by adjusting the adsorbed degree of Cs<sup>+</sup> ions. *Materials*, 12(14), 2300.
71. Yıldız, S. (2020). *Bazı Oksit Ve III-V Yarıiletken Mikro ve Nano Yapıların Yüzey Fiziği Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 1-7.
72. Sze, S.M. and Ng, K.K. (2007). *Physics of Semiconductor Devices*. (Third Edition). USA: John Wiley and Sons, 7-740.
73. Çavaş, M. (2011). *Nano Yapılı Metal Oksit Yarıiletkenler Kullanılarak Foto Diyotların Üretilmesi*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2-15.
74. Dönmez, M. (2015). *V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> İnce Filmlerin Yapısal, Morfolojik ve Optiksel Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 8-13.

75. Cömert, B. (2015). *TiO<sub>2</sub> İnce Film Gaz Sensörlerinin Geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-9.
76. Sertel, T. (2020). *III-V Grubu Uzay Kalifiye Güneş Hücrelerinin Geliştirilmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 7-8.
77. Boylestad, R. and Nashelsky, L. (1998). *Electronic Devices and Circuit Theory*. (Seventh Edition). USA: Prentice-Hall, 3-42.
78. Şata, M. (2017). *GaTe Ve GaTe: Cd Yarıiletkenlerin Büyütülmesi, Yapısal ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi ve Schottky Diyod Uygulaması*, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 11-13.
79. Sertel, B. (2020). *Metal Katkılı TiO<sub>2</sub> İnce Filmlerin Geliştirilmesi Ve Sensör Uygulamaları*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-6.
80. Seeger, K. (2004). *Semiconductor Physics: An Introduction* (Ninth Edition). Germany: Springer-Verlag, 10-32.
81. Colinge, J.P. and Colinge, C.A. (2011). *Yarıiletken Devre Elemanları Fiziği* (Çev. S. Tüzemen ve S. Tekmen). Ankara: Nobel Akademik Yayınevi. (Eserin orijinali 2005’de yayımlandı), 15-88.
82. Çetin, S.Ş. (2010). *GaAsP/GaAs ve InGaN/GaN p-n Eklem Yapılarının Optik ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-25.
83. Mutlu, T. (2010). *Au/p-GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>/n-GaAs Yapılı p-n Eklem Diyotun Tavlanma Sıcaklıklarına Göre Elektriksel Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 9-10.
84. Haidar, M. (2019). *Sol-Gel İle Büyütülen ZnO İnce Filmlerine Soğuk Altlık Yöntemiyle Ag Buharlaştırılarak Diyot Üretimi Ve Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Rize, 13-15.
85. Yacobi, G. (2003). *Semiconductor materials, an introduction to basic principles*. (First edition). USA: Springer, 59-105.
86. Erol, A. ve Balkan, N. (2015). *Yarıiletkenler ve Optoelektronik Uygulamaları* (İkinci Baskı), Ankara: Seçkin Yayıncılık, 13-323.
87. Şevik, A. (2019). *İki Bileşenli ZnCdO Fotodiyotların Üretilmesi Ve Elektriksel Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırklareli, 14-30.
88. Asar, T. (2009). *GaInP ve InGaAs Kuantum Kuyulu Güneş Pillerinin (QWSC) Üretimi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-24.

89. Kurtuluş, G. (2014). *p-Si, GaAs ve Ge Alttaşlar Üzerine Al:ZnO Filmlerin Büyütülmesi; Yapısal, Optik Ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 17-19.
90. Korkmaz, B. (2019). *Pt Katkılı SnO<sub>2</sub> Nano yapılarının Büyütülmesi Ve Gaz Sensörü Geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 9-10.
91. Petti, L., Münzenrieder, N., Vogt, C., Faber, H., Büthe, L., Cantarella, G., and Tröster, G. (2016). Metal oxide semiconductor thin-film transistors for flexible electronics. *Applied Physics Reviews*, 3(2), 1-53.
92. Zhao, Z., Morel, D.L. and Ferekides, C.S. (2002). Electrical and optical properties of thin-doped CdO films deposited by atmospheric metalorganic chemical vapor deposition. *Thin Solid Films*, 413, 203-211.
93. Kwon, J. Y., Lee, D. J., and Kim, K. B. (2011). Transparent amorphous oxide semiconductor thin film transistor. *Electronic Materials Letters*, 7(1), 1-11.
94. Thomas, S. R., Pattanasattayavong, P., and Anthopoulos, T. D. (2013). Solution-processable metal oxide semiconductors for thin-film transistor applications. *Chemical Society Reviews*, 42(16), 6910-6923.
95. Hosono, H., Yasukawa, M., and Kawazoe, H. (1996). Novel oxide amorphous semiconductors: Transparent conducting amorphous oxides. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 203, 334-344.
96. Kawazoe, H., and Ueda, K. (1999). Transparent conducting oxides based on the spinel structure. *Journal of the American Ceramic Society*, 82(12), 3330-3336.
97. Tomita, T., Yamashita, K., Hayafuji, Y., and Adachi, H. (2005). The origin of n-type conductivity in undoped In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Applied Physics Letters*, 87(5), 051911.
98. Hong, D. (2009). *Fabrication and Characterization of Thin-film Transistor Materials and Devices*, Doctoral Thesis, Oregon State University Electrical and Computer Engineering Department, US, 4-7.
99. Song, I., Kim, S., Yin, H., Kim, C. J., Park, J., Kim, S., Choi, H.S., Lee, E., and Park, Y. (2008). Short channel characteristics of gallium–indium–zinc–oxide thin film transistors for three-dimensional stacking memory. *IEEE Electron Device Letters*, 29(6), 549-552.
100. Khan S.A. (2012). *Amorphous Metal-Oxide Based Thin Film Transistors on Metal Foils: Materials, Devices and Circuits Integration*, Doctoral Thesis, Lehigh University Electrical Department of Engineering, USA, 6-9.

101. İnternet: Atomic Scale Structure of Materials. URL: <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/atomic-scale-structure/intro.php>, Son Erişim Tarihi: 25.02.2021.
102. Behboud, A.B. (2021) *Development of Nanostructured Metallic Glasses with High Toughness*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen ve Uygulamalı Bilimler Enstitüsü, Ankara, 4-5.
103. Inoue, A., Takeuchi, A. (2011). Recent development and application products of bulk glassy alloys. *Acta Materialia*, 59(6), 2243-2267.
104. Schuh, C. A., Hufnagel, T. C., and Ramamurty, U. (2007). Mechanical behavior of amorphous alloys. *Acta Materialia*, 55(12), 4067-4109.
105. Hosono, H., Kikuchi, N., Ueda, N., and Kawazoe, H. (1996). Working hypothesis to explore novel wide band gap electrically conducting amorphous oxides and examples. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 198, 165-169.
106. Suresh A. (2019). *Amorphous Indium Gallium Zinc Oxide Thin-Film Transistors, Non-volatile Memory and Circuits for Transparent Electronics*, Doctoral Thesis, North Carolina State University Electrical Engineering, USA, 8-9.
107. Mori, H., Matsuno, H., and Sakata, H. (2000). Small Polaron hopping conduction in  $V_2O_5$ -Sb- $TeO_2$  Glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 276(1-3), 78-94.
108. Yasukawa, M., Hosono, H., Ueda, N., and Kawazoe, H. (1995). Preparation of Electroconductive and Transparent Thin Films of  $AgSbO_3$ . *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 103(1197), 455-459.
109. Hosono, H., Kikuchi, N., Ueda, N., Kawazoe, H., and Shimidzu, K. I. (1995). Amorphous transparent electroconductor  $2CdO \cdot GeO_2$ : Conversion of amorphous insulating cadmium germanate by ion implantation. *Applied physics letters*, 67(18), 2663-2665.
110. Hosono, H., Yamashita, Y., Ueda, N., Kawazoe, H., and Shimidzu, K. I. (1996). New amorphous semiconductor:  $2CdO \cdot PbO_x$ . *Applied Physics Letters*, 68(5), 661-663.
111. Hosono, H., Un'no, H., Ueda, N., Kawazoe, H., Matsunami, N., and Tanoue, H. (1995). Conversion of insulating thin films of  $MgIn_2O_4$  into transparent conductors by ion implantation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 106(1-4), 517-521.
112. Yasukawa, M., Hosono, H., Ueda, N., and Kawazoe, H. (1995). Novel transparent and electroconductive amorphous semiconductor: Amorphous  $AgSbO_3$  film. *Japanese Journal of Applied Physics*, 34(3A), L281.

113. Kamiya, T., Nomura, K., and Hosono, H. (2010). Present status of amorphous In-Ga-Zn-O thin-film transistors. *Science and Technology of Advanced Materials*, 11:4, 044305.
114. Sun, J., Mourey, D. A., Zhao, D., and Jackson, T. N. (2008). ZnO thin film, device, and circuit fabrication using low-temperature PECVD processes. *Journal of Electronic Materials*, 37(5), 755-759.
115. Yin, H., Kim, S., Lim, H., Min, Y., Kim, C. J., Song, I., and Park, Y. (2008). Program/erase characteristics of amorphous gallium indium zinc oxide nonvolatile memory. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 55(8), 2071-2077.
116. Lujan, R. A., and Street, R. A. (2012). Flexible X-ray detector array fabricated with oxide thin-film transistors. *IEEE Electron Device Letters*, 33(5), 688-690.
117. Shen, Y. C., Yang, C. H., Chen, S. W., Wu, S. H., Yang, T. L., and Huang, J. J. (2014). IGZO thin film transistor biosensors functionalized with ZnO nanorods and antibodies. *Biosensors and Bioelectronics*, 54, 306-310.
118. Lin, J. C., Huang, B. R., and Yang, Y. K. (2013). IGZO nanoparticle-modified silicon nanowires as extended-gate field-effect transistor pH sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 184, 27-32.
119. Sanctis S. (2020). *Multinary metal oxide semiconductors – A study of different material systems and their application in thin-film transistors*, Doctoral Thesis, Darmstadt Technical University Department of Chemistry, Germany, 12-13.
120. Troughton, J., and Atkinson, D. (2019). Amorphous InGaZnO and metal oxide semiconductor devices: An overview and current status. *Journal of Materials Chemistry C*, 7(40), 12388-12414.
121. Kamiya, T., and Hosono, H. (2010). Material characteristics and applications of transparent amorphous oxide semiconductors. *NPG Asia Materials*, 2(1), 15-22.
122. Kamiya, T., Nomura, K., and Hosono, H. (2009). Origins of High Mobility and Low Operation Voltage of Amorphous Oxide TFTs: Electronic Structure, Electron Transport, Defects and Doping. *Journal of Display Technology*, 5(7), 273-288.
123. Bilkan, Ç. (2016). *Polimer Arayüzey Tabakalı ve Tabakasız Schottky Engel Diyotlarının Elektriksel Karakteristiklerinin Karşılaştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 7-8.
124. Tanrikulu, H. (2017). *Au/TiO<sub>2</sub>/n-Si (MIS) Yapının Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-6.

125. Marıl, E. (2015). *Au/Ca<sub>3</sub>Co<sub>4</sub>Ga<sub>0,001</sub>O<sub>x</sub>/n-Si Yapılarda Doğru ve Ters Beslem Akım-Voltaj (I-V) Karakteristiklerinin 80-340 K Sıcaklık Aralığında İncelenmesi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 9-10.
126. Bilkın, Ç. (2013). *Perilensiz ve Perilenli Al/p-Si Schottky Engel Diyotlarının Elektriksel Özelliklerinin Oda Sıcaklığında Karşılaştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 7-8.
127. Ulusoy, M. (2021). *Au/(NiS:PVP)/n-Si (MPS) Yapısının Kapasitans-Voltaj (C-V) ve İletkenlik-Voltaj (G/w-V) Ölçümlerini Kullanarak Elektriksel Özelliklerinin Frekansa Bağlı İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 8-9.
128. Ölçer, H. (2022). *Farklı Sıcaklıklarda Termal Tavlamanın Mo/n-Si Schottky Diyotların Bazı Elektriksel Karakteristiklerine Etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 17-18.
129. Fener, Y. (2010). *Al/p-Si/Al Schottky Kontakların Yük Depolama Kapiliyeti*, Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Van, 8-9.
130. Aksu, P. (2010). *n-tipi GaAs Üzerinde Oluşturulan FeCrNiC Schottky Kapı Metallik Diyotların Elektriksel Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 7-8.
131. Yiğit, Ö. (2011). *Ni/n-GaP Schottky Diyodunun Kontak Parametrelerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 10-11.
132. Kırsoy, A. (2015). *GaAs Yarıiletkeni Üzerine İletken Polimer Katlanarak Oluşturulan Yapının Elektriksel ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 6-7.
133. Akgül, B. K. (2015). *Aynı Şartlar Altında Üretilen Özdeş Au/n-Si (100) Schottky Diyotlarda Karakteristik Parametrelerin Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 15-16.
134. Mahato, S., Puigdollers, J. (2018). Temperature dependent current-voltage characteristics of Au/n-Si Schottky barrier diodes and the effect of transition metal oxides as an interface layer. *Physica B: Condensed Matter*, 530, 327-335.
135. Kanbur, H. (2008). *Yalıtkan Tabakalı Al/p-Si Schottky Diyotlarda Elektriksel Karakteristiklerinin Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 23-24.
136. Özavcı, E. (2014). *Au/n-GaAs Schottky Diyotların Hazırlanması ve Akım-İletim Mekanizmalarının Geniş Bir Sıcaklık Aralığında İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 23-24.

137. Aydemir, U. (2014). *Au/PVA:Zn/n-Si (MPS) Yapılarının Hazırlanması ve Temel Elektriksel Özelliklerinin Işık Altında İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi, Ankara, 14-15.
138. Yükseltürk, E. (2016). *Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky Engle Diyotların Elektriksel ve Dielektrik Özelliklerinin Frekansa Sıcaklığa ve Aydınlanma Şiddetine Bağlı İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi, Ankara, 27-28.
139. Asımov, A. (2014). *Si Yarıiletkeni Üzerine İletken Polimer Kaplanarak Oluşturulmuş Schottky Diyotların Özelliklerinin İncelenmesi*, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi, Bursa, 17-18.
140. Altan, H. (2020). *n-tipi 6H-SiC Tabanlı Polimer Arayüzeyli Schottky Diyotlarının Üretilmesi ve Elektronik Parametrelerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi, Ankara, 20-21.
141. Jeon, J. H., Gong, T. K., Kong, Y. M., Lee, H. M., and Kim, D. (2015). Effect of post-deposition annealing on the structural, optical, and electrical properties of IGZO films. *Electronic Materials Letters*, 11, 481-484.
142. Nee, A.Y.C. (2014). *Handbook of manufacturing engineering and technology*. (First edition). UK: Springer London, 2930-2931.
143. Wasa, K., Kanno, I., and Kotera, H. (2012). *Handbook of sputter deposition technology: fundamentals and applications for functional thin films, nano-materials and MEMS* (Second Edition). USA: William Andrew, 1-631.
144. Liu, Y., Sun, B., Shu, Y., Zeng, X., Zhu, J., Yi, J., and He, J. (2020). Preparation of superior IGZO ceramics by two-step sintering for application in IGZO thin film fabrication. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 5331-5342.
145. Yuan, L., Fang, G., Zou, X., Huang, H., Zou, H., Han, X., and Zhao, X. (2009). Optical and electrical characterization of  $\alpha$ -InGaZnO thin film fabricated by pulsed laser deposition for thin film transistor applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42(21), 215301.
146. Chen, X. F., He, G., Lv, J. G., Liu, M., Wang, P. H., Chen, X. S., and Sun, Z. Q. (2015). Modification of band offsets of InGaZnO<sub>4</sub>/Si heterojunction through nitrogenation treatment. *Journal of Alloys and Compounds*, 647, 1035-1039.
147. Lu, R., Lu, J., Wei, X., Yue, S., Li, S., Lu, B., and Ye, Z. (2020). Two-step plasma treatment designed for high-performance flexible amorphous ZnAlSnO thin-film transistors replacing thermal annealing. *Advanced Electronic Materials*, 6(8), 2000233.
148. Xu, W., Xu, M., Jiang, J., Xu, S., and Feng, X. (2019). Impact of Sputtering Power on Amorphous In–Al–Zn–O Films and Thin Film Transistors Prepared by RF Magnetron Sputtering. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 66(5), 2219-2223.

149. Hsu, C. M., Tzou, W. C., Yang, C. F., and Liou, Y. J. (2015). Investigation of the high mobility IGZO thin films by using co-sputtering method. *Materials*, 8(5), 2769-2781.
150. İnternet: Wikipedia the Free Encyclopedia. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Moss%E2%80%93Burstein\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Moss%E2%80%93Burstein_effect), Son Erişim Tarihi: 25.05.2021.
151. Altındal, Ş., Sevgili, Ö., and Azizian-Kalandaragh, Y. (2019). The structural and electrical properties of the Au/n-Si (MS) diodes with nanocomposites interlayer (Ag-doped ZnO/PVP) by using the simple ultrasound-assisted method. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 66(7), 3103-3109.
152. Asar, T., Korkmaz, B., and Özçelik, S. (2016). Effect of platinum doping on the structural and electrical properties of SnO<sub>2</sub> thin films. *Journal of Experimental Nanoscience*, 11(16), 1285-1306.
153. Taşçıoğlu, İ., Altındal, Ş., Polat, İ., and Bacaksız, E. (2013). The effect of metal work function on the barrier height of metal/CdS/SnO<sub>2</sub>/In–Ga structures. *Current Applied Physics*, 13(7), 1306-1310.
154. Cheung, S. K., and Cheung, N. W. (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49(2), 85-87.
155. Norde, H. (1979). A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of applied physics*, 50(7), 5052-5053.
156. Brus, V. V., Kyaw, A. K. K., Maryanchuk, P. D., and Zhang, J. (2015). Quantifying interface states and bulk defects in high-efficiency solution-processed small-molecule solar cells by impedance and capacitance characteristics. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 23(11), 1526-1535.
157. Yakuphanoglu, F., Shah, M., and Aslam Farooq, W. (2011). Electrical and interfacial properties of p-Si/P3HT organic-on-inorganic junction barrier. *Acta Physica Polonica A*, 120(3), 558-562.





*Gazili olmak ayrıcalıktır*