

T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE HAZIRLANAN ÇİNKO OKSİT
İNCE FİLMLERİNE SOĞUK ALTLIK METODU İLE GÜMÜŞ
BUHARLAŞTIRILARAK DİYOT ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

MUHAMMET MANDO

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. VAGİF NEVRUZOĞLU
TEZ JÜRİLERİ
PROF. DR. MURAT TOMAKİN
DOÇ. DR. İSMAİL POLAT

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

RİZE-2019
Her Hakkı Saklıdır

T.C.

RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE HAZIRLANAN ÇİNKO OKSİT İNCE
FİLMLERİNE SOĞUK ALTLIK METODU İLE GÜMÜŞ
BUHARLAŞTIRILARAK DİYOT ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Doç. Dr. Vagif NEVRUZOĞLU danışmanlığında, Muhammet MANDO tarafından hazırlanan bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulu kararıyla oluşturulan jüri tarafından 05/07/2019 tarihinde Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS** tezi olarak Kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvanı Adı Soyadı

Başkan : Doç. Dr. Vagif NEVRUZOĞLU

Üye : Prof. Dr. Murat TOMAKİN

Üye : Doç. Dr. İsmail POLAT

İmzası

(Handwritten signatures of the jury members)

Doç. Dr. Ferhat KALAYCI
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

(Handwritten signature of Doç. Dr. Ferhat KALAYCI)

(Official stamp of Fen Bilimleri Enstitüsü, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi)

ÖNSÖZ

Elektrik-elektronik teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde elde edilen cihazların boyutlarında küçülmeler ve işlem hızlarında artışlar elde edilmektedir. Bu olumlu süreçlerin gelişmesinde hiç kuşkusuz nano teknoloji büyük pay sahibidir. Yarıiletken ince film uygulamaları elektronik devre elemanlarının üretimini önemli ölçüde kolaylaştırmış ve boyutlarını ciddi şekilde küçültmüştür.

Yarıiletken ince filmlerin elde edilmesinde yaygın olarak kullanılan ve verimli sonuçlar alınan yöntemler: rezistif buharlaştırma yöntemi, kimyasal püskürtme yöntemi, termal buharlaştırma yöntemi, elektron demeti buharlaştırma, sıçratma yöntemi ve moleküler demet epitaksi yöntemidir. Bu çalışmada kimyasal püskürtme yöntemi ve ince film üretim teknolojisinde yenilikçi teknoloji olarak adlandırılan soğuk altlık tekniği kullanıldı.

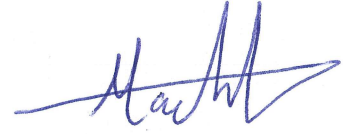
Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünde yapılan bu çalışmada kimyasal püskürtme yöntemi ile elde edilen ZnO ince filmlerin yüzeyine soğuk altlık yöntemiyle 300 K ve 200 K altlık sıcaklıklarında gümüş (Ag) buharlaştırıldı ve Ag/ZnO ikili yapılar elde edildi. Bu ikili yapılarda Schottky bariyerin oluşumunda termo ve fotouyarmalı difüzyon yöntemleri uygulandı. Elde edilen Schottky diyotlarının idealite faktörleri, bariyer yüksekliği, ters doyma akım değerleri incelendi ve bu diyotlardan elde edilen sonuçlar kıyaslandı.

Tezimin tamamlanması esnasında bilgi ve deneyimleriyle bana maddi ve manevi her konuda yardımcı olan ve beni her zaman destekleyen danışmanım sayın Doç. Dr. Vagif NEVRUZOĞLU'na, sayın Doç. Dr. Eyüp Fahri KESKENLER'e ve sayın Prof. Dr. Murat TOMAKİN'e çok teşekkür ediyorum. Ayrıca bana her konuda yardımcı olan, destek veren aileme, hocalarıma ve arkadaşlarımda çok teşekkür ediyorum.

Muhammet MANDO

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Tarafımdan hazırlanan “Püskürtme Yöntemi ile Hazırlanan Çinko Oksit İnce Filmlerine Soğuk Altık Metodu ile Gümüş Buharlaştırılarak Diyot Üretimi ve Karakterizasyonu” başlıklı bu tezin, Yükseköğretim Kurulu Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesindeki hususlara uygun olarak hazırladığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal işlemi kabul ettiğimi beyan ederim. 05/07/2019



Muhammet MANDO

Uyarı: Bu tezde kullanılan özgün ve/veya başka kaynaklardan sunulan içeriğin kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE HAZIRLANAN ÇİNKO OKSİT İNCE FİLMLERİNE SOĞUK ALTLIK METODU İLE GÜMÜŞ BUHARLAŞTIRILARAK DİYOT ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Muhammet MANDO

**Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi
Danışmanı: Doç. Dr. Vagif NEVRUZOĞLU**

Bu tez çalışmasında fotoelektronik teknolojilerinde yaygın olarak kullanılan ZnO ince filmler 325 °C altlık sıcaklığında kimyasal püskürtme yöntemi ile cam ve kalay oksit kaplı cam altlıklar üzerinde büyütüldü. Püskürtme hızını dakikada 5 ml değerinde tutarak film büyüme hızını dakikada 60 Å olarak ayarlandı. Böylece elde edilen ZnO filmlerin 30 dakika püskürtme süresinde kalınlıklarının yaklaşık 1,8-2,1 µm olması sağlandı. Daha sonra elde edilen ZnO filmler oda ortamında 350 °C, 375 °C ve 400 °C sıcaklıklarda 30 dakika süreyle tavlandı. İncelemeler dört farklı örnek üzerinde yapıldı. X ışını kırınımı desenleri tüm örneklerin hekzagonal kristal yapıda büyüdüğünü gösterdi. Ayrıca sıcak uç yöntemi ile üretilen örneklerin n tipi elektriksel geçirgenliğe sahip olduğu tespit edildi. Tavlanmamış ve farklı sıcaklıklarda tavlanmış örneklerin mikro çubuk biçiminde olduğu, sıcaklığın etkisiyle yapısal bir dönüşüme uğradığı SEM görüntülerinden tespit edildi. Örneklerin optik geçirgenlik spektrumlarından hesaplanan enerji bant aralıklarının (E_g) 3,03 eV-3,03 eV değerleri arasında değiştiği gözlemlendi. Yapılan fotoluminesans ölçümlerinden ZnO filmlerinin kristal yapısında var olan kusurlar tespit edildi. Bununla birlikte 375 °C tavlanan örneğin fotoemiyon spektrumlarının oranlarının kıyaslanmasından bu örneğin diğer örneklerle kıyasla daha kusursuz olduğu anlaşıldı. Çalışmanın ikinci aşamasında örnekler iki gruba ayrılarak yüzeylerinde 300 K ve 200 K altlık sıcaklıklarında Ag buharlaştırıldı ve Ag/ZnO/SnO₂ ikili yapılar elde edildi. Schottky diyotlarının oluşumu için birinci grup olarak adlandırılan 300 K altlık sıcaklıklarında üretilen ikili yapılara 400 °C sıcaklıkta 30 dakika termo difüzyon işlemi uygulanırken 200 K altlık sıcaklığında üretilen ikili yapılara UV ışınları altında 354 nm dalga boyunda 1 saat süre ile fotouyarmalı difüzyon işlemi uygulandı. Farklı teknolojik uygulamalarla oluşturulan bu Schottky diyotlarının idealite faktörleri, bariyer yüksekliği, ters doyma akım değerleri belirlendi ve elde edilen sonuçlar kıyaslandı.

2019, 78 sayfa

Anahtar Kelimeler: Kimyasal Püskürtme, Soğuk Altlık, Schottky Diyot.

ABSTRACT

DIODE PRODUCTION BY EVAPORATING SILVER WITH COLD SUBSTRATE METHOD ON ZINC OXIDE THIN FILMS GROWN VIA SPRAY-PYROLYSIS METHOD AND CHARACTERIZATION

Muhammet MANDO

**Recep Tayyip Erdogan University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Energy Systems Engineering
Master Thesis
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Vagif NEVRUZOĞLU**

In this thesis, ZnO thin films which commonly used in photoelectronic technologies were grown on SnO₂/glass substrates by chemical spraying method at 325 °C substrate temperature. The film growth rate was set to 60 Å per minute by keeping the spray rate at 5 ml/min. During 30 min spraying, the ZnO films were allowed to grow at thickness of about 1.8-2.1 µm. Then the obtained ZnO films were annealed in the room environment at 350 °C, 375 °C and 400 °C for 30 minutes. Measurement were made on four different samples. X-ray diffraction patterns showed that all samples grew in hexagonal crystal structure. In addition, it was determined that the samples produced by different annealing temperatures had n-type electrical permeability. It was determined from the SEM images that the samples which were annealed and not annealed at different temperatures were in mikrorod form and underwent a structural transformation under the effect of temperature. It was observed that the energy band gaps calculated from the optical transmission spectra of the samples varied between 3.03 eV-3.03 eV. From the photoluminescence measurements, defects in the crystal structure of ZnO films were detected. However, the comparison of the ratios of the photoemission spectra of the sample revealed that sample which annealed at 375 °C was more impeccable than the other samples. In the second step of the study, Samples were divided into two groups and Ag/ZnO/SnO₂ binary structures were obtained by evaporation of silver on ZnO surfaces at 300K and 200K substrate temperatures. For the formation of Schottky diodes, the first group of Ag/ZnO/SnO₂ dual structures which produced at 300 K substrate temperatures, were annealed for 30 minutes at 400 °C, the second group of binary structures which produced at 200 K put substrate temperature, has been excited with rays by putting it under Ultraviolet rays at 354 nm wavelength for 1 hour. Ideality factors, barrier height and saturation current of the produced Schottky diodes, were determined.

2019, 78 pages

Keywords: Chemical spraying, Cold Substrate Schottky Diode.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	I
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	II
ÖZET	III
ABSTRACT	IV
İÇİNDEKİLER	V
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
TABLolar DİZİNİ.....	X
SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	XI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür Özeti.....	2
1.3. Kuramsal Temeller	8
1.3.1. Yarıiletkenler	8
1.3.2. Saf (Katkısız) Germanyum ve Silisyumun Yapıları.....	12
1.3.2.1. P ve N Tipi Yarıiletken Malzemelerin Oluşturulması.....	14
1.3.2.2. N Tipi Yarıiletkenin Oluşumu	14
1.3.2.3. P Tipi Yarıiletkenin Oluşumu.....	15
1.3.3. P-N Ekleme	16
1.3.4. Schottky Diyot	17
1.3.4.1. İleri Besleme	19
1.3.4.2. Ters Besleme	20
1.3.5. İnce Film Büyütme Metodları	21
1.3.5.1. İnce Film Büyüme Sürecinde Gerçekleşen Aşamalar	23
1.3.5.2. Kimyasal Püskürtme Yöntemi	25
1.3.5.3. Fiziksel Buhar Biriktirme	26
1.3.5.3.1. Rezistif (Termal) Buharlaştırma	26
1.3.5.3.2. Soğuk Altık Yöntemi.....	29
1.4. Analiz Sistemleri	31
1.4.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	31
1.4.2. X-Işını Kırınımı (XRD)	32
1.4.3. Optik Spektrofotometre	36

1.4.4.	Fotoluminesans Spektroskopisi	37
1.4.5.	Van der Pauw Direnç Ölçme Yöntemi	39
1.5.	Kullanılan Malzemenin Özellikleri	41
1.5.1.	Çinko Oksit Özellikleri	41
1.5.1.1.	ZnO'ın Kristal Yapısı	41
1.5.1.2.	ZnO'ın Elektriksel Özellikleri	43
1.5.1.3.	ZnO'ın Lüminesans Özellikleri	43
1.5.2.	Ag Özellikleri	44
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	46
2.1.	Altlıkların Hazırlanması	46
2.2.	Püskürtme Metodu ile ZnO İnce Film Üretimi.....	46
2.3.	Ag Buharlaştırması	50
3.	BULGULAR.....	53
3.1.	ZnO Filmlerin XRD Analiz Sonuçları.....	53
3.2.	ZnO İnce Filmlerin SEM Sonuçları.....	57
3.3.	Optik Sonuçlar	59
3.4.	Fotoluminesans Ölçümleri.....	61
3.5.	ZnO'ın Özdirenç Ölçümleri.....	62
3.6.	Ag/ZnO/SnO ₂ Schottky Diyodun Elektriksel Karakterizasyonu.....	64
4.	TARTIŞMA ve SONUÇLAR.....	70
5.	ÖNERİLER.....	72
	KAYNAKLAR	73
	ÖZGEÇMİŞ	78

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.	Katılarda şematik enerji bantları.	8
Şekil 2.	Yarıiletken malzemelerin enerji bant diyagramının şematik görünümü (Bedir, 2015).	10
Şekil 3.	Değerlik bandındaki boşluklar için dağılım bağıntıları (Bedir, 2015).	11
Şekil 4.	a) Germanyum atomunun yapısı. b) Germanyum atomunun gösterilişi.	13
Şekil 5.	Silisyum atomunun gösterilişi.	13
Şekil 6.	N tipi yarıiletkenin oluşum modeli.	15
Şekil 7.	P tipi yarıiletkenin oluşum modeli.	16
Şekil 8.	P-N eklemnin şematik modeli.	16
Şekil 9.	P-N ekleminde akım taşıyıcıların oluşturduğu elektriksel alanın yönleri.	17
Şekil 10.	Schottky diyotun elektronik devrede görünümü.	17
Şekil 11.	Metal/N-tipi yarıiletken temasından önce enerji-band diyagramı.	18
Şekil 12.	Termodinamik denge durumunda metal/N tipi yarıiletkenin enerji bant diyagramının görünümü.	19
Şekil 13.	İleri besleme rejiminde Schottky diyotun şematik modeli.	19
Şekil 14.	Ters besleme rejiminde Schottky diyottun şematik modeli.	20
Şekil 15.	İleri ve ters besleme altında P-N eklemi ve Schottky diyodun I-V karakteristiği.	21
Şekil 16.	İnce film üretim teknikleri.	22
Şekil 17.	İnce film büyüme sürecinde çeşitli büyüme mekanizmalarının görünümü. ..	24
Şekil 18.	Kimyasal püskürtme sisteminin şematik gösterimi.	25
Şekil 19.	PVD teknikleri ile ince filmlerin büyüme aşamaları.	27
Şekil 20.	Vakum buharlaştırma düzeneğinin şematik modeli.	28
Şekil 21.	Soğuk altlık düzeneğinin şematik görünümü.	29
Şekil 22.	Taramalı elektron mikroskopunun temel yapısı.	32
Şekil 23.	X-ışını tüpünün şematik gösterimi.	34
Şekil 24.	X-ışını kırınımının oluşum modeli.	35
Şekil 25.	Çift ışın spektrometresinin şematik görünümü.	37
Şekil 26.	Tek ışınlı spektrofotometrenin şematik görünümü.	37
Şekil 27.	Floresans spektrometresinin düzeneğinin şematik gösterimi.	38
Şekil 28.	Van der Pauw yönteminde devre bağlantısının şematik görünümü.	39
Şekil 29.	R_A ve R_B karakterizasyonun belirlenmesinde kullanılan devre şeması.	40

Şekil 30. ZnO kristal yapılarının gösterimi: (a) kübik rocksalt , (b) kübik çinko blende ve (c) hekzagonal wurtzite. Gölge gri ve siyah küreler sırasıyla Zn ve O atomlarını belirtir.	42
Şekil 31. ZnO'nun wurtzite yapı modeli.	43
Şekil 32. ZnO kristalinin fotoluminesans spektrumu ve elektronik geçiş modeli.....	44
Şekil 33. Kaplama için hazır cam altlıklar.	46
Şekil 34. Ana çözeltiyi hazırlamak için kullanılan cihazlar a) elektronik terazi – b) manyetik karıştırıcı.	47
Şekil 35. Püskürtme işleminde kullanılan düzenek.	48
Şekil 36. Tavlama işlemini gerçekleştiren cihaz.	48
Şekil 37. Rigaku marka SmartLab X-ışını difraktometresi.	49
Şekil 38. JEOL marka JSM-6610 model taramalı elektron mikroskobu.....	49
Şekil 39. SpectraMax marka M5 model spektrofotometre cihazı.	50
Şekil 40. Buharlaştırma işleminde kullanılan düzenek.	51
Şekil 41. Schottky diyot oluşumunda kullanılan maske.....	51
Şekil 42. CAMAG marka ultraviyole cihazı.	52
Şekil 43. SnO ₂ kaplı cam yüzeyinde büyütülen ZnO ince filmin X-ışını kırınımı, a) Tavlammamış numune, b) 350 °C, c) 375 °C ve d) 400 °C sıcaklıklarında tavlanan numuneler.	54
Şekil 44. Üretilen ZnO ince filmin SEM görüntüsü, a) Tavlammamış numune, b) 350 °C, c) 375 °C ve d) 400 °C sıcaklıklarında tavlanan numuneler.	58
Şekil 45. ZnO ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları, a) Tavlammamış numune, b) 350 °C, c) 375 °C ve d) 400 °C sıcaklıklarda tavlanan numuneler.	59
Şekil 46. ZnO ince filmlerin soğurma spektrumları, a) Tavlammamış numune, b) 350 °C, c) 375 °C ve d) 400 °C sıcaklıklarında tavlanan numuneler.	60
Şekil 47. ZnO filmlerin fotoluminesans spektrumları, a) Tavlammamış numune, b) 350 °C , c) 375 °C ve d) 400 °C sıcaklıklarında tavlanan numuneler.	62
Şekil 48. Van der Pauw metodu ile direnç ölçümünün şematik görünümü.	62
Şekil 49. Ag/ZnO/SnO ₂ Schottky diyodun akım-gerilim ölçümünde kontrol eden ve sonuçları kaydeden bilgisayar görünümü.	64
Şekil 50. 200 K altlık sıcaklığında Ag buharlaştırarak üretilen ve fotouyarmalı difüzyon sürecine tabi tutulan Schottky diyotlarının (J-V) karakterizasyonu. a) Tavlammamış SnO ₂ /ZnO/Ag, b) 350 °C, c) 375 °C ve d) 400 °C sıcaklıklarında tavlanan SnO ₂ /ZnO/Ag.....	65
Şekil 51. 300 K altlık sıcaklığında Ag buharlaştırılarak üretilen ve 400 °C sıcaklıkta 30 dak. tavlanan Schottky diyotlarının (J-V) karakterizasyonu. a) Tavlammamış SnO ₂ /ZnO/Ag, b), 350 °C, c) 375 °C ve d) 400 °C sıcaklıklarında tavlanan SnO ₂ /ZnO/Ag.	65

- Şekil 52.** 200 K altlık sıcaklığında üretilen Schottky diyotun (lnI-V) grafiği. a) Tavlanmamış $\text{SnO}_2/\text{ZnO}/\text{Ag}$, b) 350 °C, c) 375 °C ve d) 400 °C sıcaklıklarında tavlanan $\text{SnO}_2/\text{ZnO}/\text{Ag}$ 67
- Şekil 53.** 300 K altlık sıcaklığında üretilen Schottky diyotun (lnI-V) grafiği. a) Tavlanmamış $\text{SnO}_2/\text{ZnO}/\text{Ag}$, b) 350 °C, c) 375 °C ve d) 400 °C sıcaklıklarında tavlanan $\text{SnO}_2/\text{ZnO}/\text{Ag}$ 68



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. ZnO'nun bazı fiziksel özellikleri.	41
Tablo 2. Gümüşün bazı fiziksel özellikleri.	45
Tablo 3. SnO ₂ /ZnO ince filmin yapısal analizinden hesaplanan parametreler.	56
Tablo 4. SEM görüntülerinden hesaplanan ZnO filmlerin ortalama kalınlıkları.	59
Tablo 5. ZnO filmlerin direnç ve öz direnç değerleri.	63
Tablo 6. 200 K altlık sıcaklıklarında üretilen Schottky diyotların elektriksel parametreleri.	69
Tablo 7. 300 K altlık sıcaklıklarında üretilen Schottky diyotların elektriksel parametreleri.	69

SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ

ZnO	Çinko Oksit
Ag	Gümüş
ϕ_m	Metal İş Fonksiyonu
ϕ_s	Yarıiletken İş Fonksiyonu
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme
XRD	X-Işın Kırınım
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
UV	Morötesi Işınları
IR	Kızılötesi Işınları
ITO	İndiyum Oksit
D	Kristal Boyutu
λ	Dalga Boyu
θ	Bragg Açısı
δ	Dislokasyon Yoğunluğu
Eg	Enerji Bant Aralığı
T	Optik Geçirgenlik
A	Optik Soğurma
α	Soğurma Katsayısı
R	Direnç
ρ	Özdirenç
J	Akım Yoğunluğu
K	Boltzmann Sabiti
q	Elektron Yüğü
R_s	Seri Direnç
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
SnO ₂	Kalay Oksit
ZnO	Çinko Oksit

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Günümüzde teknolojinin hızla gelişiminde yarıiletkenler üzerine yapılan çalışmaların katkısı yadsınamayacak kadar çok fazladır. Yarıiletken ince filmler teknolojik gelişmelerle aynı doğrultuda ilerlemektedir. İnce filmler 1950'li yıllardan günümüze çeşitli yöntemler denenerek hazırlanmaktadır. Tanım olarak ince filmler, farklı üretim teknikleri kullanılarak kaplanacak malzemenin atomlarının ya da moleküllerinin, bir taban üzerine ince bir tabaka halinde oluşturulan ve kalınlıkları tipik olarak 1 μm civarında olan yarıiletken malzemelerdir.

Yarıiletken teknolojisinde gelişmeler sayesinde elde edilen cihazların boyutlarında küçülmeler ve işlem hızlarında artışlar elde edilmektedir. Elektronik teknolojilerinin gelişmesinde hiç kuşkusuz nano teknoloji büyük pay sahibidir. Yarıiletken ince film uygulamaları elektronik devre elemanlarının üretimini önemli ölçüde kolaylaştırmış ve boyutlarını ciddi şekilde küçültmüştür. Yarıiletken aygıtların üretimi nano teknoloji ve kuantum fiziği uygulamaları sayesinde ekonomik olarak gerçekleştirilebilmektedir.

Yarıiletken ince filmlerin elde edilmesinde yaygın olarak kullanılan ve verimli sonuçlar alınan yöntemler: kimyasal püskürtme yöntemi, termal buharlaştırma yöntemi, elektron demeti buharlaştırma, sıçratma yöntemi ve moleküler demet epitaksi yöntemidir. Bu çalışmada ise bu yöntemler içerisinde kimyasal püskürtme yöntemi ve ince film üretim teknolojisinde yenilikçi teknoloji olarak adlandırılan soğuk atlık tekniği kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında ZnO ince filmler 325 °C altlık sıcaklığında kimyasal püskürtme yöntemi ile cam ve SnO₂ kaplı cam altlıklar üzerinde büyütüldü. X-ışını kırınımı desenleri tüm örneklerin hekzagonal kristal yapıda c eksenine boyunca altlığa dik olarak büyüdüğünü gösterdi. Tavlama ve farklı sıcaklıklarda tavlama örneklerinin tane boyutlarında ve enerji bant aralıklarını 3,08 eV-3,25 eV değerleri arasında değiştiği gözlemlendi. Yapılan fotoluminesans ölçümlerinden ZnO filmlerinin kristal yapısında var olan kusurlar tespit edildi. Çalışmanın ikinci aşamasında örnekleri iki gruba ayırarak yüzeylerinde 300 K ve

200 K altlık sıcaklıklarında Ag buharlaştırıldı ve Ag/ZnO ikili yapılar elde edildi. Schottky diyotlarının oluşumu için birinci grup olarak adlandırılan 300 K altlık sıcaklıklarında üretilen ikili yapılara 400 °C sıcaklıkta 30 dakika termo diffüzyon işlemi uygulanırken 200 K altlık sıcaklığında üretilen ikili yapılara UV ışınları altında 1 saat süre ile fotouyarmalı difüzyon işlemi uygulandı. Farklı teknolojik uygulamalarla oluşturulan bu Schottky diyotlarının idealite faktörleri, bariyer yüksekliği, ters doyma akım değerleri belirlendi.

1.2. Literatür Özeti

Haider (2019), yaptığı çalışmada, Sol-gel kaplama tekniği kullanılarak SnO₂ altlıklar üzerine büyütülen ZnO ince film yüzeyine, soğuk altlık yöntemiyle 300 K ve 200 K altlık sıcaklıklarında Ag buharlaştırılarak Ag/ZnO Schottky diyotları üretilmiştir. 200 K altlık sıcaklığında ZnO üzerine buharlaştırılan Ag kontağının 300 K sıcaklığındakilere göre daha küçük tane boyutlarına sahip olduğu görülmüştür. Bununla birlikte 200 K sıcaklıklı altlık üzerine oluşturulan Ag film tabakası diğerine göre daha pürüzsüz ve gözeneksiz bir yapıya sahiptir.

Singh ve Park (2016), yaptıkları çalışmada, yoğun ZnO nanoçubuk filmleri, hidrotermal yöntemle ITO altlık üzerinde biriktirilmiştir. ZnO nanoçubuk filmlerin yapısal ve morfolojik özellikleri SEM, XRD ve AFM cihazlar ile incelenmiştir. XRD taramasında, ITO altlık üzerine normal c eksenine yönelimli ZnO nanoçubuk filmlerin varlığını gösteren yüksek şiddetli (002) pik elde edilmiştir. Ag/ZnO Schottky diyot bazlı, UV sensörü de üretilmiştir. 0 V ile +1 V arasında değişen voltaj aralığında karanlık ve UV ışık altında örneklerin (I-V) karakteristikleri incelenmiştir. UV fotodetektörlerin doğrusal olmayan (I-V) özelliği, Ag ve ZnO birleşimleri arasındaki Schottky temaslarını doğrulamıştır. +1 V voltaj altında üretilen UV fotodetektörlerin fotoakım ve karanlık akım kontrast oranı, yaklaşık 1,67'dir. Bu nedenle, ZnO nanoçubuk filmler UV algılama cihazlarındaki uygulamalar için olanaklara sahip olduğu belirlenmiştir.

Küçükömeroğlu vd. (2018), yaptıkları çalışmada, SnO₂ kaplı cam altlıklar üzerinde ZnO nanoçubuklu yapı kimyasal püskürtme yöntemi ile üretilmiştir. SEM ve XRD sonuçlarından ZnO nanoçubukları, hekzagonal bir kristal yapıya ve sıkıştırılan çubuk

morfolojisine sahip olduğu belirlenmiştir. Fotoluminesans sonuçları UV bölgesine tekabül eden belirgin bir emisyon tepe noktası göstermiştir. I-V ölçümleriyle sıcaklığın bir fonksiyonu olarak karakterize edilen Ag/ZnO nanoçubukları/SnO₂/In-Ga Schottky diyotunda açıkça doğrultucu davranışı sergilemiştir. İdealite faktörü ve sıfır besleme durumunda bariyer yüksekliği değerlerinin sıcaklığa bağlı olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmaların sonuçları ile tutarlı olan ϕ_{B0} ve A^{**} değerleri için 0,88 eV ve $2,75 \times 10^{-5} \text{ A m}^{-2} \text{ K}^{-2}$ değerleri elde edilmiştir.

Keskenler vd. (2012), yaptıkları çalışmada, P-Si altlık üzerinde, polikristalin ZnO ince filmi, Sol-gel metodu ile üretilerek eklem diyot elde edilmiştir. Üretilen film, altlığa dik bir güçlü (002) doğrultuda altıgen wurtzite yapı sergiledi. Ek olarak, $2\theta = 61,20^\circ$ de bulunan düşük şiddetli (103) pik XRD düzeninde gözlenmiştir. ZnO 'nun tane boyutu 31,4 nm olarak bulunmuş. Numunenin c ve a örgü sabitleri sırasıyla 5,306 Å ve 3,353 Å dur. Cam altlık üzerindeki ZnO filmin yasak bant aralığı 3,27 eV olarak bulundu. Diyot bariyer yüksekliği ve idealite faktörü değerleri sırasıyla 2,03 eV ve 0,71 eV olarak bulundu. $dV/d(\ln I)$ 'den I ve $H(I)$ eğrilerine karşı seri direnç değerleri sırasıyla 42,1 Ω ve 198,3 Ω olarak bulundu. Ag/N-ZnO/p-Si/Al heterogeçit diyotun idealite faktörü birlikten daha büyüktür, yani akım için termiyonik emisyonun tek iletken mekanizma olmadığını gösterir.

Polyakov vd. (2003), yaptıkları çalışmada, hazır (001) ZnO altlık üzerinde Au ile üretilen Schottky diyot 10^{17} cm^{-3} elektron konsantrasyona sahip olduğu görülmüştür. HCl ve HNO₃'deki ilave dağlama, ileri I-V eğrisinin idealite faktöründe ve C-V karakteristiklerinde ciddi avantajlar sağlamadan ters akımı önemli ölçüde arttırmıştır. C-V ölçümlerinden elde edilen Au Schottky diyotların Schottky bariyer yüksekliği 0,65 eV'ye yakındır. Ag Schottky diyotlar için bariyer yüksekliği (0,69 eV) biraz daha yüksektir. N-ZnO üzerindeki benzer şekilde hazırlanmış Au ve Ag Schottky diyotlar için idealite faktörü, doyma akımı ve ters akım değerleri birbirine oldukça yakındır. İdealite faktörü, kullanılan yüzey hazırlama metodu ne olursa olsun 2'ye yakındı. Hem Au hem de Ag Schottky diyotların termal stabilitesi düşük olduğu görülmüştür. Diyotların özellikleri vakumda düşük sıcaklıklara kadar ısıtıldıktan sonra ciddi bir şekilde değiştiği görülmüştür. Ag diyotları için mekanizma, Ag ve Zn arasındaki temasın kısmen kesilmesini içerir ve bu da diyotun çok daha düşük etkili bir alanı ile sonuçlanır. Au

Schottky diyotlarda, taşıyıcı konsantrasyonunun azalması gözlemlenmiştir. Mekanik parlatma, aktivasyon enerjileri 0,55 ve 0,65 eV olan yoğun tuzak konsantrasyonunun büyük oranda artmasıyla yüksek dirençli hasarlı bir tabaka ortaya çıkarır. Bu hasarlı tabakanın etkilerini gidermek için konsantre HNO_3 içinde en az 9 dakika aşındırma gerekir.

2017 yılında Yaseen Hasan Kadhim ve Nihad Abdul Ameer tarafından yapılan çalışmada, cam altlıklar üzerine ZnO nanopartiküllerini sol-gel yöntemi ile ve gümüş nanopartikülleri lazer ablasyonu ile biriktirilmiştir. Hazırlanan filmleri karakterize etmek için UV, SEM ve XRD analizleri kullanılmıştır. Ortalama ZnO tanecik boyutunun 13.8 nm ve Ag tanecik boyutunun 12.4 nm olduğu tespit edilmiştir. (Kadhim ve Ameer, 2017).

Zhang vd. (2012), yaptıkları çalışmada, darbeli lazer biriktirme metodu ile Flor katkılı SnO_2 cam alt tabakaları üzerinde N-tipi ZnO yüksek kaliteli ince filmin yarı iletken tabakası imal edilmiştir. Ag/ZnO/FTO konfigürasyonlu Schottky diyotları, cihazların elektriksel özelliklerini akım-voltaj (I-V) ve kapasitans-voltaj (C-V) ölçümlerini incelemek için üretilmiştir. Sonuçlar, cihazların I-V özelliklerine göre 1,64 idealite faktörü ve Schottky bariyer yüksekliği 0,85 eV olan iyi doğrultma davranışlarına sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, I-V özelliklerini değerlendirmek ve Schottky temasının seri direncini elde etmek için Cheung'in işlevleri ve Norde'nin yöntemi kullanılmıştır. C-V ölçümlerinden, kapasitansın, frekansların azalması ile artacağı tespit edilmiştir. C-V ölçümleri, I-V ölçümlerinden elde edilenlerden daha yüksek bariyer yükseklikleri ile sonuçlanmıştır. I-V ve C-V ölçümlerinden elde edilen Schottky bariyer yükseklikleri arasındaki fark bariyerin homojen olmaması, arayüz katmanı, tuzak durumları ve seri dirençle açıklanmıştır.

Zhang vd. (2013), yaptıkları çalışmada, darbeli lazer biriktirme metodu ile polyimide altlıklar üzerinde esnek Ag/ZnO Schottky diyotlar üretilmiştir. ZnO filminin yapısal ve optik özellikleri, X-ışını difraktometrisi ve spektrofotometre ile incelenmiştir. Bükülebilir ve bükülmeyen esnek Schottky diyotların akım-gerilim (I-V) ölçümleri oda sıcaklığında yapılmıştır. Sonuçlar, cihazların I/V özelliklerine göre idealite faktörü 2,8 ve Schottky bariyer yüksekliği 0,54 eV olan iyi doğrultma davranışlarına sahip olduğunu göstermektedir. İleri besleme durumunda, yeterince yüksek gerilimlerde, akım-gerilim

ölçümlerinin, seri direncin etkisini gösterdiği görülmüştür. Elde edilen idealite faktörü, seri direnç ve bariyer yüksekliği değerleri, Cheung ve Norde yöntemlerinin karşı değerleri ile karşılaştırılmış ve birbirleriyle yakın olduğu görülmüştür. Sonuçlarda, cihazların elektriksel performansının, bükülme durumunda bile önemli bir değişiklik göstermediği görülmüştür. Bundan dolayı, gelecekte Ag/ZnO Schottky diyotların esnek elektronik cihazlarda potansiyel uygulamalara sahip olacağı düşünülmektedir.

Ghusoon vd. (2015), yaptıkları çalışmada, çinko oksit (ZnO) ve Ag katkılı ZnO (SZO) (Metal-Yarıiletken-Metal-(MSM)) bazlı ultraviyole'nin (UV) fotodetektörlerinin üretim ve performans analizini sunar. Filmler P-tipi silisyum (Si) (100) altlıklar üzerine sol-gel tekniği ile üretilmiştir. Üretilen cihazlar için Schottky teması olarak Ag elektrotları kullanılmıştır. Üretilen filmler için yapısal, optik ve elektriksel özellikler incelenmiş ve Ag katkı maddelerinin etkilerini göstermek için analiz edilmiştir. SZO filminde soğurma katsayısı artmıştır, bunun sonucunda kuantum verimliliği de artmıştır. SZO filmindeki Ag katkı maddeleri topaklanmış ve ZnO filmi boyunca homojen olmayan dağılım gösteren kümeler oluşturmuştur. Bariyer yüksekliğinin artması nedeniyle katkılı filme dayalı cihazın doyma akımı azalmıştır. Ag katkılı ZnO'ya dayanan cihaz için geliştirilmiş bariyer yüksekliği, kuantum verimliliğinin yanı sıra duyarlılığı da arttırmıştır.

Tomakin vd. (2011), yaptıkları çalışmada, SnO₂ ile kaplanmış cam altlıkları üzerine, düşük altlık sıcaklıklarda vakum ortamında CdS'yı buharlaştırmıştır. X-ışını kırınımı analizi, filmlerin (002) düzleminin yönünde hekzagonal yapı ile yoğun büyüme gerçekleştirildiğini göstermiştir. 200 K'da, CdS ince filmlerinin üst yüzeyine, vakum buharlaştırma yöntemi ile Cu temaları dairesel şekilde oluşturulmuştur. 100–300 K sıcaklık aralığında, düşük altlık sıcaklığının (Cu/CdS/SnO₂) yapısının I–V özellikleri üzerine, etkileri incelenmiştir. Cu/CdS (300 K'de)/SnO₂ yapısı üssel akım-voltaj değişimlerini göstermiştir. Bununla birlikte, Cu/CdS (200 K'de)/SnO₂ yapısının I–V karakteristikleri, yüksek seri direnç nedeniyle üssel davranıştan saptığı görülmüştür. Diyotlar, 1'den daha büyük bir idealite faktörü ile ideal olmayan I-V davranışını gösterir. Sonuçlar, tüm sıcaklık aralığında Cu/CdS (200 K ve 300 K/SnO₂) yapısındaki mevcut taşıma mekanizmasının tünelleme yoluyla gerçekleştirildiğini göstermiştir.

Uslu vd. (2011), yaptıkları çalışmada, buharlaşma metodu ile biriktirilen CdS filmlerin yapısal ve optik özelliklerini incelemiştir. X-ışını kırınımı analizinde, CdS filmleri hekzagonal yapı ile (111) düzlemin yönünde güçlü pikler göstermiştir. Bu çalışma, termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak SnO₂ ile kaplanmış cam altlık üzerine oluşan Cu/n-CdS ince filmlerin davranışı incelemek için yapılmıştır. 130-325 K sıcaklık aralığında ve ileri besleme durumunda, Cu/CdS/SnO₂/In-Ga yapılarının I-V karakteristikleri incelenmiştir. Yarı-logaritmik lnI-V karakteristikleri, sıcaklık artmasıyla idealite faktöründe azalmasını ve bariyer yüksekliğinin artmasını göstermiştir. İdealite faktörü ve bariyer yüksekliği değerleri sırasıyla 8,98 ve 0,29 eV'den (130 K'da) 3,42 ve 0,72 eV'ye (325 K) değişmektedir. $\ln(I_0/T^2)$ ve (q/kT) 'nin geleneksel Richardson grafiği, doğrusal olmayan davranışlar gösterir. İleri besleme durumunda akım (I), $I_0(T)\exp(AV)$ ile orantılı olarak bulunmuştur ve $I_0(T)$ nispeten zayıf bir sıcaklık işlevi olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, tüm sıcaklık aralığında SnO₂/CdS/Cu yapısındaki yük taşıma mekanizmasının, ara yüzey durumları/tuzakları arasında tünelleme yaparak gerçekleştirildiğini göstermektedir. Ek olarak, her sıcaklık seviyesi için Ohm kanunu kullanılarak ileri ve geri besleme durumunda, I-V karakteristiklerinden gerilime bağlı direnç değerleri elde edilmiştir.

Guo vd. (2015), yaptıkları çalışmada, tavlama sıcaklığının cihazın özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için, 1 mm çap alanlı Schottky diyotlar, Ge altlığın yüzüne 50 nm kalınlığında bir Pt filmi püskürtülerek üretilmiştir. Pt nano filmleri ve Ge altlığı arasındaki ikili bileşik faz değişimi ve 573 K ve 673 K sıcaklıklarda PtGe arayüz katmanı oluşmuştur. Ancak 773 K'de Pt₂Ge₃ ortaya çıkmıştır. Pt/n-Ge Schottky diyotların I-V karakteristikleri 183-303 K sıcaklık aralığında ölçülmüştür. I-V verilerinin değerlendirilmesi, sıcaklık artması ile sıfır besleme durumunda bariyer yüksekliği artmasını ve idealite faktörü azalmasını ortaya koymuştur. Üretilen Schottky diyotların elektronik taşıma özelliklerinin değişmesi, tavlama işlemi sırasında yüzeyler arası reaksiyon ve faz dönüşümünün birleşik etkilerine atfedildiği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, Schottky diyotlarda metal/Ge arayüzünde bariyer yüksekliğinin kontrolü ve ölçümü, yüksek performanslı Ge tabanlı CMOS cihazlarının gerçekleştirilmesi için önemlidir.

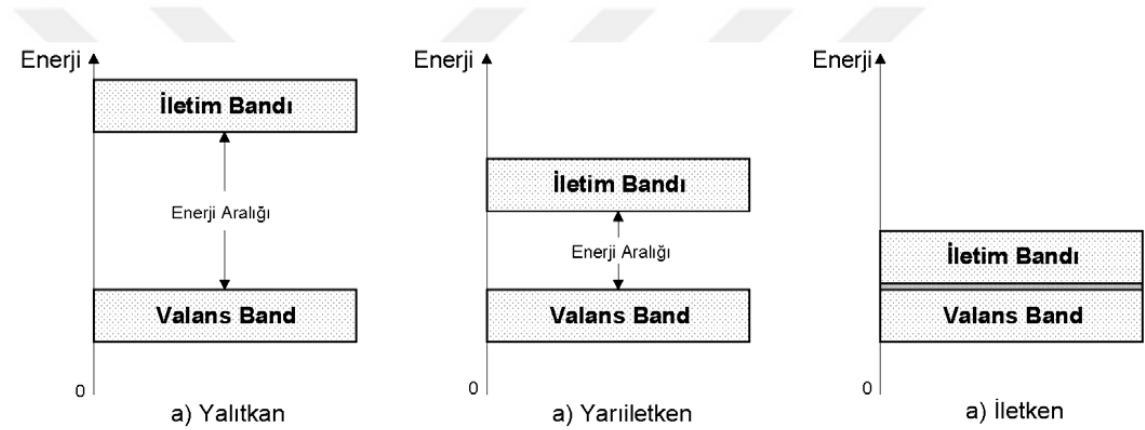
Khelil vd. (2007), yaptıkları çalışmada, Al veya Sn katkılı ZnO filmleri, sulu çözeltiler kullanılarak püskürtme yöntemi ile biriktirilmiştir. Filmler ya indiyum kalay oksit ile kaplanmış ya da direkt cam altlık üzerine biriktirilmiştir. Ana tuz olarak ZnCl_2 , AlCl_3 ve SnCl_2 kullanılmış. ZnCl_2 molar konsantrasyonunun (0,1-0,3 M) ve katkılama oranının (%2-4 AlCl_3 veya SnCl_2) etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmanın temel amacı, püskürtme sırasında altlık düşük sıcaklıkları (200-300 °C) tutarak gözenekli ZnO ince filmleri büyütmek olduğu görülmüştür. X-ışını kırınım analizinde, saf cam altlık üzerine biriktirilen filmlerin sadece kısmen kristalleştiği gösterilmiş ancak ITO ile kaplanan cam üzerine biriktirilenlerin daha iyi kristalleşme olduğu görülmüştür. Kullanılan tuz molar konsantrasyonu arttığında filmlerin homojenliği azalmış, Al ile katkılama arttığında tane büyüklüğü ve gözeneklilik azalmıştır. 400 °C'de 4 saat süre ile yapılan tavlama işleminden sonra, filmlerin uzamaya karşı direnci oldukça yüksektir. Bu sonuç, tanecikler sınır etkisi ve filmlerin gözenekliliği ile ilişkilendirilir. Etkili olarak, tavlama numunelerde IR bölgesinde önemli bir yansımanın varlığı, ZnO kristalitlerinde yüksek serbest taşıyıcı yoğunluğunun olduğunu göstermiştir. Son olarak, aynı elektrokimyasal koşullarda biriktirildiğinde, pürüzlü ZnO filimlerde geçirgenlik, pürüzsüz ZnO filimlerdeki olan geçirgenlikten daha küçük olduğu görülmüştür.

Chen vd. (2012), tarafından yapılan çalışmada, tavlama sıcaklığının, Si altlık üzerine sol-gel metodu ile büyütülen ZnO ince filmlerin özelliklerinin üzerine etkisi incelenmiştir. Ön çözeltili UV-görünür geçirgenliği jelleşme süresinin artmasıyla azalmış ve 20 gün yaşlanma süresinin ardından büyük ölçüde azalmıştır. 550 °C, 650 °C ve 750 °C'de tavlama filmlerin yüzeyinde ZnO kristallerin granül şekli gözlenmiş ve tavlama sıcaklığının artmasıyla kristallerin boyutlarının arttığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, tavlama sıcaklığının 850 °C'ye ve üstüne yükselmesi üzerine nodüler kristalit şekli oluşmuştur. Farklı sıcaklıklarda tavlama ZnO ince filmlerle üretilen Schottky diyotların I-V özellikleri ölçülmüş ve analiz edilmiştir. 750 °C tavlama sıcaklığına kadar ZnO filmlerinin Schottky diyot özelliklerini gösterdiği bulunmuştur. Tavlama sıcaklığı 850 °C'nin üstüne çıkarıldığında Schottky diyot karakteristiklerinin azaldığı görülmüştür. XPS analizi, stokiyometrik çevrede oksitlenmiş halde oksijen atomunun bulunmamasının, 850 °C'nin üzerine tavlama Schottky diyodunun azalan ileri besleme akımından sorumlu olabileceğini öne sürmüştür.

1.3. Kuramsal Temeller

1.3.1. Yarıiletkenler

Katılar atomlarının dizilişlerine göre amorf yapı ve kristal yapı olmak üzere iki grupta toplanırlar. Bazı katıların atomları gelişigüzel dizilmiş olup, belirli bir düzene sahip değildirler. Bunlara amorf katılar denir ve oluşturdukları yapıya da amorf yapı adı verilir. Bazı katılarda ise, katıyı oluşturan atom, atom grupları ve moleküller, o katıya özgü belirli bir düzen içinde bir araya gelirler. Bu katılara da kristal denir ve oluşturdukları yapıya da kristal yapı adı verilir.



Şekil 1. Katılarda şematik enerji bantları.

Katılar elektriksel ve optik özelliklerine göre de, yalıtkanlar, yarıiletkenler ve iletkenler olmak üzere üç grupta toplanırlar. Katıların enerji-bant teorisine göre, valans bandı tamamen dolu ve iletim bandı tamamen boş olan katılara yalıtkanlar adı verilir (Şekil 1). Yalıtkanlarda bu iki bant arasındaki yasak enerji aralığının geniş olması nedeniyle, oda sıcaklığında elektronların valans bandından iletim bandına geçmeleri olanaksızdır. Valans ve iletim bantları üst üste binen katılara ise iletkenler adı verilir. Tüm metaller bu gruba girerler. Valans ve iletim bantları arasındaki yasak enerji aralığı yalıtkanlarda olduğu kadar geniş olmayan katılara da yarıiletkenler adı verilir. Yarıiletkenler, çok çeşitli uygulama alanlarına sahiptirler. Yarıiletkenlerin belirgin özelliklerinden biri $T = 0 \text{ K}$ 'de yalıtkan olmalarıdır. Yasak enerji aralıkları öyle bir değere sahiptir ki, ısıtılmayla erime noktalarının altındaki sıcaklıklarda elektriksel iletkenlik gösterirler.

Yarıiletkenlerde sıcaklık arttıkça valans bandındaki elektronlar iletim bandına ısı olarak uyarılacaklardır. Sonuçta, iletim bandındaki elektronlar ile valans bandındaki elektronlar tarafından geride bırakılan yüklü boşluklar iletkenliğe katkıda bulunacaklardır.

Yarıiletkenlerin en belirgin özelliği, sıcaklık ve yabancı madde yoğunluğu arttıkça elektriksel öz direncinin azalmasıdır. Bu özellik, iletkenlerdeki durumun tamamen tersidir. İletkenlik yarıiletkenlerde sıcaklık arttıkça artmasına rağmen, iletkenlerde sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Bu durum yarıiletkenleri iletkenlerden ayıran en önemli özelliktir.

Yarıiletken, iletkenlik düzeyi, bir yalıtkan ile bakır gibi yüksek iletkenliğe sahip bir iletkenin sınırları arasında kalan malzeme demektir. Bir maddenin yük akışına veya akıma karşı gösterdiği direnç, iletkenliğiyle ters orantılıdır. Katı malzemelerin direnç düzeyleri karşılaştırılırken sık sık öz direnç (ρ) terimi kullanılır. Bir maddenin öz direnci, 1 cm uzunluğa ve 1 cm² kesite sahip malzeme örneğinin direnci göz önüne alınarak incelenebilir. Başka bir deyişle, 1 cm³'lük numunenin direnci öz direnç tarafından belirlenir.

$$R = \rho \frac{L}{A} \Rightarrow \rho = R \frac{A}{L} \Rightarrow \Omega \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}} \Rightarrow \Omega\text{-cm} \quad (1)$$

Yukarıdaki ifadeye göre, bir malzemenin öz direnci ne kadar büyükse direnci de o ölçüde büyüktür. Burada L malzemenin uzunluğunu, A ise kesitini temsil eder. ρ 'nun birimi $\Omega\text{-cm}$ cinsinden ifade edilir (Gölcür, 2012).

Enerjinin bir maksimumuna veya minimumuna yakın durumlar ile ilgilenildiği için dağılım eğrisi $\varepsilon(k)$ iyi bir yaklaşıklıkla parabolik olarak alınabilir ve iletim bandı için;

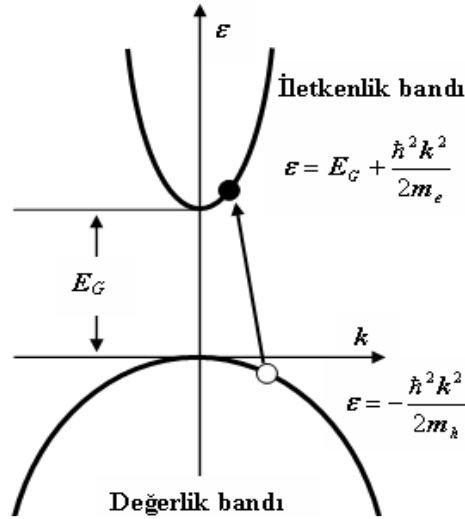
$$\varepsilon = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e} \quad (2)$$

değerlik bandı için;

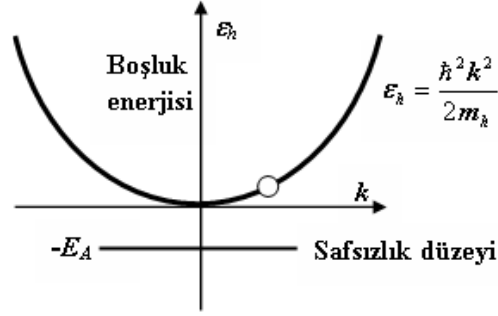
$$\mathcal{E} = -\frac{\hbar^2 k^2}{2m_h} \quad (3)$$

yazılabilir.

Burada, değerlik bandının tepesi potansiyel enerjinin sıfırı olmak üzere, E_g yasak enerji aralığı enerjisidir. İletkenlik bandının dibine yakın elektronlar, bu nedenle, pozitif m_e kütleli serbest parçacıklar gibi davranırlar. Bununla birlikte değerlik bandında daha aşağı durumlardaki elektronların pozitif etkin kütlelere sahip olmalarına karşın, değerlik bandının tepesine yakın durumda olanlar, negatif bir $-m_h$ kütlelerine sahip gözüktürler. Yaklaşık dolu bir değerlik bandının davranışı, doldurulmuş durumları tamamen ihmal ederek ve her bir boş durumun pozitif yüklü $|e|$, pozitif kütleli m_h ve $\hbar^2 k^2 / 2m_h$ enerjili bir parçacıkla işgal edilmiş olduğu göz önüne alınarak hesaplanabilir. Bu hayali parçacıklara boşluklar (hole) denir. Bir dış elektrik ve manyetik alanda bu boşluklar sanki pozitif e yüklüymüş gibi davranırlar. Yarıiletkende toplam akım iletim bandındaki elektronlardan ve değerlik bandındaki boşluklardan ileri gelen katkıların toplamı olarak yazılabilir. Bu nedenle yarıiletkendeki elektron ve boşluklara yük taşıyıcıları denir (Bedir, 2015).



Şekil 2. Yarıiletken malzemelerin enerji bant diyagramının şematik görünümü (Bedir, 2015).



Şekil 3. Değerlik bandındaki boşluklar için dağılım bağıntıları (Bedir, 2015).

Üç genel madde kategorisi için oda sıcaklığında tipik öz direnç değerleri:

1. İletkenler için $10^{-6} \Omega\text{-cm}$,
2. Yarıiletkenler için $10\text{-}10^3 \Omega\text{-cm}$,
3. Yalıtkanlar için de $10^{12} \Omega\text{-cm}$ olduğu bilinir.

Elektrik akımını geçiren iki tür iletken vardır: elektronik geçişli ve iyonik geçişli iletkenler. Metallerde elektrik akımı taşıyıcıları elektronlar olduğu için metaller elektronsal iletkenlerdir. İyonik iletkenlerde elektrik akımı malzemenin iyonları ile taşınır ve iyonik iletkenin kompozisyonu akımın geçtiği zamanla değişmektedir. Elektrolitler iyon iletkenler grubunda olabilirler. Yarıiletken malzemeler hem elektron hem de iyon iletkenliğine sahip olabilirler.

Isı enerjisi etkisiyle yarıiletkenlerde serbest yük taşıyıcılarının (elektronların ve boşlukların) yoğunlukları artmaktadır. Bu yöntemle meydana gelen yük taşıyıcılarına ısısal veya dengeleyici yük taşıyıcıları denir. Bundan başka, serbest yük taşıyıcıları ışık, elektrik alan, basınç, γ -ışınları, hızlı parçacıkların (elektronların, protonların, nötronların, iyonların vb. bombardımanı) etkisiyle oluşabilir. Bu yöntemlerle meydana gelen yük taşıyıcıları denkleştirilmemiş yük taşıyıcıları olarak tanımlanırlar.

Yarıiletkenlerin karakteristik özelliklerinin dış etkenlere karşı tepkisini şu şekilde açıklayabiliriz: Metallerde atomlar tam olarak iyonlanmış durumdadır ve serbest elektronların yoğunluğu ($n = 10^{22} \text{ cm}^{-3}$) atomların yoğunluğuna eşittir. Bir başka yaklaşımla metalik yapıları pozitif iyon ortamında bulunan negatif elektron bulutu olarak düşünebilir. Bu nedenle metallerin özellikleri dış etkilerle çok az değişmektedir. Katkılandırılmamış yarıiletkenlerde ise serbest elektronların yoğunluğu ($n = 10^{13}\text{-}10^{15}$

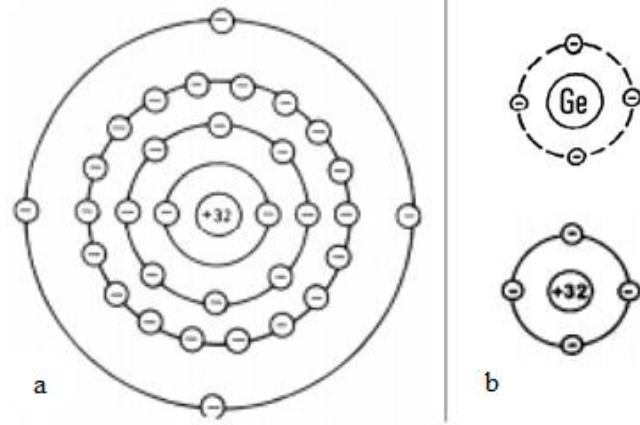
cm^{-3}) ana atomların yoğunluğundan (10^{22} cm^{-3}) çok azdır. Yarıiletken atomların dış etkilere (ışık, elektrik alanı, basınç, hızlı parçacıklarla bombardıman vb.) iyonlaşması ve serbest elektron yoğunluğunu keskin değiştirmek mümkündür. Bunun neticesinde yarıiletken özellikleri dış etkilere bağlı olarak değişebilmektedir.

Diğer yandan serbest yük taşıyıcıların oluşma yöntemleri yarıiletken kristal yapısına, kompozisyonuna ve katkı atomlarının bulunmasına bağlıdır. Çok az miktardaki (10^{-3} - 10^{-8}) katkı atomları yarıiletkenin iletkenliğini keskin (10^8 kata kadar) değiştirebilir. Böylece, yarıiletkenin öz direnci (iletkenlik) oda sıcaklığında $\rho = 10^{-2} - 10^9 \Omega\text{-cm}$ (veya iletkenliği $\sigma = 10^{-9}$ - $10^2 \text{ Ohm}^{-1}\text{-cm}^{-1}$) aralığında olabilir. Öz direncin katkılamayla veya dış etkilere (ısı, ışınlama, elektrik ve manyetik alanlar, basınç, γ -ışınları, hızlı parçacıklarla bombardıman, foto uyarmalı süreçler vb.) kuvvetli bağımlılığı yarıiletkenin esas niteliğidir (Karaca, 2015).

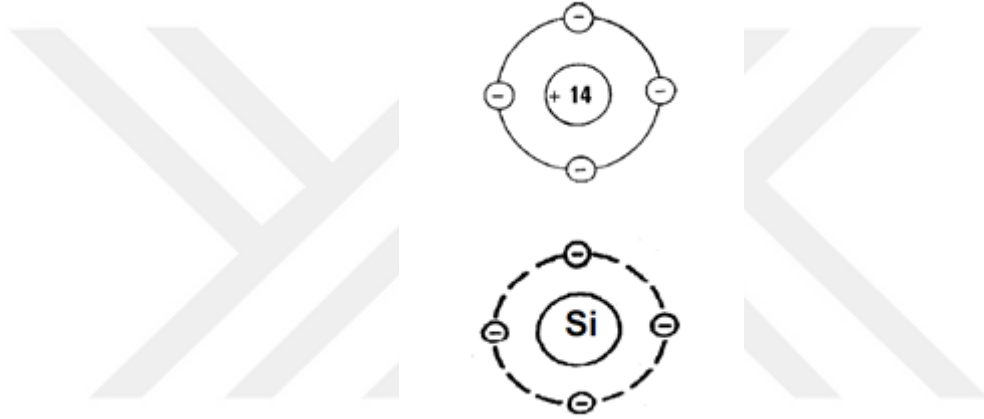
1.3.2. Saf (Katkısız) Germanyum ve Silisyumun Yapıları

Elektronik devre elemanlarının büyük bir bölümü silisyum ve germanyum elementlerinden üretilmektedir. Yarım asır önce başlayan yarıiletken temelli devre elemanı üretiminde ilk zamanlar germanyum çok yaygındı. Günümüzde ise bu madde çok az kullanılmaktadır. Çünkü germanyum oda sıcaklığında bile çok sayıda elektronunu serbest bırakmakta, bu ise sızıntı akımlarının çoğalmasına yol açmaktadır. Sıcaklık arttıkça ise germanyumdaki iletkenlik iyice artmakta ve bu madde, iletken gibi davranmaya başlamaktadır. Silisyum ise oda sıcaklığında tam bir yalıtkan gibi davranmaktadır. İşte bu nedenle diyot, transistör, tristör, entegre vb. yapımında silisyum daha çok kullanılmaktadır.

Doğadan elde edilen bu iki madde saflaştırılarak (başka maddelerden arındırılarak) monokristal (tekli kristal) haline getirildikten sonra devre elemanları üretiminde kullanılmaktadır. Kimyasal işlemlerle yabancı maddelerden arındırılan ve monokristal hale getirilen germanyum ve silisyumun "iç yapısı" incelenecek olursa kübik kafes sistemi karşımıza çıkar.



Şekil 4. a) Germanyum atomunun yapısı. b) Germanyum atomunun gösterilişi.



Şekil 5. Silisyum atomunun gösterilişi.

Germanyum atomunda 32 elektron (K kabuğunda 2, L kabuğunda 8, M kabuğunda 18 ve N kabuğunda 4 elektron) bulunur. Elektronik ile ilgili anlatımlarda germanyumun sadece en son yörüngesindeki dört elektrondan bahsedildiğinden, bu atomun iç yapısı basit olarak Şekil 4-b'deki gibi gösterilir. Silisyum atomunda ise 14 elektron, (K kabuğunda 2, L kabuğunda 8 ve M kabuğunda 4 elektron) vardır. Şekil 5'te 14 elektronlu silisyum atomunun basit gösteriliği verilmiştir.

Atomların sadece en dış yörüngesinde bulunan elektronlarda elektriksel olaylar meydana geldiğinden, anlatımlarda yalnızca "en dış" yörüngeden söz edilir. Diğer yörüngelerdeki (iç yörüngeler) elektronlar çekirdek tarafından çok sıkı olarak çekildiklerinden bulundukları yörüngeden ayrılamazlar.

Kristal yapıya sahip olmayan maddelerin elektronları kendi atom çekirdeği etrafında döner. Ancak, germanyum, silisyum gibi kristal yapıya sahip maddelerin son

yörünge (valans) elektronları, komşu atomların her bir valans elektronlarıyla adeta bağlıymış gibi birlikte dönerler. Bunlara ortak valans çiftleri denir. Komşu atomlar arasındaki ortak valans bağları, atomlar arasında bir çekme kuvveti yaratır. Ancak komşu atom çekirdeklerindeki artı (+) yükler arasındaki itme kuvvetleri, bu çekim gücüne karşı koyar. Bu sayede kristal madde içinde elektriksel denge kurulur. Kovalent bağ içinde olan germanyum ya da silisyum maddesinde elektrik akımı hareketini başlatmak için dışardan bir enerji uygulamak gereklidir. Çünkü normalde bu maddeler "yalıtkan" gibi davranırlar.

1.3.2.1. P ve N Tipi Yarıiletken Malzemelerin Oluşturulması

P ve N tipi yarıiletkenler germanyum ya da silisyuma belli oranlarda yabancı atom katılmasıyla oluşturulmaktadır. Son yörüngesinde (valans yörünge) 3 elektron bulunduran atomlar kullanıldığında P tipi bir yarıiletken oluşurken, 5 elektron bulunduran atom kullanıldığında ise N tipi yarıiletken elde edilmektedir.

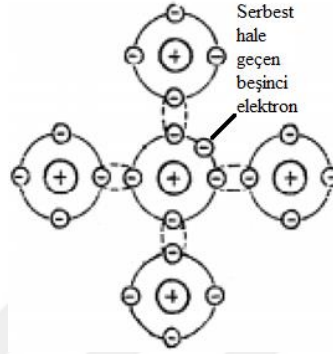
Son yörüngesinde üç valans elektronu bulunan atomlar: İndiyum, galyum, alüminyum, bor vb. Son yörüngesinde beş valans elektronu bulunan atomlar: Arsenik, antimuan, fosfor vb.

1.3.2.2. N Tipi Yarıiletkenin Oluşumu

Son yörüngesinde 4 elektron bulunduran silisyum ya da germanyumun içine, son yörüngesinde 5 elektron bulunduran arsenik (ya da fosfor, antimuan) atomu karıştırılırsa, arseniğin 4 elektronu komşu elektronlarla kovalent bağ yapar. Bir elektron ise boşta kalır. Şekil 6'da görüldüğü gibi serbest hale geçen beşinci arsenik elektronu, kristal yapıda dolaşır. İşte elektron yönünden zengin olan bu karışıma N tipi yarıiletken denir.

Kristal yapı içine katılan 5 elektronlu atom bir elektronunu yitirdiği için elektriksel olarak pozitif (+) yüklü iyon duruma geçer. Bu elektriksel durum basit olarak gösterilirken, çekirdek (+) yüklü, serbest halde dolaşan elektronlar ise (-) yüklü olarak ifade edilir.

N tipi yarıiletkenin oluşumunda kullanılan maddeler elektron çoğalmasına neden olduklarından, bunlara verici (donör) adı verilir. N tipi yarıiletken haline gelmiş olan maddenin serbest hale geçmiş elektronları çok olduğu için, bunlara çoğunluk taşıyıcılar denir. Yani, N tipi yarıiletkende elektrik akımının taşınması işinde "çoğunluk" olan elektronlar görev yapar.

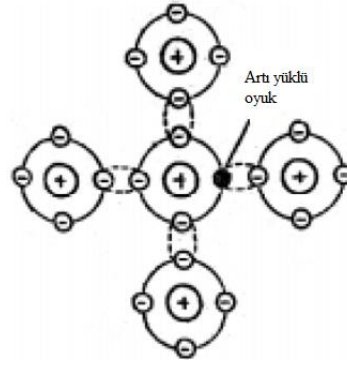


Şekil 6. N tipi yarıiletkenin oluşum modeli.

1.3.2.3. P Tipi Yarıiletkenin Oluşumu

Son yörüngesinde 4 elektronu bulunan silisyum ya da germanyumun içine (yaklaşık 100 milyonda 1 oranında) son yörüngesinde üç elektron bulunan indiyum (ya da galyum, bor, alüminyum) karıştırılırsa, indiyumun üç elektronu komşu elektronlarla kovalent bağ yapar. Şekil 7’de görüldüğü gibi silisyum ya da germanyumun elektronlarından birisi ise bağ yapacak indiyum elektronu bulamaz ve dışarıdan elektron kapmak ister. İşte elektron yönünden fakir olan bu karışım elektriksel olarak pozitif yüklü iyon kabul edilir. Elektronu ihtiyaç olan yer bir oyuk (hole, delik, boşluk) ile ifade edilir ve bu pozitif yüklü kabul edilir. Zira oyuk, her an elektron çekmeye uygun durumdadır. Oyuk yönünden zengin olan bu tip karışıma da P tipi madde denir.

P tipi yarıiletkenin durumu basitçe gösterileceği zaman, çekirdek eksi (-) yüklü, oyuklar ise artı (+) yüklü olarak ifade edilir. P tipi yarıiletkenin oluşumunda kullanılan maddeler (indiyum, galyum, bor) elektron azalmasına neden olduklarından, bunlara alıcı (akseptör) adı verilir.

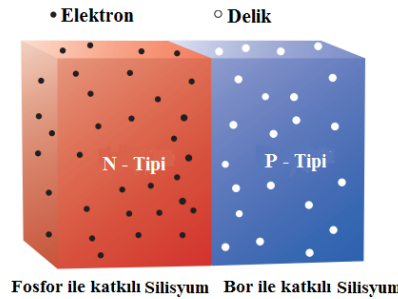


Şekil 7. P tipi yarıiletkenin oluşum modeli.

1.3.3. P-N Eklemleri

Silisyum (Si) yarıiletken malzemesini bor ve fosfor atomları ile katkılandırarak elektriksel iletkenliğinin P tipi ve N tipi iletkenliğe sahip olması sağlanmaktadır.

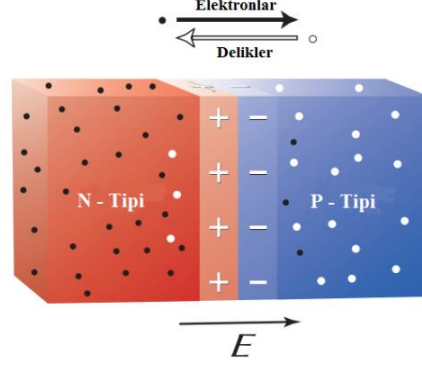
N-tipi malzemede yük taşıyıcıları ağırlıklı olarak negatif yüklü serbest elektronlarla sağlanırken, P tipi malzemede ise iletkenlik pozitif yüklü boşluklarla gerçekleşmektedir. Şekil 8’de N ve P tipi Si malzemelerinin teması verilmiştir.



Şekil 8. P-N eklem şematik modeli.

Bir dış uyarma sonucu temas bölgesinde difüzyon işlemi gerçekleşmekte ve temas yüzeyinde bir geçit bölgesi oluşmaktadır. Şekil 9’da bir P-N geçidin şematik modeli verilmiştir. Difüzyon sürecinde N-tipi malzemede bulunan elektronlar P-tipi tarafına geçtikçe, P yüzeyi negatif ve P bölgesinden N bölgesine boşlukların geçmesi sonucu N yüzeyi pozitif olarak yüklenecektir. Böylece geçit bölgesi zıt işaretli plakalar olarak bir kondansatör özelliği taşıyacaktır. Bilindiği üzere geçit bölgesinde meydana gelen elektriksel alanın yönü elektronları N bölgesine boşlukları ise P bölgesine itme yönündedir. Bununla birlikte oluşan elektriksel alan N bölgesinde azınlık olarak

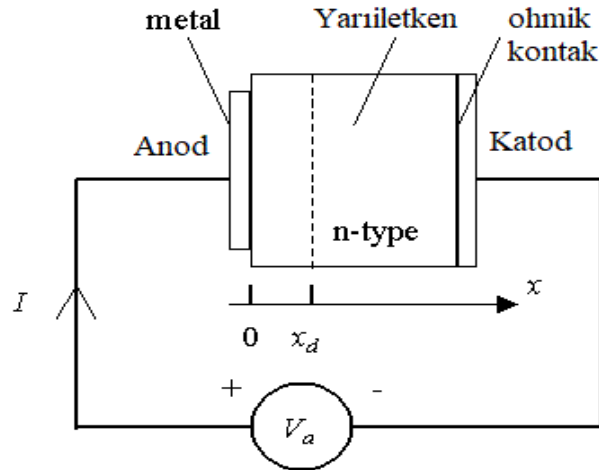
tanımlanan boşlukların P bölgesinde ise azınlık olarak tanımlanan elektronların geçide doğru çekilmesi yönündedir.



Şekil 9. P-N eklemünde akım taşıyıcıların oluşturduğu elektriksel alanın yönleri.

1.3.4. Schottky Diyot

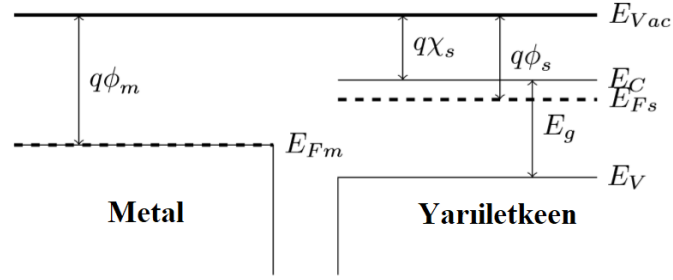
Schottky diyot metal yarıiletken temasından oluşan bir elektronik ayardır. Schottky diyot basit bir yapıya sahiptir ve genellikle güç elektroniği uygulamalarında kullanılmaktadır. Schottky diyotlarında en önemli husus akım iletiminin sadece elektronlarla veya sadece boşluklarla gerçekleştirilmesidir. Şekil 10’da Schottky diyotun şematik modeli verilmiştir.



Şekil 10. Schottky diyotun elektronik devrede görünümü.

Schottky diyotta metalin iş fonksiyonu N tipi yarıiletkenin iş fonksiyonundan daha büyükse ($\phi_m > \phi_s$) bu ikili yapı doğrultucu bir özellik sergilemektedir. Eğer bir metalin iş

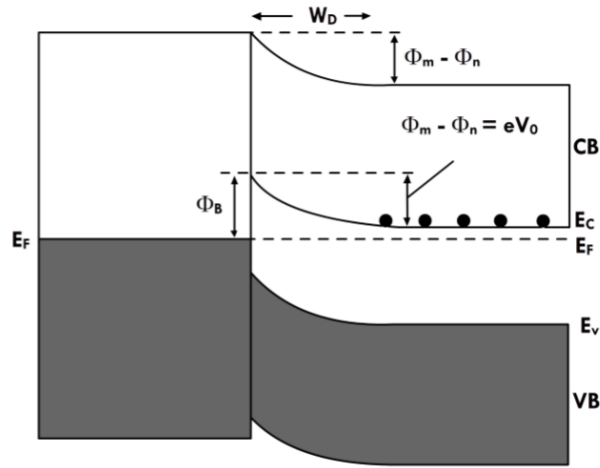
fonksiyonu N tipi yarıiletkenin iş fonksiyonundan daha küçükse ($\phi_m < \phi_s$) temas ohmik kontak özellikli olmaktadır. Eğer diyotu oluşturan yarıiletken P tipi ise yukarıda anlatılan durumun tersi gerçekleşmektedir. Şekil 11’de metal/n-tipi yarıiletken yapılı Schottky diyotun enerji-bandı diyagramı verilmiştir.



Şekil 11. Metal/N-tipi yarıiletken temasından önce enerji-band diyagramı.

Burada metalin Fermi seviyesi için E_{Fm} sembolü, yarıiletken Fermi seviyesi için ise E_{Fs} sembolü kullanılmıştır. Temas esnasında Fermi seviyesi metal seviyesine eşit olana kadar elektronlar metala geçerler. Bunun nedeni yarıiletkenin iş fonksiyonunun metalin iş fonksiyonu daha küçük olmasıdır. Elektronlar yarıiletkenden ayrıldıklarında, iyonlaşmış donör atomlarından dolayı pozitif bir yük bırakır. Elektronların metale geçmesinden dolayı N-tipi yarıiletkende elektronlardan arındırılmış bir tabaka oluşmaktadır.

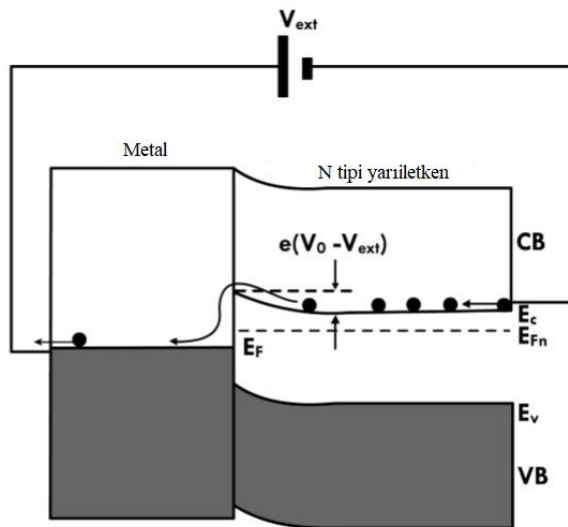
Arındırılmış bölge yarıiletkende belirli bir derinlikte oluştuğundan dolayı, yarıiletken tarafındaki enerji bantlarında bükülmeler meydana gelmektedir. Bu süreçte enerji bantları elektrik alanı yönünde bükülürler. Şekil 12’de, enerji bantlarının N-tipi yarıiletkenden metale doğru büküldüğü gösterilmektedir.



Şekil 12. Termodinamik denge durumunda metal/N tipi yarıiletkenin enerji bant diyagramının görünümü.

1.3.4.1. İleri Besleme

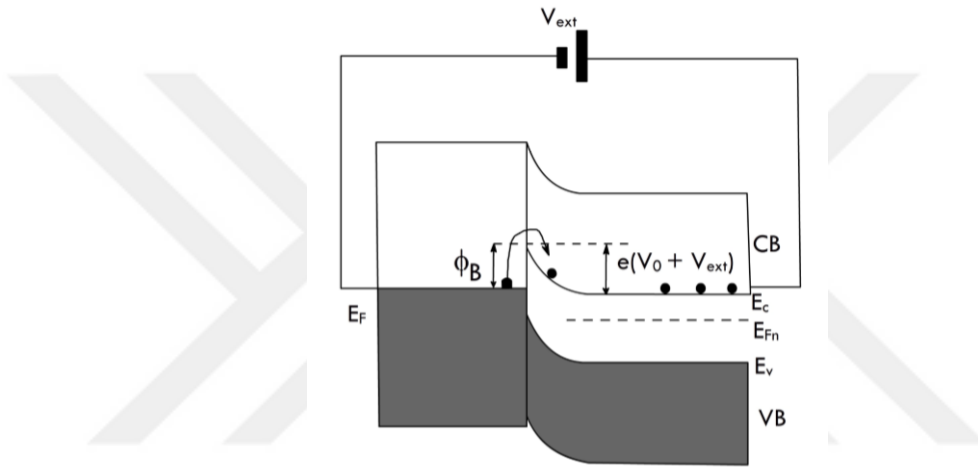
Metale gerilimin pozitif ucu ve N tipi yarıiletkene gerilimin negatif ucu bağlandığında ileri besleme gerçekleşmektedir. Schottky diyot uçlarına ileri besleme uygulandığında dış potansiyel, geçitte oluşan potansiyele karşı olacak şekilde uygulanır. Temas yüzey yakında bulunan arındırılmış bölge genelde yüksek direnç göstermektedir. Bundan dolayı uygulanan sinyalle voltaj düşüşü arındırılmış bölgede meydana gelir. Dış gerilim altında, Fermi seviyeleri kaymakta ve kaymanın büyüklüğü uygulanan gerilim değerleri ile orantılı olmaktadır. Şekil 13'te bir Schottky diyotunun ileri besleme altında enerji bant diyagramı verilmiştir.



Şekil 13. İleri besleme rejiminde Schottky diyotun şematik modeli.

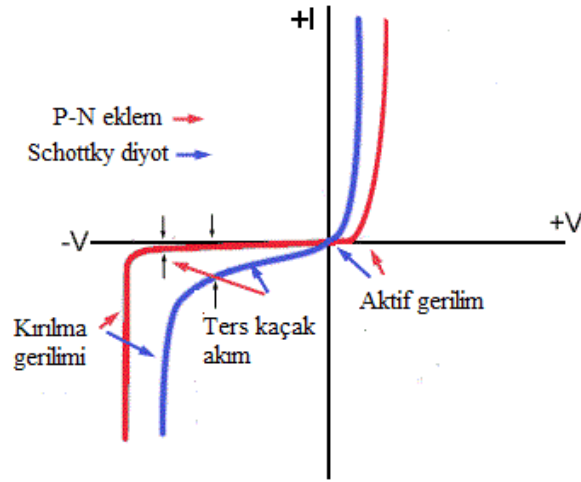
1.3.4.2. Ters Besleme

Bir metale gerilimin negatif ucu ve N tipi yarı iletken tarafına gerilimin pozitif ucu bağlandığı durumda ters besleme gerçekleştirilir. Ters besleme durumunda, dış potansiyel, Şekil 14’te gösterildiği gibi geçitte oluşan potansiyel ile aynı yönde oluşur. Dış gerilim altında, Fermi seviyeleri eşit olmaz, ancak birbirlerine göre kaydırılır. Ters besleme rejiminde elektron hareketinin zıt yönünde oluşan toplam elektriksel alan bariyer yüksekliğini artırır.



Şekil 14. Ters besleme rejiminde Schottky diyottun şematik modeli.

Şekil 15’te ileri ve ters besleme durumunda P-N eklemi ve Schottky diyodun I-V karakteristiği verilmiştir. Şekil 15’ten görüldüğü üzere Schottky diyotunun ileri aktif voltajı, normal P-N eklemi ile kıyasla çok düşüktür, ek olarak, Schottky diyotun ters kırılma gerilimi de tipik olarak eşdeğer bir P-N eklemden daha düşüktür. Schottky diyotunda, akım iletimi sadece elektronların hareketi nedeniyle gerçekleşir. Ters yönde delik hareketi yoktur. Bu, Schottky diyodun kaçak akımın P-N eklemin kaçak akımından daha küçük olduğunu açıklamaktadır.



Şekil 15. İleri ve ters besleme altında P-N eklemi ve Schottky diyodun I-V karakteristiği

1.3.5. İnce Film Büyütme Metodları

İnce film, maddenin molekül / atomik / iyonik taneciklerin yoğunlaştırılmasıyla oluşturulan iki-boyutlu bir madde olarak tanımlanabilir. İnce film kalınlık açısından, bir nanometrenin (tek tabakalı) fraksiyonlarından birkaç mikrometreye kadar değişen bir malzeme tabakasıdır. İnce filmlerin tek bir kristal altlık üzerinde imal edilmesi, ayrı ayrı atomların biriktirilmesiyle yapılmaktadır.

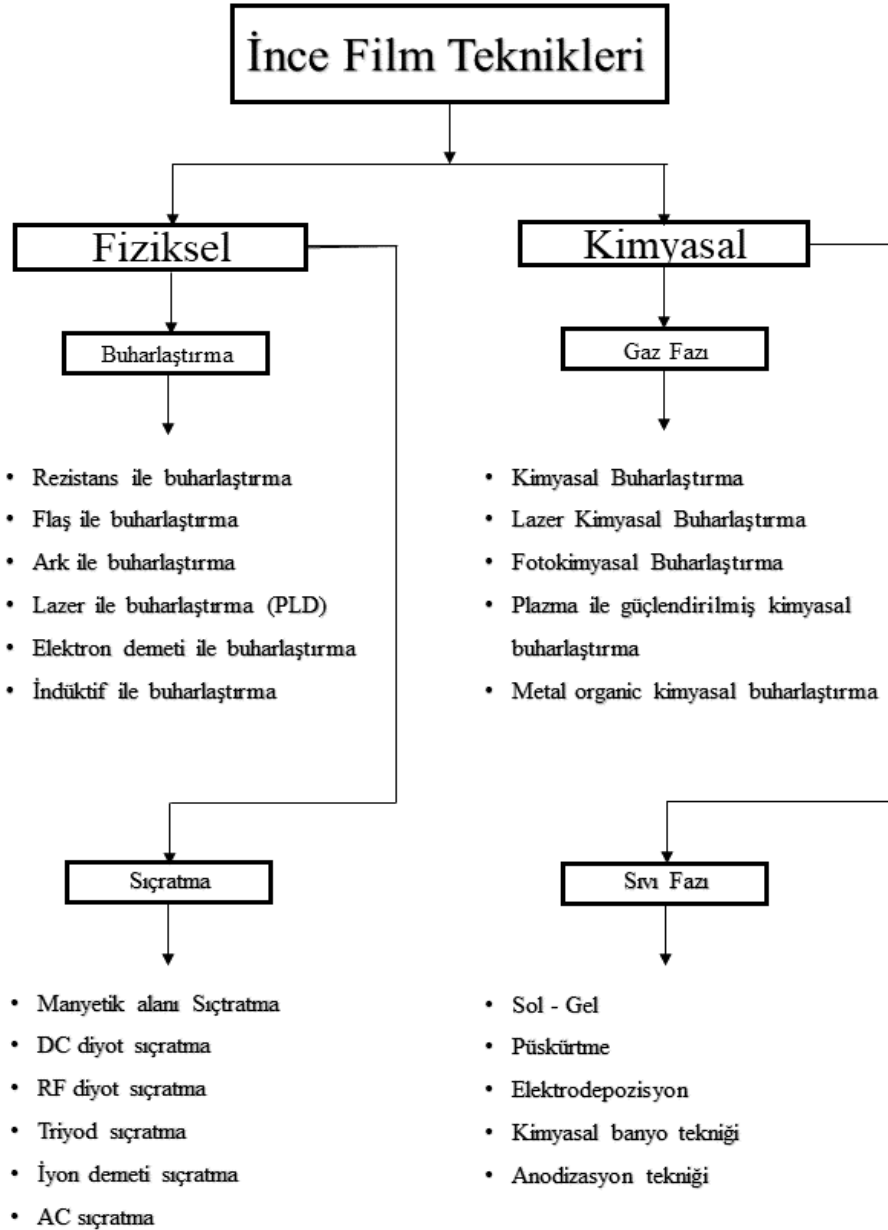
İnce filmler birçok mühendislik sisteminde kullanılmaktadır ve çok çeşitli fonksiyonlara uyarlanmıştır. Bu uygulamalardan bazıları:

- Nano elektronik elemanları hızlı geliştirmek için ince film teknolojisinde büyük çabalar gösterildi. Bu tür cihazlarda, elektrik yükünün sınırlandırılması büyük ölçüde farklı elektronik özelliklere sahip malzemeler arasındaki arayüzlere dayanır.

- Yüksek sıcaklık ortamlarında malzemeleri korumak için yüzey kaplamalarının kullanılması, ticari öneme sahip başka bir ince film teknolojisidir. Yüzey kaplamaları kullanılması, temas nedeniyle sürtünme ve aşınmaya maruz kalan bileşenlerin kullanımının ömürleri, büyük ölçüde uzatabilir.

• İnce filmler, sensörler ve aktüatörler olan tasarlanmış birçok mikro-elektro-mekanik sistemin önemli parçalarıdır. İşitme cihazlarında mikrofon, spor esnasında kan basıncı monitörleri, optik görüntüleme sistemleri, ince film teknolojisine dayanmaktadır.

İnce film metodları iki ana tipe ayrılır: fiziksel ve kimyasal yöntemler. Şekil 16'da ince film biriktirme tekniklerinin sınıflandırması verilmiştir.



Şekil 16. İnce film üretim teknikleri

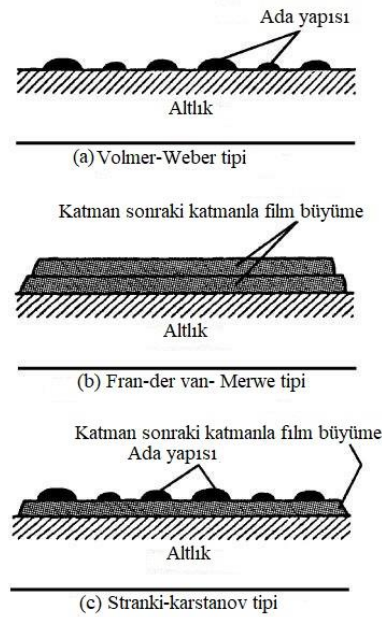
1.3.5.1. İnce Film Büyüme Sürecinde Gerçekleşen Aşamalar

Tipik bir ince film üretme işlemi üç ana aşamadan oluşmaktadır (a) uygun atomik, moleküler veya iyonik taneciklerin üretimi (b) bu taneciklerin altlıklara bir ortam yoluyla taşınması (c) alt-tabaka üzerinde yoğunlaşma, doğrudan kimyasal ve elektrokimyasal tepkime yoluyla, katı ince film oluşturmaları. Çeşitli deneysel ve teorik çalışmalara dayanarak, büyüme süreci genel olarak aşağıdaki adımlara göre gerçekleşir:

- Altlık tarafından tanecik (atom, molekül, iyon) absorbe edilir.
- Başlangıçta adsorbe edilen tanecikler altlık ile termal dengede değildir ve altlık yüzeyi üzerinde hareket ederler. Bu işlemde kendi aralarında etkileşip daha büyük tanecikler oluştururlar.
- Tanecikler ve çekirdekler, termodinamik olarak kararsızdır ve biriktirme parametrelerine bağlı olarak bazı zamanlar altlıktan ayrılabilir. Biriktirme parametreleri, bir taneciğin, absorbe edilmeden önce diğer adsorbe edilmiş taneciklerle çarpışacağı şekilde ise, boyutta büyümeye başlar. Tanecik boyutu belli bir kritik boyuta ulaştıktan sonra, taneciğin termodinamik olarak kararlı hale geldiği ve çekirdeklenme bariyerinin aşıldığı sayılır. Kararlı, kimyasal emilmiş, kritik boyutta çekirdek oluşumunu içeren bu aşama çekirdeklenme aşaması (*nucleation stage*) olarak adlandırılır.
- Doyma çekirdeklenme yoğunluğu elde edilene kadar kritik çekirdeklerin hem sayısı hem de boyutu büyür. Çekirdeklenme yoğunluğu ve ortalama çekirdek boyutu, çarpışan taneciklerin enerjisi, çarpma oranı, adsorpsiyonun aktivasyon enerjileri, desorpsiyon, termal difüzyon ve sıcaklık, topografya ve kimyasal altlığın doğası gibi bir dizi parametreye bağlıdır. Bir çekirdek, adsorbe edilmiş taneciklerin yüzey difüzyonu ile alt tabakaya paralel olarak büyüyebilir. Bununla birlikte büyüme dik olarak taneciklerin doğrudan çarpışması ile gerçekleşir. Genel olarak, bu aşamada yanal büyüme oranı, dikey büyümeden çok daha yüksektir. Büyüyen çekirdeklere ada (*islands*) denir.

- Film oluşturma sürecindeki bir sonraki aşama, birleşme aşamasıdır (*coalescence stage*). Adalar küçük ise altlık yüzey alanını azaltmak için adalar birbirleriyle birleşmeye başlar. Bu işlem büyük adalar için kümelenme (*agglomeration stage*) olarak adlandırılır. Bu aşamada altlık sıcaklığı artması, absorbe edilen taneciklerin yüzey hareketliliğini arttırmaktadır. Bazı durumlarda, birleşme sonucu yeni çekirdek oluşumu meydana gelebilir.
- Bu aşamada daha büyük adalar birlikte büyür ve filmlerin yapısı süreksiz ada tipinden gözenekli ağ tipine değişir. Kanalların ve deliklerin doldurulması, tamamen kesintisiz bir film oluşumu ile sonuçlanır.

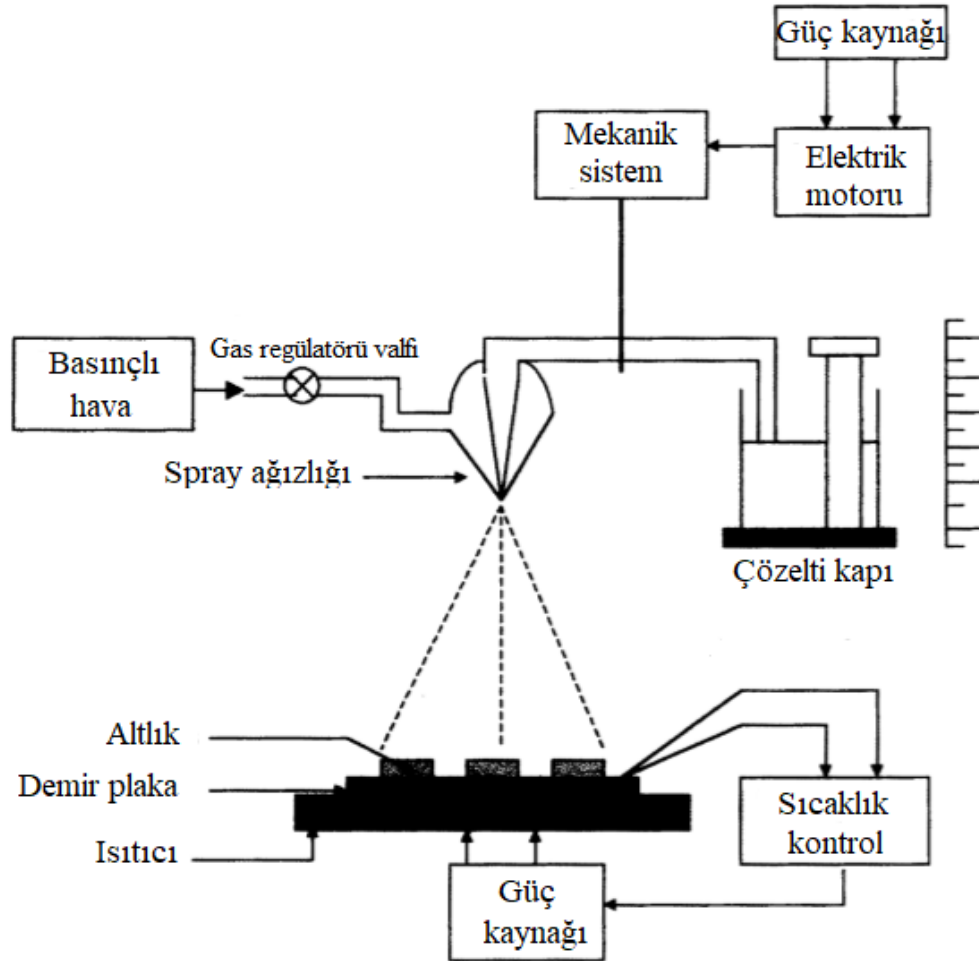
Böylelikle çekirdeklenmenin istatistiksel süreci, üç boyutlu çekirdeklerin yüzey-difüzyon kontrollü büyümesi, bir ağ yapısının oluşumu ve sürekli bir film vermek üzere müteakip dolumu, bu süreçler büyüme sürecini oluşturur. Büyüme aşamaları ve ilk çekirdeklenme, birikintinin termodinamik parametrelerine ve altlık yüzeyine bağlıdır. Aşağıdaki şekilde (a) Volmer-Weber (VW) tipi olarak adlandırılan adasal büyüme türü, (b) Frank-Van der Merwe (FV) türü olarak adlandırılan tabakasal büyüme tipi ve (c) Stranski-Krastanov (SK) olarak adlandırılan karışık türü görebiliriz (Şekil 17).



Şekil 17. İnce film büyüme sürecinde çeşitli büyüme mekanizmalarının görünümü.

1.3.5.2. Kimyasal Püskürtme Yöntemi

Kimyasal püskürtme tekniği, sıvı veya buhar atomlarının kümeleri arasında termal olarak uyarılmış bir kimyasal reaksiyondan oluşur. Genellikle önceden ısıtılmış altlıklar üzerine arzu edilen bileşiğin çözünen tuzlarının püskürtülmesini içerir. Sıcak altlığın yüzeyine ulaşan her püskürtülmüş damlacık, pirolize (endotermik ayrışmaya) uğrar ve bu işlem sonucu olarak tek bir kristal tanecik meydana getirir. Süreç sonunda maddelerin içerisindeki sabit karbon ve uçucu ayrılıp buhar fazına gider. Altlıklar, termal ayrışma ve daha sonra kurucu taneciklerin rekombinasyonu için termal enerji sağlar, taneciklerin sinterlenmesi ve kristalleşmesi tutarlı bir film oluşturur. Püskürtme işlemi, püskürtme çözeltisinin ince damlacıklar püskürtmesine ayrıca püskürtme ağızlığının geometrisine ve bir taşıyıcı gazın basıncına da bağlıdır. Püskürtme tekniğinin şematik diyagramı Şekil 18’de gösterilmiştir.



Şekil 18. Kimyasal püskürtme sisteminin şematik gösterimi.

1.3.5.3. Fiziksel Buhar Biriktirme

Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) teknolojisi, ark ile biriktirme, iyon ile kaplama, termal buharlaştırma, elektron ışını ile buharlaştırma gibi tekniklerden oluşur. İnce filmler ve kaplamalar için kullanılır. Kaplama veya biriktirme kalınlığı angstromlardan milimetreye kadar değişebilir. Bu tekniklerin uygulanması, dekoratif, mühendislik, kimya, nükleer, mikroelektronik ve ilgili endüstrilerin önemli bölümlerine göre çok çeşitli uygulamalara kadar uzanmaktadır. Tek parça bir malzeme, yüksek teknoloji uygulamalarında bu talebi karşılayamaz. Sonuçta ortaya çıkan çözelti bileşik bir malzemedir. Yani spesifikasyonları yerine getirmek için gerekli özelliklere sahip ana malzeme ve kaplama malzemesidir.

PVD teknolojisi çok yönlü bir ürün olup, neredeyse her tür inorganik malzemenin metaller, alaşımlar, bileşikler ve bunların karışımları ile bazı organik materyallerin biriktirilmesini sağlar. Biriktirme oranları dakikada 10 ile 750 000 Å (10 Å - 1 nm) arasında değişebilir. Biriktirme işlemlerinin amacı, atomları bir kaynaktan altlığa kontrol edilebilir bir şekilde transfer etmektir, oradaki film oluşup büyümektedir. Buharlaştırma işleminde atomlar termal yollarla kaynaktan uzaklaştırılır. İki ana PVD yöntemi kullanılmaktadır. Bunlar;

- a) Rezistif (termal) buharlaşma
- b) Elektron demeti ile buharlaşması

Fiziksel buhar biriktirme işlemleri vakumda gerçekleştirilir. Başarılı olmak için, buhar akışı ve büyüyen film üzerindeki çevrenin etkisinin farkında olarak ince film biriktirme yapılmalıdır.

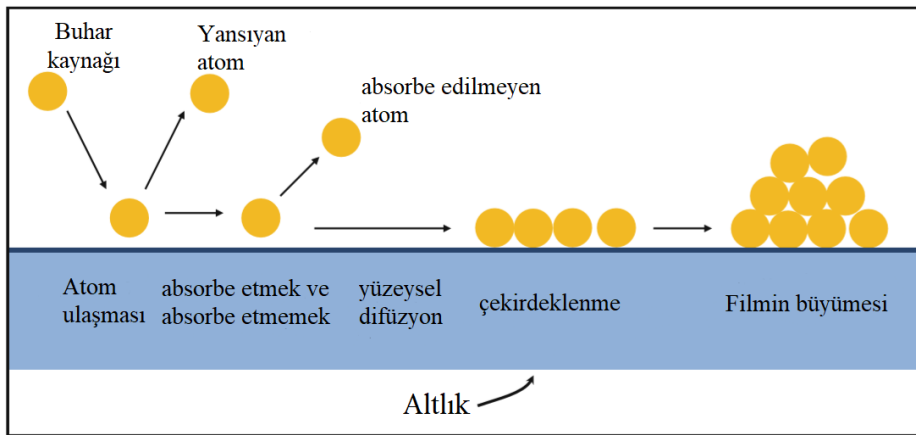
1.3.5.3.1. Rezistif (Termal) Buharlaştırma

Termal buharlaşma, buhar basıncını arttırmak için vakum kabında yüksek sıcaklıkta bir malzemenin ısıtılmasını kapsayan bir fiziksel buhar biriktirme tekniğidir (PVD). Malzeme buharı doğal olarak yüzey tabakası üzerinde yoğunlaşarak ince bir film oluşturur. Genellikle, bu teknikte, buhar materyali ile oda atmosferi arasındaki

reaksiyonu önlemek için 10^{-4} Torr'un altındaki düşük basınçlar kullanılır. Bu düşük basınç, buhar atomlarına serbest yolu sağlar, bu yüzden bu parçacıklar, buharlaştırma kaynağından alt tabakaya doğru düz çizgiler halinde hareket eder.

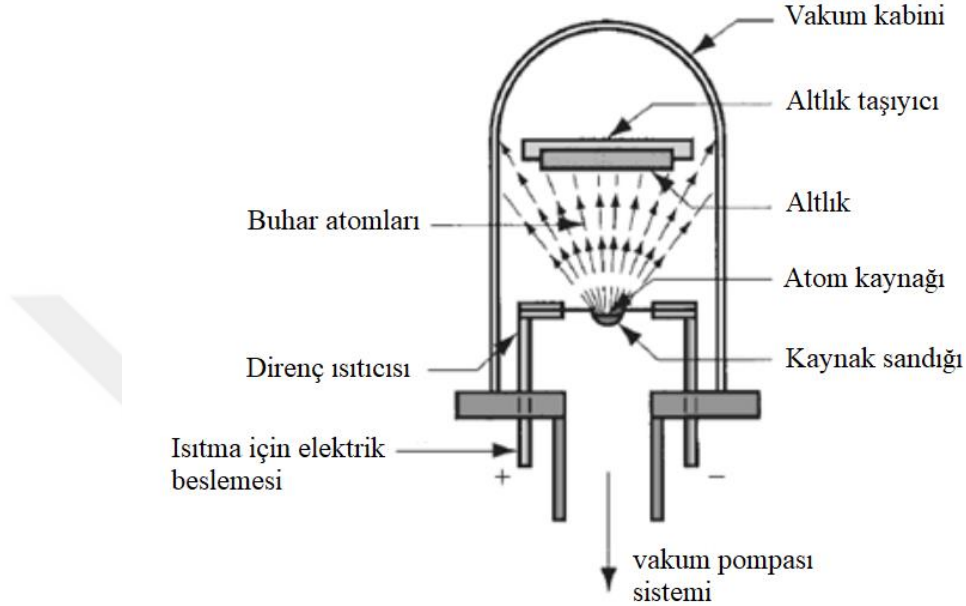
Ayrıca, termal buharlaştırma tekniklerinde, altlık yüzeyine ulaşan buhar atomlarının ortalama kinetik enerjisi düşüktür (yani, altın için $T_{\text{evap}} = 1400$ °C olduğunda, atom başına ortalama kinetik enerji yaklaşık 0.2 eV'dir ve böylece bir malzemedeki atomların bağlanma enerjisinden daha küçüktür (5-10 eV). Atomlar, altlık yüzeyine düşük enerjiyle ulaşır. Bundan dolayı filmlerin morfolojisini etkiler ve genellikle düşük yoğunluklu filmler elde edilmesine neden olur. Bağlanma enerjisi, buhar atomlarının ortalama kinetik enerjisinden daha küçük olduğunda, daha homojen ince filmler oluşmaktadır.

Film büyümesi mikroskobik seviyede birkaç adımın meydana geldiği karmaşık bir süreçtir. Atomların yüzeye gelmesi, adsorpsiyon ve ardından yüzey difüzyonu, çekirdeklenme, yeni tabaka oluşumu Şekil 19'da gösterilen bu adımların her biri hem önceki adıma hem de biriktirme işleminin parametrelerine bağlıdır. Bu parametreler, biriktirme hızı, sıcaklık, buharlaştırılmış malzeme, vb. dir. Bütün bu adımlar buharlaştırılmış filmlerin büyümesini ve morfolojisini belirler. Bunun yanı sıra, buharlaştırılmış malzeme ve altlık arasındaki etkileşim ve altlık temizliği gibi yapısal parametreler, film morfolojisinde önemli bir rol oynar.



Şekil 19. PVD teknikleri ile ince filmlerin büyüme aşamaları.

Bazı malzemeler (çoğunlukla saf metaller), vakumda başlangıçta katıdan buhar haline dönüştürülerek ve daha sonra altlık yüzeyinde yoğunlaşmalarına izin verilerek bir altlık üzerinde biriktirilebilir. Vakumda termal buharlaştırma işleminin kuruluşu Şekil 20’de gösterilmektedir.



Şekil 20. Vakum buharlaştırma düzeneğinin şematik modeli.

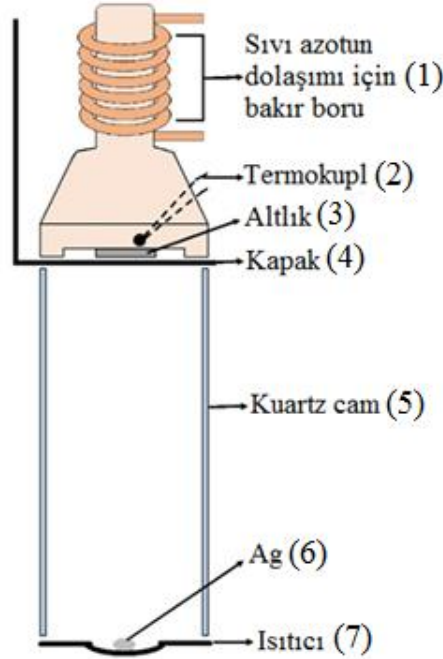
Dirençli olarak ısıtılan bir sistem (termal), en basit buharlaşma kaynağı türüdür. Biriktirilecek malzemeyi içeren dirençli bir tel veya potadan büyük bir akım geçirilerek dirençli buharlaşma, gerçekleştirilir. Isıtma yapmak için vakumda gereken sıcaklık, atmosferik basınçta gereken karşılık sıcaklıktan daha düşüktür. Ayrıca, deney yapıldığı kabın içindeki havanın olmaması, ısıtma sıcaklıklarında kaynak malzemenin oksidasyonunu önler. Buharlaşmadan önce kaynak materyali taşmak için bir pota sağlanmalıdır. Pota ısıtılması için akım sağlanır, bu daha sonra temasta olan malzemeyi ısıtır.

Bu ısıtma yöntemindeki ana problem, taşıyıcı pota ve içeriği arasında oluşmaktadır; böylece biriktirilmiş film, dirençli ısıtma potanın metaliyle kirletilir. Buharlaşma işleminde, buharlaşmış atomlar kaynağı terk eder ve diğer gaz molekülleri ile çarpışmalarını veya katı bir yüzeye çarpmalarını bekleyen düz hatlı yolları takip eder. Kabinin içindeki vakum, diğer gaz moleküllerini neredeyse tamamen ortadan kaldırır, böylece kaynak buhar atomlarıyla çarpışma olasılığını azaltır. Kaplanacak olan altlık

yüzeyi üzerinde buhar atomlarının birikeceği muhtemel katı yüzey olacak şekilde tipik olarak kaynağa göre konumlandırılır. Yüzeyin homojen kaplanması için altlığı döndürmek için bazen mekanik bir manipülatör kullanılır. Doymuş buhar ortamından gelen atomlar katı altlık yüzeye yapışıp ince bir film oluşturur. Büyük biriktirme oranları elde etmek için, buharlaştırıcılar genellikle çok yüksek sıcaklıkları ile çalıştırılmaktadır. En iyi homojenliği elde etmek için buharlaşma oranı oldukça düşük olmalıdır (saniyede 1-3 Å).

1.3.5.3.2. Soğuk Altlık Yöntemi

Düşük vakum ortamında (10^{-5} - 10^{-6} Torr) soğuk altlık yöntemi ile buharlaştırma düzeneği altlık soğutma sistemi ve doymuş buharı içeren reaktör olmak üzere iki temel parçadan oluşmaktadır. Altlık soğutma sisteminde sıvı azot, reaktörde ise buharlaştırılacak malzemenin doymuş buharı bulunmaktadır. Söz konusu sistemde, altlığı soğutmak için sıvı azotun dolaşacağı bakır borudan oluşan bölüm, altlık tutucularının ve ayarlanabilir (açılıp kapanabilir) pencerenin bulunduğu bölüm, silindirik kuartz reaktör ve malzemeyi buharlaştırmak için kullanılan tungsten ısıtıcı yer almaktadır.



Şekil 21. Soğuk altlık düzeneğinin şematik görünümü.

Kapak kontrol edilerek, pencere açılıp-kapatılabilir. Böylece malzeme buharlaşırken süreye bağlı olarak film büyümesi gerçekleştirilir. Sıvı azotla soğutulmuş altlıkların doymuş buharla teması reaktörde tasarlanan açılıp kapanabilir pencere yardımıyla sağlanmaktadır. Sıvı azot ile soğutulan altlıklar reaktördeki doymuş buhar ile temas ettiğinde altlık yüzeyine doymuş buhar ortamından farklı boyutlarda nano ölçekli kümeler taşınır. Bu kümeler kritik öncesi, kritik ve kritik ötesi boyutlar olarak sınıflandırılır. Kritik boyutlu kümeler; doymuş gaz ortamında bulunan atomların basıncı doymuş buhar basıncından biraz yüksektir ve bu nedenle bu atomlar serbestçe hareket edebilir. Buhar ortamında oluşan kümeler bu atomların yapışmasıyla büyümektedir. Bu süreçte gaz ortamında oluşan kümeler genellikle eşit boyutludur. Kritik öncesi boyutlu kümeler, ortamda bulunan atomların hepsi çok yüksek basınçları nedeniyle buhar ortamında oluşan kümelere yapışmış durumdadır ve ortamda serbest atom yoktur. Ortamdaki kümeler birbiri ile çarpışarak büyümektedir. Kritik ötesi boyutlu kümeler ise kritik ve kritik öncesi boyutlu kümelerin gerçekleşmediği durumlarda geçerlidir. Küme büyümesi küçük kümelerin atomlarının buharlaşarak büyük kümelere yapışmasıyla gerçekleşir.

Bu yöntemin en büyük avantajı ve diğer yöntemlerden farkı; doymuş buhardan gelen altlık yüzeyine taşınan ve buraya konumlanan kümelerin altlık atomlarıyla çarpışması esnasında soliton dalgası oluşturmalarıdır. Doğrusal olmayan özelliğe sahip soliton dalgaları kütle taşıma özelliği nedeniyle altlık yüzeyinde parçacıkların enerji kaybına uğramadan hareket etmesini sağlamaktadır. Bu modelde altlığın kristal yapıya sahip olması, tek yönde Burger vektörünün oluşmasına ve böylece soliton dalgası etkisiyle parçacıkların taşınımının aynı yönde gerçekleşmesine neden olur. Bu durum homojen bir kaplama sağlamaktadır. Soliton dalgasının oluşumu ile soliton büyüme mekanizmasını gerçekleştiren kümelere kritik boyutlu kümeler denir. Kritik boyutlu kümeler altlık yüzeyinin sıcaklığına bağlı olarak 10-15 nanometre arasında değişmektedir. Altlık yüzeyinde kritik boyutlu kümelerin soliton dalgasını oluşturmaları için aşağıda verilen eşitsizliğin sağlanması gerekmektedir (Buldu, 2018).

$$\frac{a(T_r)-b(T_f)}{b(T_f)} > \left(\frac{2}{\pi}\right)^{3/2} \sqrt{\frac{f}{\lambda}} a(T_r) \quad (4)$$

$a(T_r)$ ve $b(T_f)$ sırası ile altlığın ve gelen parçacığın örgü parametresidir. f altlıkla küme (doymuş buhardan gelen tüm kümeler) arasındaki etkileşme kuvvetini, λ altlık atomları arasındaki etkileşme kuvvetini göstermektedir.

Altlık yüzeyinde soliton dalgası oluşturmamayan kritik öncesi ve kritik ötesi kümeler ise tekrar doymuş buhar ortamına dönüş yaparlar. Böylece altlık yüzeyi eşit boyutlu nano ölçekli kümelerle kaplanarak metalik filtre katmanları oluşturulmuş olur.

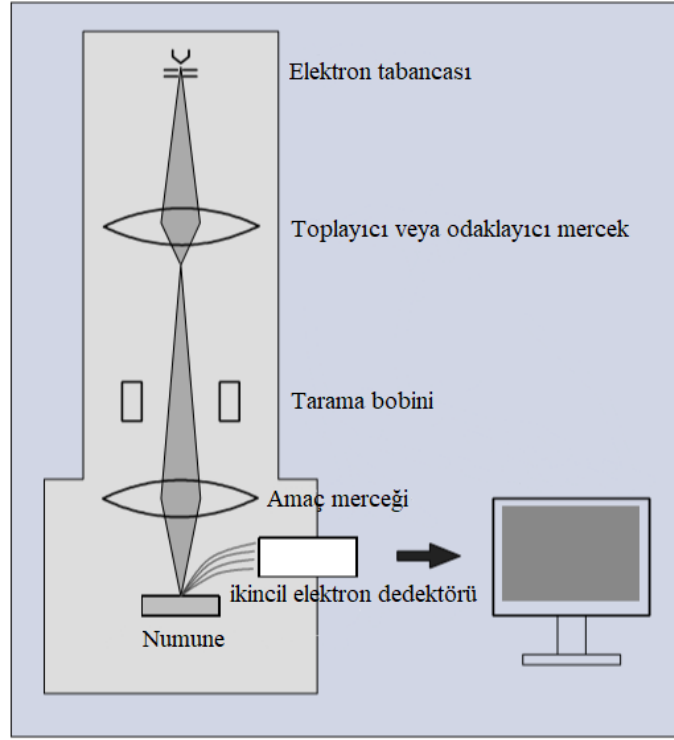
1.4. Analiz Sistemleri

1.4.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), numune yüzeylerinin gözlemlenmesi için kullanılır. Numune ince bir elektron ışını ile ışınlandığında, ışındaki elektronlar örnekle etkileşime girerek yüzey topografyası ve bileşimi hakkında bilgi edinmek için kullanılacak çeşitli sinyaller üretir.

SEM, bir elektronlar sondasını üretmek için bir elektron optik sistemi, numuneyi yerleştirmek için bir örnek tutucusu, ikincil elektronları toplamak için bir elektron dedektörü, bir görüntüleme ünitesi ve çeşitli işlemleri gerçekleştirmek için bir işletim sistemi gerektirir (Şekil 22).

Elektron optik sistemi, elektronlar sondasını üretmek bir elektron tabancası, bir toplayıcı veya odaklayıcı mercek, amaç merceği ve elektron sondasını taramak için bir tarama bobini ve diğer bileşenlerden oluşur. Mikroskop sisteminin içindeki elektron optik sistemi ve numuneyi çevreleyen boşluk vakumda tutulur.



Şekil 22. Taramalı elektron mikroskobunun temel yapısı.

1.4.2. X-Işını Kırınımı (XRD)

X-ışını kırınımı (XRD), kristal malzemelerin karakterizasyonu için güçlü ve tahribatsız bir tekniktir. Yapılar, fazlar, tercih edilen kristal yönelimleri (doku) ve ortalama tane büyüklüğü, kristal kusurları gibi diğer yapısal parametreler hakkında bilgi sağlar.

Bir X-ışını tüpü, elektriksel giriş gücünü X-ışınlarına dönüştüren bir vakum tüpüdür. Alman fizikçi Wilhelm Conrad Röntgen tarafından ilk kez 8 Kasım 1895'te keşfedildiği deneysel Crookes tüplerinden X-ışını tüpleri, geliştirildi.

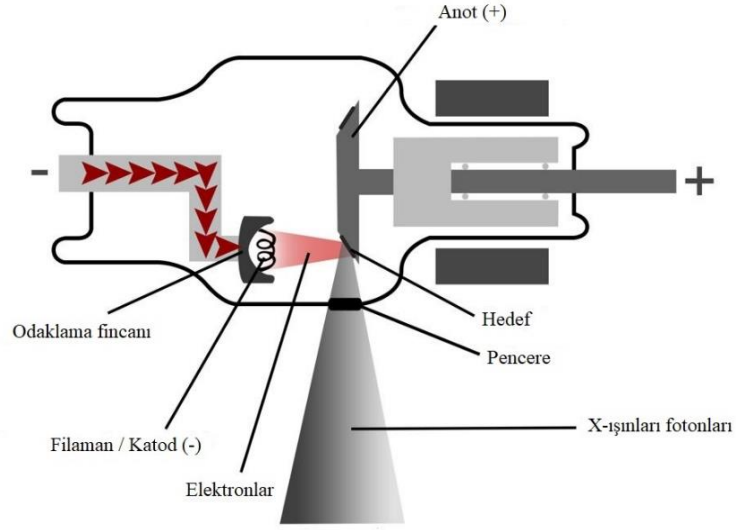
Şekil 23'e göre X-ışını tüpü esas olarak bir elektrik devresini tamamlayan büyük bir valf veya anahtardır. X-ışını tüpü bir katot ve bir vakum içindeki bir anottan oluşur. X-ışını tüpü bir muhafaza içine yerleştirilmiştir. X-ışını tüpünün negatif ucuna katot, pozitif ucuna ise anot denir. Katodun amacı, termiyonik bulut üretmek, yüksek voltaj akımını iletmek ve yayılan elektronlara odaklanmaktır. Katot, filament (veya filamentler), odaklama kabı ve tüm ilgili kablolamadan oluşur. Filaman aslında çok sıkı sarılmış bir tel bobinidir. Elektronların ihtiyaç duyduğu kinetik enerjiyi üretmek için

yüksek bir voltaj gerekir ve filament katodu için nispeten daha düşük bir enerji kullanılır. Elektronlar katottaki termiyonik emisyonla üretilir. Bu nispeten düşük voltaj kaynağı ile ısıtılır. Filaman içinden bir elektrik akımı geçtiğinde, elektronların bir kısmı filamentin içinde tutan çekici (elektrostatik) kuvvetlerden kurtulmak için yeterli (termal titreşim) enerjisine sahip olacak şekilde ısınır. Filamentten yayılan elektronların miktarı, filamentin içinde akan elektronların miktarı (yani akım) ile doğru orantılıdır. Odaklanma kabı (Molibdenden yapılmıştır) filamenti içermektedir. Filament, hepsi negatif yüke sahip olan elektronlar yayar. Odaklama fincanı negatif yüke sahip olduğundan dolayı küçük bir anot bölgesine elektron ışınını odaklayabilir. Anot, X-ışını tüpünün pozitif yanıdır; elektrik iletir ve ısı yayar ve hedefi içerir. Anot, bir X-ışın tüpünde üç fonksiyon sunar:

- Anot elektriksel bir iletkenidir. Katod tarafından yayılan elektronları çekmektedir.
- Anot ayrıca hedef için mekanik destek sağlar.
- Ayrıca anot da iyi bir termal dağıtıcı olmalıdır. Katoddan gelen elektronlar anotla etkileşime girdiğinde, kinetik enerjilerinin % 99'undan fazlası ısıya dönüştürülür.

Hedef, elektrotların katoddan çarptığı anot bölgesidir. Sabit anot tüplerinde, hedef bir tungsten alaşımı içeren bakır anottan oluşur. Dönen anot tüplerinde hedef tüm dönen diskidir.

Elektronlar metal hedefi ile çarpıştığında X-ışınları üretilir. Bombardıman elektronları yeterli enerjiye sahipse, hedef metal atomlarının iç kabuğundan elektronu çıkarabilirler. Elektronlar daha sonra yüksek enerji seviyesinden daha düşük enerji seviyesine düştüğünde X-ışının fotonlarını yaymaktadır. Şekil 23 X-ışın tüpü yapısını göstermektedir.

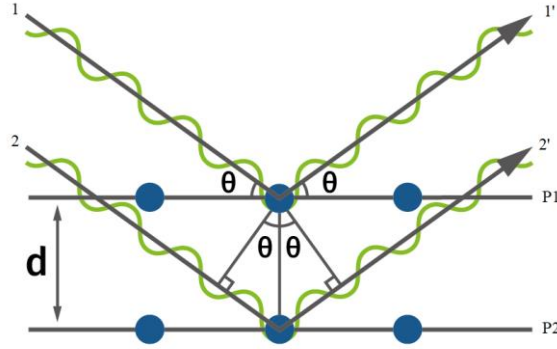


Şekil 23. X-ışını tüpünün şematik gösterimi.

Alternatif elektromanyetik alandaki bir elektron, alanla aynı frekansta salınacaktır. Bir X-ışını bir atoma çarptığında, atomun etrafındaki elektronlar gelen ışınla aynı frekansta salınmaya başlar. Bununla birlikte, bir kristaldeki atomlar düzenli bir şekilde sıralanır. Dalgalar tek fazda olacak ve çeşitli yönlerde numuneyi bırakan iyi tanımlanmış X-ışınları olacaktır. Bu nedenle, sonuçta ortaya gelen kırılan ışın, birbirini karşılıklı olarak takviye eden çok sayıda saçılmış ışınlardan oluşan bir ışın olarak tanımlanabilir.

Uzayda kristal seviyesi, aynı çizgide olmayan üç nokta tarafından belirlenir. Bu üç noktaya miller indisleri (h,k,l) adı verilir. h, k, l indisleri verilen belirli bir düzlem grubu, birim hücrenin a eksenini h kesitlerinde, b eksenini k kesitlerinde ve c eksenini l kesitlerinde kesmektedir. Sıfır, düzlemlerin ilgili eksene paralel olduğunu gösterir.

Bir düzlemsel aralık d ile ayrılmış bir çift paralel düzlemde P_1 ve P_2 üzerinde bir X-ışını kırınımı olayı Şekil 24'te gösterildiği gibi düşünelim.



Şekil 24. X-ışını kırınımının oluşum modeli.

İki paralel X-ışını 1 ve 2, bu düzlemlerle bir açı (θ) yapar. 1' ve 2' ile temsil edilen dalgalar ayrı fazdaysa, yansıyan bir maksimum yoğunlukta ışın ortaya çıkar. Yol uzunluğu 1 ile 1' ve 2 ile 2' arasındaki fark, bir dalgaboyu (λ) olmalıdır. Bragg yasasında bu ilişkiyi matematiksel olarak aşağıdaki denklem ile ifade edebiliriz.

$$2d \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda \quad (5)$$

h, k, l indisleri tarafından tanımlanan olası d -aralığı, birim hücrenin şekli tarafından belirlenir, ondan dolayı Bragg yasasını aşağıdaki denklem gibi yazabiliriz.

$$\sin \theta = \lambda / 2d \quad (6)$$

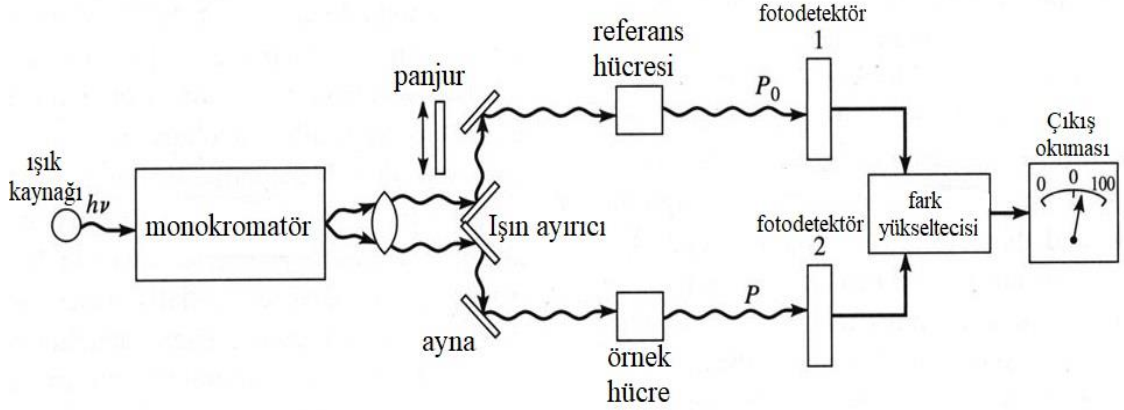
Bu denklemde hücre boyutlarına göre yansımalar olabileceği muhtemel 2θ değerleri belirlenir. Bununla birlikte, yansımaların yoğunluğu, elektronların birim hücredeki dağılımı ile belirlenir. En yüksek elektron yoğunluğu atomların etrafında bulunur. Bu nedenle, yoğunluklar ne tür atomlara sahip olduğumuza ve birim hücrede bulundukları yere bağlıdır. Yüksek elektron yoğunluğuna sahip bölgelerden geçen düzlemler kuvvetli bir şekilde yansıtacak, düşük elektron yoğunluğuna sahip düzlemler zayıf yoğunluklar verecektir.

1.4.3. Optik Spektrofotometre

Spektrofotometri, bir malzemenin yansıma ve geçirme özelliklerinin dalga boyunun bir fonksiyonu olarak nicel ölçümüdür. Spektrofotometri ölçümler spektrofotometrenin kullanmasını içerir.

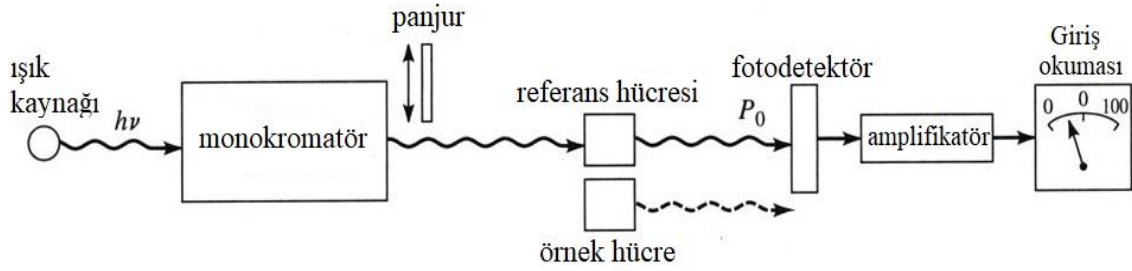
Spektrofotometre, ışık kaynağının dalga boyunun bir fonksiyonu olarak yoğunluğunu ölçer. Bir spektrofotometre, maddelerin geçirgenliğinin veya yansıtmasının ölçümü için yaygın olarak kullanılır. Tarihsel olarak, spektrofotometreler analitik spektrumu üretmek için bir kırınım ızgarası içeren bir monokromatör kullanır, ancak çoğu modern orta-kızılötesi (mid-infrared) spektrofotometre, spektral bilgiyi elde etmek için bir Fourier dönüşüm tekniği kullanır (kızılötesi spektroskopisi). Ultraviyole görünür spektroskopisi veya ultraviyole görünür spektrofotometri (UV/Vis), ultraviyole görünür spektral bölgede absorpsiyon spektroskopisi veya yansıtma spektroskopisi anlamına gelir. Yani bu cihaz görünür ve yakın aralıklarda (UV yakınında ve kızılötesi yakınında (NIR)) ışığı kullanmaktadır.

UV/Vis spektroskopisi rutin olarak, geçiş metal iyonları, yüksek oranda konjuge organik bileşikler ve biyolojik makromoleküller gibi farklı analitlerin kantitatif tayini için analitik kimyada kullanılır. Spektroskopik analiz genellikle çözeltilerde gerçekleştirilir, ancak katı maddeler ve gazlar da incelenebilir. Ultraviyole görünür spektroskopide kullanılan araca UV/Vis spektrofotometre denir. UV/Vis spektrofotometre numuneden (I) geçen ışığın yoğunluğunu ölçer ve numuneden (I_0) geçmeden önce ışığın yoğunluğuyla karşılaştırır. Spektrofotometre kullanımı, fizik, malzeme bilimi, kimya, biyokimya ve moleküler biyoloji gibi çeşitli bilimsel alanları kapsar. İki ana cihaz sınıfı vardır: tek ışıklı ve çift ışıklı cihazlardır. Bir çift ışın spektrofotometresi aşağıdaki Şekil 25'te gösterdiği gibi, iki ışık yolu arasındaki ışık yoğunluğunu karşılaştırır. Birinci yol referans örneği ve diğeri test numunesini içeren bir yoldur.



Şekil 25. Çift ışın spektrometresinin şematik görünümü.

Bir tek ışınlı spektrofotometre aşağıdaki Şekil 26'da gösterildiği gibi, bir test numunesi yerleştirilmeden önce ve sonra, ışının nispi yoğunluğunu ölçer.



Şekil 26. Tek ışınlı spektrofotometrenin şematik görünümü.

1.4.4. Fotoluminesans Spektroskopisi

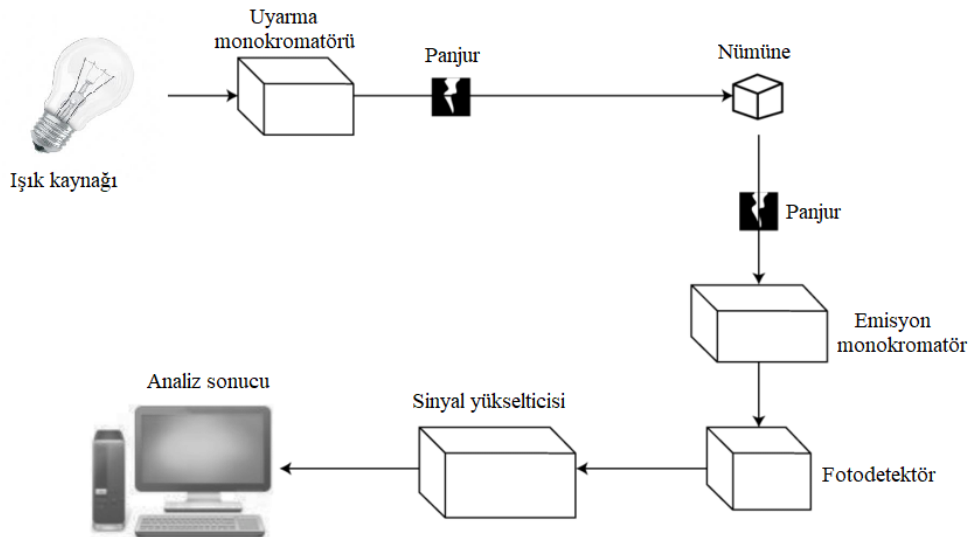
Fotoluminesans spektroskopisi, malzemelerin elektronik yapısını araştırmak için temassız, tahribatsız bir yöntemdir. Işık numuneye yönlendirilirken absorbe edilir ve numune malzemesine fazla enerji verilir. Bu aşırı enerjinin numuneden çıkmasının yolu, ışık yayılması veya lüminesanstır. Işıkla uyarma sonucu olarak fotonun enerjisi, denge durumdaki bir elektrona transfer eder ve elektron uyarılmış duruma geçmektedir.

Bu elektronlar denge durumlarına döndüğünde, fazla enerji açığa çıkar ve ışık salınımını (ışınımlı bir işlem) içerebilir veya içermeyebilir (ışınımsız bir işlem). Yayılan ışığın enerjisi hareket eden elektronun uyarılmış durumu ile denge durumu arasındaki

enerji seviyelerindeki farkla ilgilidir. Enerjinin emilimini ve ardından ışık yayılmasını içeren olaylar genelde fotoluminesans terimi altında sınıflandırılır.

Tüm floresan spektroskopisi üç temel kısım içerir: bir ışık kaynağı, bir örnek tutucu ve bir dedektör. Ek olarak, analitik kullanım için, olay radyasyonunun dalga boyunun seçilebilir olması ve hassas manipülasyon ve sunum yapabilen dedektör sinyali olması gerekir (Şekil 27).

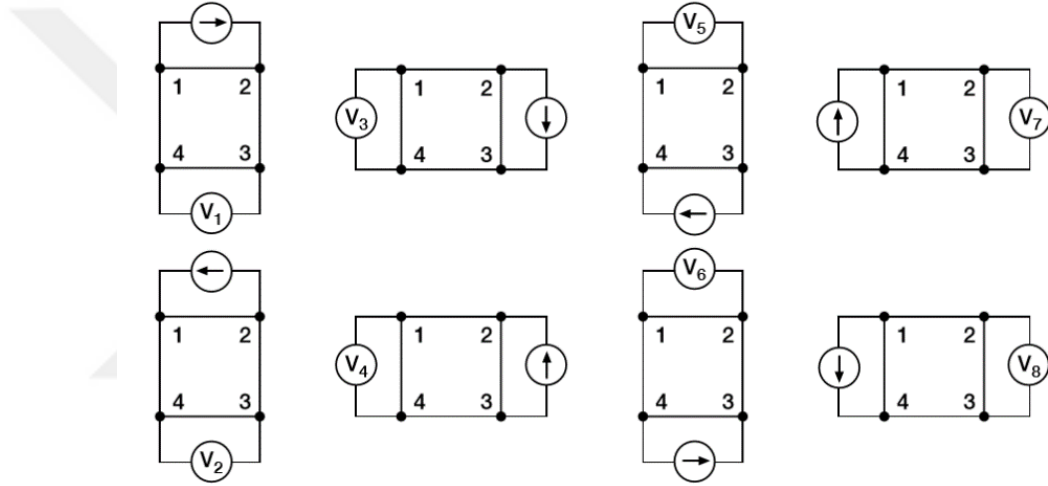
Herhangi bir sabit dalga boyu çiftinde ölçüm yapabilmek için, basit filtre florimetreler tarafından uyarılmış ve yayılan ışığın dalga boyları seçilir. Basit floresans spektrometreleri, numuneden yayılan ışığın spektral dağılımını analiz etmek için bir monokromatör kullanılır. Daha sonra geliştirilen cihazlarda, hem uyarma verici ışık seçimi hem de örnek emisyon analizi için monokromatörler kullanılmıştır. Bu tür malzemeler ayrıca uyarı verici dalga boyuna göre emisyon yoğunluğundaki değişimi yani floresan uyarma spektrumunu ölçebilir. Örnek tarafından yayılan toplam dalga boyu aralığının mümkün olan en yüksek yoğunluklu kaynak ile birlikte toplanmasını sağlayan filtrelerin kullanılmasıyla en yüksek hassasiyeti gerçekleştirir. Uygulamada, tekniğin tam potansiyelini gerçekleştirmek için, sadece küçük yayılan dalga boyları bandı incelenir.



Şekil 27. Floresans spektrometresinin düzeneğinin şematik gösterimi

1.4.5. Van der Pauw Direnç Ölçme Yöntemi

Van der Pauw tekniği yarıiletken endüstrisinde örneklerin öz direncini belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Van der Pauw metodu, bir homojen kalınlıktaki numunenin çevresine dört küçük kontak kullanarak bir akım uygulanıp voltajın ölçümünü içerir. Bu yöntem özellikle çok küçük numuneleri ölçmek için kullanışlıdır, çünkü kontakların geometrik aralıkları önemsizdir. Şekil 28’de gösterildiği gibi bu yöntemi kullanarak, numunenin çevresi etrafında yapılan toplam sekiz ölçümden, direnç elde edilebilir.



Şekil 28. Van der Pauw yönteminde devre bağlantısının şematik görünümü.

Tüm voltaj ölçümleri alındıktan sonra, iki direnç değeri ρ_A ve ρ_B aşağıdaki gibi elde edilir:

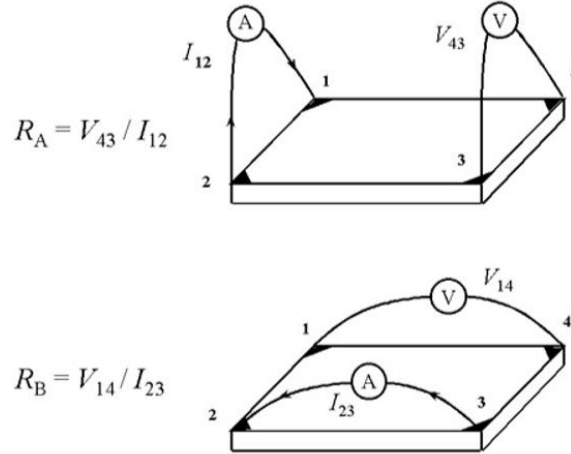
$$\rho_A = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot f_A \cdot t_s \cdot \frac{(V_1 - V_2 + V_3 - V_4)}{4I} \quad (7)$$

$$\rho_B = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot f_B \cdot t_s \cdot \frac{(V_5 - V_6 + V_7 - V_8)}{4I} \quad (8)$$

Üstteki denklemde: ρ_A ve ρ_B ; öz dirençtir (ohm.cm). t_s ; örnek kalınlığı (cm). $V_1 \dots V_8$, voltmetre tarafından ölçülen voltajları. I ; örnekten geçen akımdır (amper). f_A ve f_B , örnek simetrisine dayanan geometrik faktörlerdir. ρ_A ve ρ_B bilindikten sonra, ortalama direnç (ρ_{AVG}) aşağıdaki ifadeye göre belirlenebilir:

$$\rho_{AVG} = (\rho_A + \rho_B)/2 \quad (9)$$

Kareler ve daireler en yaygın Van der Pauw geometrileridir, ancak kontak boyutu ve yerleştirmesi, ölçüm doğruluğunu önemli ölçüde etkileyebilir. Aynı Van der Pauw yönteminde Şekil 29’da farklı ve daha basit bir metodu görebiliriz.



Şekil 29. R_A ve R_B karakterizasyonunun belirlenmesinde kullanılan devre şeması.

Rezistans ölçümlerini elde etmek için, 1 ve 2 kontak noktalarına bir dc akım I uygulanıp ve Şekil 29’da gösterildiği gibi 3 ve 4 kontak noktalarının arasında V_{43} voltajı ölçülür. Daha sonra 2 ve 3 kontak noktalarına bir dc akım I uygulanıp 1 ve 4 kontak noktalarının arasında V_{14} voltajı ölçülür.

R_A ve R_B , aşağıdaki ifadelerle hesaplanır:

$$R_A = V_{43}/I_{12} \text{ ve } R_B = V_{14}/I_{23} \quad (10)$$

Direnç ölçümünün amacı, R_s yüzey direncini belirlemektir. Aşağıdaki Van der Pauw denkleminin göre R_A , R_B ve levha direnci (R_s) arasındaki ilişkiyi gösterir.

$$\exp(-\pi R_A/R_s) + \exp(-\pi R_B/R_s) = 1 \quad (11)$$

Kütleli elektriksel direnç ρ aşağıdaki denkleme göre hesaplanabilir:

$$\rho = R_{s.d} \quad (12)$$

1.5. Kullanılan Malzemenin Özellikleri

1.5.1. Çinko Oksit Özellikleri

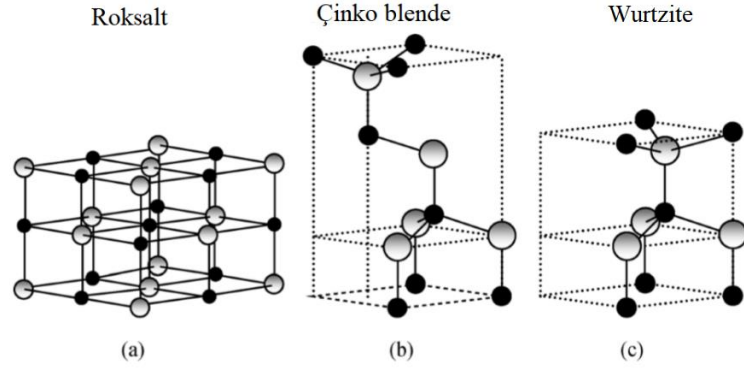
Çinko oksit, ZnO formülüne sahip inorganik bir bileşiktir. Suda çözünmeyen beyaz bir toz şeklindedir. Birçok malzeme ve üründe katkı maddesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Aşağıdaki Tablo 1’de ZnO nun bazı fiziksel özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 1. ZnO’nun bazı fiziksel özellikleri.

Fiziksel Özelliği	Değeri
Molar kütle	81,406 g/mol
Yoğunluk	5,6 g/cm ³
Erime noktası	1,974 °C (3,585 °F; 2,247 K)
Kaynama noktası	1,974 °C (3,585 °F; 2,247 K)
Sudaki çözünürlük	0.0004% (17,8°C)
Kırılma indisi	n ₁ =2,013, n ₂ =2,029
Manyetik duyarlılık (χ)	27,2·10 ⁻⁶ cm ³ /mol
Koordinasyon geometrisi	Tetrahedral
Isı kapasitesi	40,3 J·K ⁻¹ mol ⁻¹
İş fonksiyonu	2,5-3,5 eV

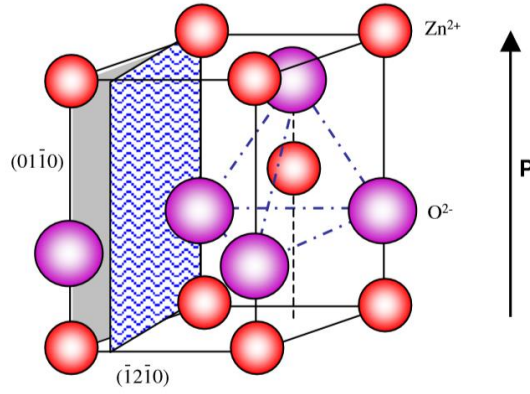
1.5.1.1. ZnO’in Kristal Yapısı

II-VI grubu ikili bileşik yarı iletkenlerinin çoğu, her bir anyonun bir tetrahedronun köşelerinde dört katyon ile çevrili olduğu kübik çinko blende veya hekzagonal wurtzite (Wz) yapısında kristalleşir, sp₃ kovalent bağ bu tetrahedral koordinasyonun nedeni olur, fakat bu malzemeler aynı zamanda bant aralığını arttırma eğiliminde olan önemli bir iyonik karaktere sahiptir. ZnO, kovalent ve iyonik yarıiletkenler arasındaki sınırda bulunan bir II-VI bileşik yarı iletkendir. Şekil 30’da gösterildiği gibi ZnO üç farklı kristal yapıya sahiptir. Bunlar, wurtzit, çinko blende ve rocksalttır. Ortam koşulları altında, termodinamik olarak kararlı faz wurtzit yapısıdır.



Şekil 30. ZnO kristal yapılarının gösterimi: (a) kübik rocksalt , (b) kübik çinko blende ve (c) hekzagonal wurtzite. Gölge gri ve siyah küreler sırasıyla Zn ve O atomlarını belirtir.

Çinko blende ZnO yapısı yalnızca kübik altlıklardaki büyüme ile sabitlenebilir. Ancak rocksalt veya Rochelle tuzu (NaCl) yapısı, GaN’de olduğu gibi nispeten yüksek basınçlarda elde edilebilir. Wurtzit çinko oksit, örgü parametreleri $a = 0,3296$ nm ve $c = 0,52065$ nm olan hekzagonal bir yapıya sahiptir. Wurtzite ZnO yapısının şematik bir gösterimi Şekil 30’da gösterilmektedir. ZnO’nun yapısı basitçe c eksenini boyunca sıralı olarak istiflenen, tetrahedral koordineli O^{2-} ve Zn^{2+} iyonlarından oluşan bir dizi alternatif düzlem olarak tanımlanabilir. ZnO’daki tetrahedral koordinasyon, simetrik yapıya ve dolayısıyla piezoelektriklik ve piroelektrikliğe yol açar. ZnO’nun bir diğer önemli özelliği polar yüzeylerdir. En yaygın kutupsal yüzey bazal düzlemdir. Ters yüklü iyonlar, pozitif yüklü Zn^{+} (0001) ve negatif yüklü O^{-} (000 $\bar{1}$) yüzeyler üretir, anormal dipol momentini ve c eksenini boyunca kendiliğinden kutuplaşma ve yüzey enerjisinde bir sapma ile sonuçlanır. Sabit bir yapıyı korumak için, kutup yüzeyleri genellikle yüzeylere sahiptir veya büyük yüzey yeniden yapılanma operasyonlarını sergiler, fakat $ZnO^{\pm}$ (0001) olağanüstüdürler yani yeniden yapılanma olmadan atomik olarak kararlıdır. $ZnO^{\pm}$ (0001) kutuplu yüzeylerin üstün kararlılığını anlamak için yüzey fiziğinin biliminde büyük çabalar gösterilir. ZnO’nun en çok gözlenen diğer iki yüzeyleri, polar olmayan yüzeyler olan (2 $\bar{1}\bar{1}$ 0) ve (01 $\bar{1}$ 0), bunlar (0001) yüzeylerinden daha düşük enerjiye sahiptir.



Şekil 31. ZnO'nun wurtzite yapı modeli.

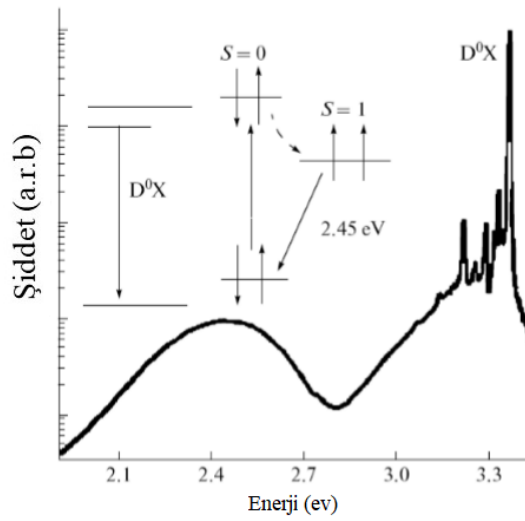
1.5.1.2. ZnO'in Elektriksel Özellikleri

ZnO oda sıcaklığında $\sim 3,3$ eV'lik nispeten büyük bir direkt bant boşluğuna sahiptir. ZnO'nun bant aralığı ayrıca magnezyum oksit veya kadmiyum oksit ile alaşımlanarak $\sim 3-4$ eV'ye ayarlanabilir. ZnO malzemelerinde katkı maddeleri bulunmadığında bile N tipi yarı iletken sayılır. Kontrol edilebilir N-tipi katkılama, Zn'nin Al, Ga, In gibi grup-III elementleri ile ikame edilmesi veya oksijenin grup-VII elementleri klorür veya iyot ile ikame edilmesiyle kolayca gerçekleştirilebilir. ZnO'nun P-tipi katkılması zordur. Bu problem, P tipi katkı maddelerinin düşük çözünürlüğünden ve bunların bol miktarda N tipi safsızlıklar tarafından telafisinden kaynaklanmaktadır. ZnO'nun elektron hareketliliği sıcaklığa göre büyük ölçüde değişir ve 80 K'de maksimum $\sim 2000 \text{ cm}^2/(\text{V.s})$ değerine sahiptir. Delik hareketliliği $5-30 \text{ cm}^2/(\text{V.s})$ aralığındaki değerler almaktadır. Kontrollü N tipi iletkenliği olan ZnO, Schottky diyotlar ve yüksek elektron mobilité transistörleri gibi birçok önemli uygulamaya sahiptir.

1.5.1.3. ZnO'in Lüminesans Özellikleri

Çeşitli yöntemlerle elde edilen ve onlarca nanometreden birkaç santimetreye kadar değişen bir boyuta sahip ZnO kristalleri, N tipi iletkenliğe sahiptir, yani az verici atomlar içerir. Kural olarak, çeşitli ZnO formları iki lüminesans bant sergiler birincisi bant kenarı emisyonunun kısa dalga boylu bir bandı, yani elektron iletim bandının alt kenarından değerlik bandının üst kenarına geçtiğinde aralık enerjisine eşit olan enerji emisyonunu gösteren banttır ve maksimum uzunluğunun genellikle yeşil spektral aralıkta olduğu bir uzun dalga boylu geniş bant Şekil 32'de görülmektedir. Maksimum parlaklığı 3,35 eV

olan ve bozunma süresi $\sim 0,7$ ns olan bant lüminesans kenarı eksitonik bir yapıya sahiptir. Yeşil lüminesans söz konusu olduğunda, çok sayıda araştırmaya rağmen, doğası henüz anlaşılmamıştır. Aşağıdaki lüminesans merkezlerinin yeşil lüminesansın sorumlu olduğu varsayılmıştır: safsızlık Cu^{2+} iyonları, Zn boşluk kusurları V_{Zn} , oksijen boşluk kusurları V_{O} , çinko iyonların arayer kusurları Zn_i , oksijen antisitleri ve $\text{Zn}_i \rightarrow \text{V}_{\text{Zn}}$ geçişleri, Sonuç olarak, araştırmacılar, aynı anda çeşitli merkezlerin yeşil lüminesans dahil olabileceği sonucuna varmıştır.



Şekil 32. ZnO kristalinin fotolüminesans spektrumu ve elektronik geçiş modeli.

1.5.2. Ag Özellikleri

Gümüş, Ag sembolü ve 47 atom numaralı kimyasal bir elementtir. Gümüşün 47 elektronu $4d^{10}5s^1$ konfigürasyonunda düzenlenmiştir. Gümüş, yüzey merkezli kübik kafeste kristalleşir ve gümüşteki metalik bağlar kovalent bir karakterden yoksundur ve nispeten zayıftır. Bu olay, tekli gümüş kristallerinin düşük sertlik ve yüksek sünekliğini açıklar. Son yörüngedeki serbest tek elektron varlığın nedeniyle 11. grubun elementleri çok yüksek elektriksel ve termal iletkenliğe sahiptir. Aşağıdaki Tablo 2’de gümüşün bazı fiziksel ve elektriksel özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 2. Gümüşün bazı fiziksel özellikleri.

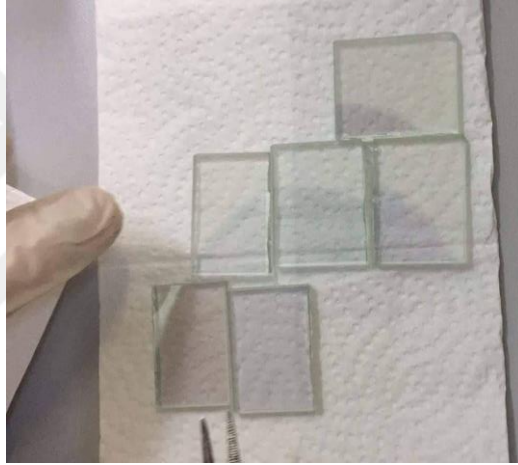
Fiziksel Özelliği	Değeri
Molar kütle	107,9 g/mol
Yoğunluk	10,94 g/cm ³
Erime noktası	961,7 °C (1763 °F; 1234 K)
Kaynama noktası	2162 °C (3924 °F; 2435 K)
Buharlaştırma ısısı	254 kJ/mol
Termal genleşme	18,9 µm/(m-K)
Termal iletkenlik	429 W/(m-K)
Elektriksel direnç	15,87 nΩ-m (20 °C)
Manyetik alınganlık	-19.5,10-6 cm ³ /mol (296 K)
İş fonksiyonu	4,26 – 4,74 eV

Son yıllarda, bulk malzemelerin özelliklerinden farklı olan eşsiz optik, elektriksel ve mekanik özelliklerinden dolayı gümüş (Ag) ince filmlerin uygulama sayısında artış olmuştur. Ag ince filmler ayrıca, özellikle de görünür aralıktaki yüksek şeffaflık ve nötr renklerinden dolayı optik uygulamalarda yaygın olarak uygulanmıştır. Ayrıca, spektrumun yakın kızılötesi (IR) ve IR bölümlerinde son derece yüksek yansıtıcılık sergilerler. Gümüş, düşük yüzey direnci (oda sıcaklığında 1,57 µΩ-cm) ve ısıl kararlılığı nedeniyle mikroelektronik cihazlarda kontak metalizasyonu olarak kullanılır. Magnetron püskürtme ve buharlaştırma gibi Ag ince filmlerini büyütmek için çeşitli biriktirme teknikleri vardır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Altlıkların Hazırlanması

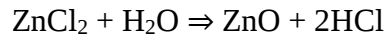
Bu tez çalışmasında altlık olarak saf ve SnO₂ kaplı iletken camlar kullanıldı. Altlıkların temizlenmesi başlamadan önce numuneler 2 cm x 3 cm boyutlarında kesildi ve daha sonra ultrasonik cihaz içinde sırası ile 5 dakika saf su, 5 dakika etanol ve tekrar 5 dakika boyunca saf su ile temizlendi. Altlıklar 1 saat boyunca 70 °C kurutulup hazır hale geldi. Aşağıdaki Şekil 33 temizleme işlemi yapılmış hazır cam altlıkları göstermektedir.



Şekil 33. Kaplama için hazır cam altlıklar.

2.2. Püskürtme Metodu ile ZnO İnce Film Üretimi

0,15 M ZnO çözeltisi hazırlamak için, aşağıdaki kimyasal reaksiyona göre 250 ml saf suya 5,11 g çinko klorür tuzu (ZnCl₂, Aldrich,% 98 saflıkta) eklendi.



Çözelti hesaplamaları aşağıdaki denkleme uygun olarak yapıldı.

$$m = M.C.V \quad (13)$$

M ; Molekül ağırlığı (g/mol)

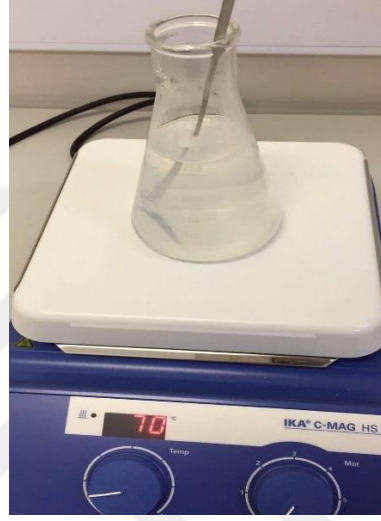
C: Molekül konsantrasyon (g/mol)

V: Çözelti hacmi (ml)

Ana çözeltiyi hazırlamak için 5,11 gr $ZnCl_2$ tuzu hassas elektronik terazi ile tartıldı. Elde edilen çözelti 70 °C derecede 20 dk boyunca manyetik karıştırıcı yardımıyla karıştırıldı (Şekil 34).



(a)



(b)

Şekil 34. Ana çözeltiyi hazırlamak için kullanılan cihazlar a) elektronik terazi – b) manyetik karıştırıcı.

Püskürtme işlemi Şekil 35’de verilen püskürtme düzeneği ile gerçekleştirdi. Hazırlanan çözelti, 325 °C’de ısıtılmış cam yüzeylere püskürtüldü. Altlık sıcaklığı, krom-alümel termoçifti kullanılarak izlendi. Püskürtme başlığı ile altlık arasındaki mesafe 50 cm’ye, püskürtme açısı 60° ve püskürtme hızı ise 5 ml/dak’da ayarlandı. Bu uygulamada ince film büyüme hızı dakikada 50 Å olarak sağlandı.



Şekil 35. Püskürtme işleminde kullanılan düzenek.

Elde edilen ZnO ince filmlerin kristal yapılarının sıcaklığa bağlı olarak davranışlarının tespiti için cam ve SnO₂ altlıklar yüzeyinde elde edilmiş örnekler 30 dk süreyle oda ortamında 3 farklı sıcaklık değerlerinde tavlandı (350, 375 ve 400 °C). Tavlama işlemleri aşağıda verilen şekil 36'deki Protherm markalı yatay tüp fırın ile gerçekleştirildi.



Şekil 36. Tavlama işlemini gerçekleştiren cihaz.

Şekil 37’de gösterilen Rigaku-SmartLab marka-model X-ışını kırınım cihazı yardımıyla hazırlanan ZnO filmlerin kristal yapılarının ve fazlarının tespiti yapıldı.



Şekil 37. Rigaku marka SmartLab X-ışını difraktometresi.

Numunelerin yüzey özelliklerini belirlemek için Şekil 38’de gösterilen Jeol JSM 6610 marka-model taramalı elektron mikroskobu kullanıldı.



Şekil 38. JEOL marka JSM-6610 model taramalı elektron mikroskobu.

SpectraMax marka M5 model spektrofotometre cihazı ile filmlerin optiksel ve fotolüminesans özellikleri karakterize edildi. Şekil 39’de kullanılan fotolüminesans spektroskopisi gösterildi.



Şekil 39. SpectraMax marka M5 model spektrofotometre cihazı.

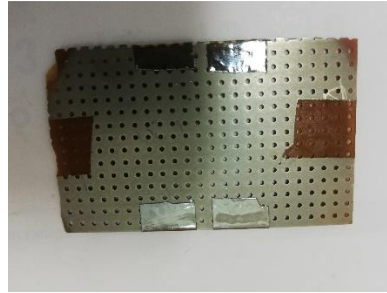
2.3. Ag Buharlaştırması

Aşağıdaki Şekil 40’da gösterilen Vaksis PVD handy/1DLE-LN model cihaz yardımıyla yüksek vakum altında (10^{-5} Torr) Ag buharlaştırıldı. Buharlaştırma işlemleri iki farklı (300 ve 200 K) altlık sıcaklıklarında yapıldı.



Şekil 40. Buharlaştırma işleminde kullanılan düzenek.

ZnO ince filmler yüzeyine Ag buharlaştırılırken çapları 1 mm olan maske kullanıldı. Böylece elde edilen diyotların eşit alanlı olması sağlandı. Şekil 41’de bu işlemde kullanılan maskenin görüntüsü verildi.



Şekil 41. Schottky diyot oluşumunda kullanılan maske.

300 K altlık sıcaklıklarında üretilen ikili yapılara 400 °C sıcaklıkta 30 dakika termo diffüzyon işlemi uygulanırken 200 K altlık sıcaklığında üretilen ikili yapılara 354 nm dalga boyunda UV ışınları altında 1 saat süre ile fotouyarmalı difüzyon işlemi uygulandı.

Şekil 42’de 200 K altlık sıcaklığında elde edilen Ag/ZnO ikili yapılarda geçidin oluşumu için fotouyarmalı difüzyon sürecinin gerçekleştirilmesinde kullanılan UV ışın kaynağı verildi.



Şekil 42. CAMAG marka ultraviyole cihazı.

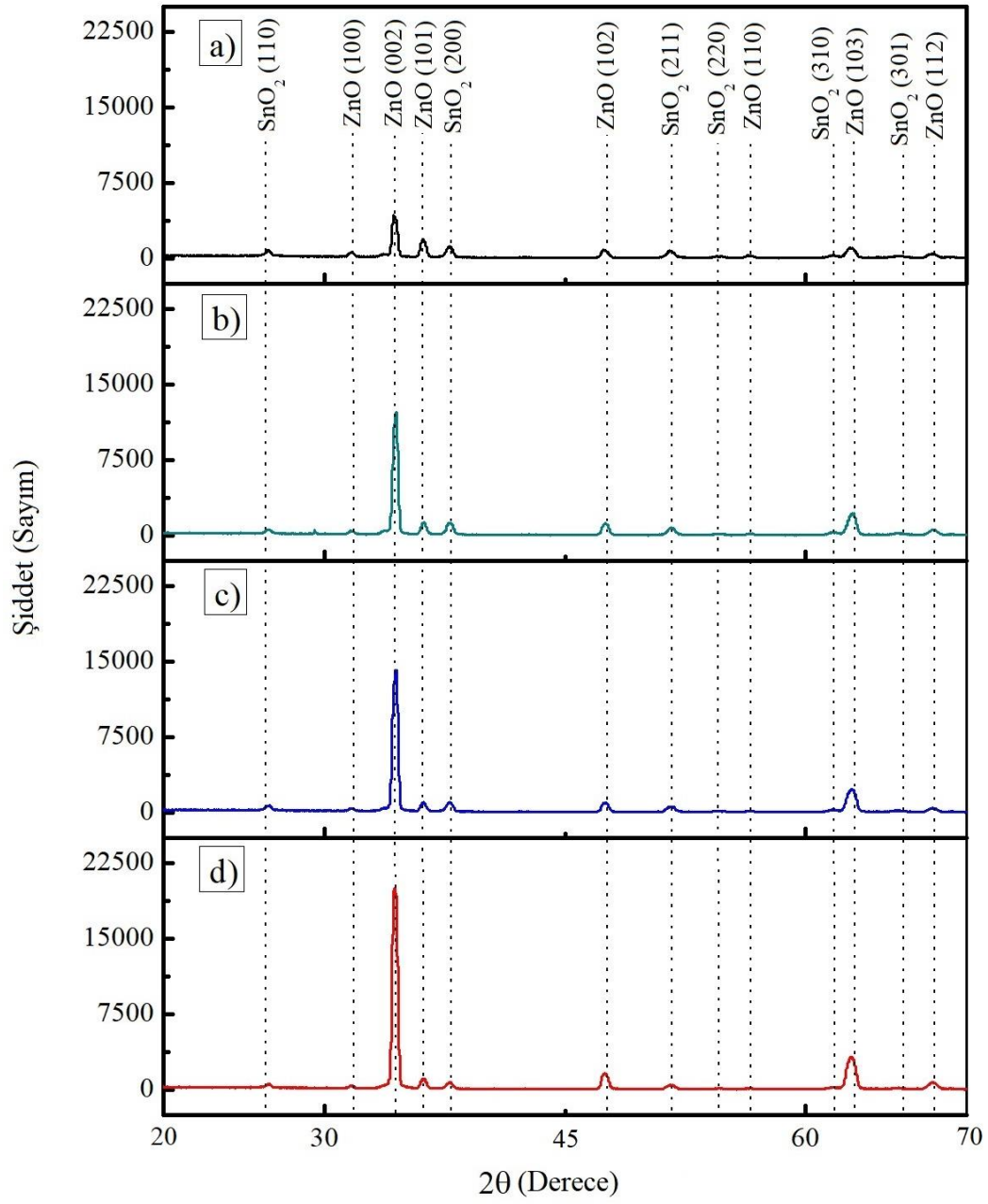
3. BULGULAR

3.1. ZnO Filmlerin XRD Analiz Sonuçları

X ışını kırınım sonuçları oda sıcaklığında dalga boyu $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ olan Cu-K α ışınları yardımıyla, 40 kV ve 30 mA altında kaydedildi. Tarama sürekli modda yapıldı ve adım genişliği $0,02^\circ$ tutuldu. Şekil 43'te ZnO ince filmlerin X-ışınları kırınım sonuçları gösterildi.

Şekil 43'te görüldüğü gibi XRD desenleri, üretilen filmlerin c eksenine doğrultusunda (002) düzleminde büyüdüğünü göstermektedir. Ayrıca, bu kırınım desenlerinde tavlamanın etkisi ile başka herhangi bir safsızlıklardan kaynaklanan yansımalar raslanmamaktadır.

Şekil 43'te Bragg açılarının $31,68^\circ$, $34,44^\circ$, $36,16^\circ$, $47,43^\circ$, $56,44^\circ$, $62,74^\circ$, $67,94^\circ$ değerlerinde sırayla (100), (002), (101), (102), (110), (103) ve (201) düzlemlerinden yansımalar görülmektedir. (JCPDS 36-1451) numaralı XRD kartına göre ZnO ince filmlerin wurtzite (hekzagonal) yapıya sahip olduğu tespit edildi. Bununla birlikte tavlama sıcaklığı arttıkça, tüm kırınım piklerinin yansıma şiddetlerinde artışların olduğu görüldü. XRD desenlerinden görüldüğü üzere 400°C tavllanmış ZnO örnek en yüksek yansıma şiddeti göstermektedir. Bunun bir sonucu olarak bu örneğin diğer örneklerle kıyasla daha yüksek kristalleşme derecesine sahip olduğu anlaşıldı.



Şekil 43. SnO₂ kaplı cam yüzeyinde büyütülen ZnO ince filmin X-ışını kırınımı, a) Tavlanmamış numune, b) 350 °C, c) 375 °C ve d) 400 °C sıcaklıklarında tavlanan numuneler.

Aşağıda verilen denklemler, (002) ve (103) piklerinin verileri kullanılarak üretilen ZnO ince filmlerin örgü parametreleri (a , c) ve kafes hacmi (V) hesaplandı ve sonuçlar Tablo 3'te verildi.

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (14)$$

$$V = \frac{\sqrt{3}}{2} a^2 \cdot c \quad (15)$$

Aşağıdaki denklem ile ifade edilen Bragg yasası uygulanarak üretilen numunelerde düzlemler arasında aralık değerleri hesaplandı ve Tablo 3'te verildi.

$$\lambda = 2d_{hkl} \cdot \sin\theta \quad (16)$$

Burada;

d_{hkl} : Üretilen numunelerde düzlemler arasındaki mesafe

λ : X ışınları dalga boyu

θ : Bragg açısı

Tablo 3. SnO₂/ZnO ince filmin yapısal analizinden hesaplanan parametreler.

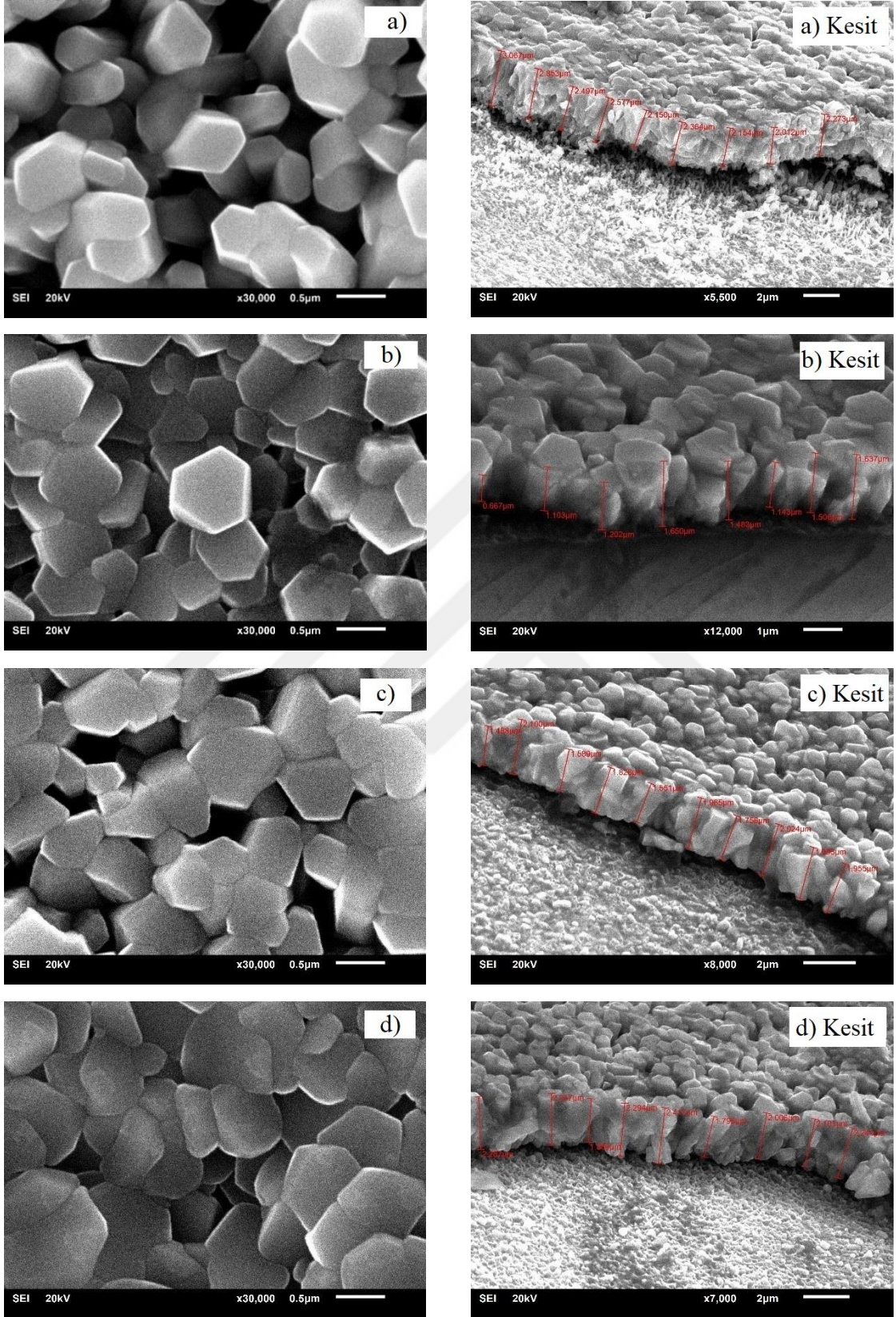
Sıcaklık (°C)	2θ (deg)	hkl	dhkl (Å)	Örgü parametreleri
Tavlammamış ZnO	31,5	100	2,83	$a = 3,20 \text{ Å}$
	34,4	002	2,60	
	36,1	101	2,48	$c = 5,20 \text{ Å}$
	47,4	102	1,91	
	56,5	110	1,62	
	62,8	103	1,47	$V = 46,1 \text{ Å}^3$
	67,8	112	1,38	
350	31,6	100	2,82	$a = 3,23 \text{ Å}$
	34,4	002	2,59	
	36,1	101	2,48	$c = 5,18 \text{ Å}$
	47,5	102	1,91	
	56,4	110	1,63	
	62,8	103	1,47	$V = 46,8 \text{ Å}^3$
	67,8	112	1,38	
375	31,6	100	2,82	$a = 3,23 \text{ Å}$
	34,4	002	2,59	
	36,1	101	2,48	$c = 5,18 \text{ Å}$
	47,5	102	1,91	
	56,4	110	1,63	
	62,7	103	1,47	$V = 46,8 \text{ Å}^3$
	67,8	112	1,38	
400	31,6	100	2,82	$a = 3,28 \text{ Å}$
	34,4	002	2,60	
	36,1	101	2,48	$c = 5,20 \text{ Å}$
	47,4	102	1,91	
	56,4	110	1,63	
	62,8	103	1,47	$V = 46,1 \text{ Å}^3$
	67,7	112	1,38	

Tablo 3'te görüldüğü üzere hesaplanan örgü parametreleri literatürdeki değerler ($a = 3,296 \text{ Å}$ ve $c = 5,2065 \text{ Å}$) ile kıyaslandığında hekzagonal yapıya sahip n-ZnO filmlerin örgü parametreleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Bununla birlikte bu tabloda tavlama sıcaklığının etkisi ile üretilen ZnO filmlerde kafes hacim değerleri sabit kalmaktadır. Bu çalışmada elde edilen ZnO, X ışın kırınım sonuçları eski çalışmalardaki sonuçlara uyumludur. Küçükömeroğlu vd. (2019) tarafından yapılan benzer çalışmaya göre ZnO ince filmlerin örgü parametreleri ve kristal yapısı için çok yakın değerler rapor edilmiştir.

3.2. ZnO İnce Filmlerin SEM Sonuçları

Şekil 44’de cam yüzeyinde püskürtme metodu ile hazırlanan ZnO filmlerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri verildi. SEM görüntülerinden elde edilen filmlerin gözenekli bir yüzey morfolojisine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Görüntüler saf ZnO ince filminin mikro çubuklu yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca SEM görüntülerinden, tavlama etkisi ile ZnO çubuklarının genişliğinde artışların olduğu ve bunun bir sonucu olarak mikro çubuklar arasında boşlukların küçüldüğü görülmektedir. Ayrıca tavlama sıcaklığı arttıkça üretilen ZnO yüzeylerinde homojenlik durumu oluşmaya başlar. Bu sonuç tavlama işleminden beklenen kristal çubuk genişliğinin artması ve daha düzenli bir film öngörüşüyle uyumlu olmaktadır. Bu sonuç XRD sonuçları ile örtüşmekte ve Aljwafi vd. (2018) tarafından yapılan çalışmanın sonuçları ile uyumlu olmaktadır. Aljwafi çalışmasında, ZnO nanoparçacıkları sol-gel yöntemi ile üretilmiş ve farklı sıcaklıklarda (200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C) tavlannmıştır. Tavlama sıcaklığının artmasıyla tanecik boyutlarının artması rapor edilmiştir.

SEM görüntülerinden ortalama çubuk genişliğinin 0,5-1,2 µm değerlerinde olduğu tespit edildi. 30 dakika püskürtme süresinde elde edilen filmlerin ortalama kalınlık değerleri Tablo 4’te verildi.



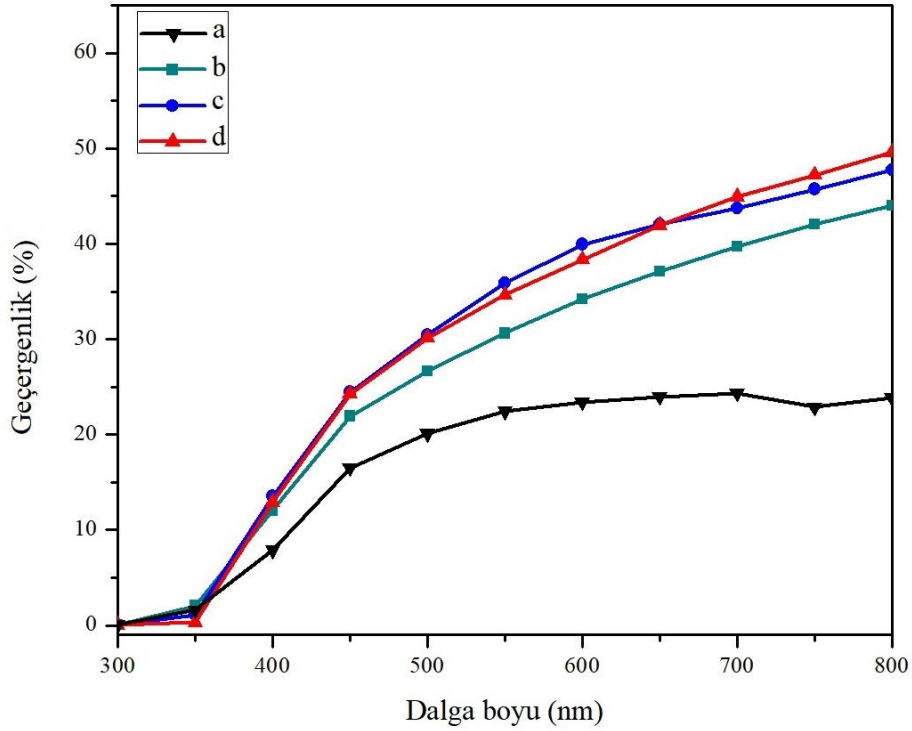
Şekil 44. Üretilen ZnO ince filmin SEM görüntüsü, a) Tavlanmamış numune, b) 350 °C, c) 375 °C ve d) 400 °C sıcaklıklarında tavlanan numuneler.

Tablo 4. SEM görüntülerinden hesaplanan ZnO filmlerin ortalama kalınlıkları.

Tavlama sıcaklığı (°C)	Tavlama sıcaklığı (°C)	Tavlama sıcaklığı (°C)	Tavlama sıcaklığı (°C)	Tavlama sıcaklığı (°C)
Tavlama sıcaklığı (°C)	Tavlama sıcaklığı (°C)	Tavlama sıcaklığı (°C)	Tavlama sıcaklığı (°C)	Tavlama sıcaklığı (°C)
Film ortalama kalınlığı (µm)	2,60	1,82	1,98	2,05

3.3. Optik Sonuçlar

Örneklerin SpectraMax marka M5 model spektrofotometre cihazı yardımıyla, 300-800 nm dalga boylarında, oda sıcaklığında, optik geçirgenlik ölçümleri yapıldı. Şekil 45'te, ZnO ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları verildi. Şekilden görüldüğü gibi tavlama sıcaklığının artmasıyla optik geçirgenlik artmaktadır. Bu olay, tavlama sıcaklığı artmasıyla örneklerin daha iyi kristalleşmeye ve düşük kusur yoğunluğuna sahip olması ile açıklanabilir (Fallah vd., 2007).

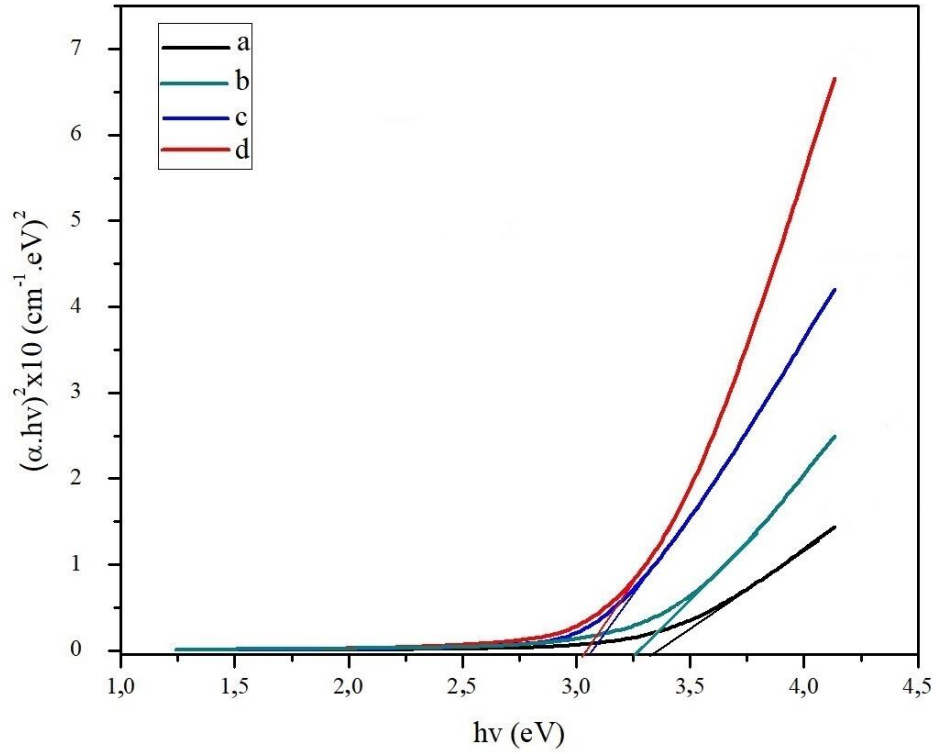


Şekil 45. ZnO ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları, a) Tavlama sıcaklığı 300 °C, b) 350 °C, c) 375 °C ve d) 400 °C sıcaklıklarda tavlama yapılmış numuneler.

Yasak band aralığını belirlemek için aşağıdaki denklem kullanıldı.

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (17)$$

Burada E_g ; numunenin yasak bant aralığı, A ; malzemenin kırılma endeksine bağlı bir parametredir. Şekil 46'de foton enerjisinin ($h\nu$) bir fonksiyonu olarak $(\alpha h\nu)^2$ 'nin grafiği verildi. Bu grafiğin doğrusal kısmının x eksenini ile kesiştiği nokta direkt bant enerji aralığının değerini vermektedir.



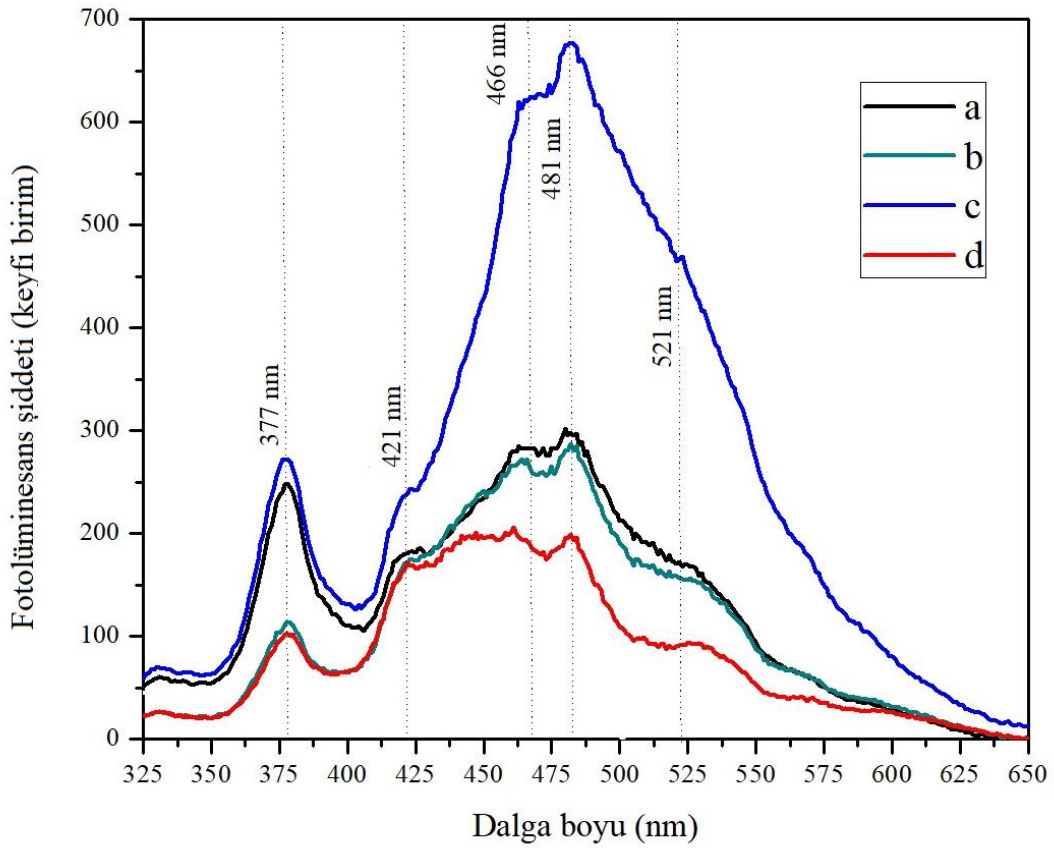
Şekil 46. ZnO ince filmlerin soğurma spektrumları, a) Tavlanmamış numune, b) 350 °C, c) 375 °C ve d) 400 °C sıcaklıklarında tavlanan numuneler.

Şekil 46'da tavlansız ZnO ve 350 °C, 375 °C, 400 °C sıcaklıkta tavlansız ZnO filmlerin enerji bant aralığı sırasıyla 3,30, 3,25, 3,06 ve 3,03 eV bulunmuştur. Gençyılmaz vd. (2012) yaptıkları benzer bir çalışmada, tavlansız ZnO ve 400 °C, 500 °C, 550 °C sıcaklıkta tavlansız ZnO ince filmlerin enerji bant aralıklarını sırasıyla 3,21, 3,13, 3,15 ve 3,18 eV olarak hesaplamışlardır. Benramache vd. (2013) yaptığı çalışmada ZnO ince filmler, farklı molarite değerlerinde kimyasal püskürtme yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Elde edilen ZnO ince filmlerin enerji bant aralığı 3,08-3,37 eV değerleri arasında değiştiği rapor edilmiştir. Böylece bulunan enerji bant aralığı değerleri benzer çalışmalardaki değerler ile uyum içinde olduğu görülmüştür. Tavlama sıcaklığının artmasıyla enerji bant aralığı değerlerinde küçülmeler gözlemlendi. Enerji bant

aralıklarındaki değişimler SEM görüntülerinden de görüldüğü gibi sıcaklığının artışı ile ZnO nanoçubuklarının genişliklerindeki artışlarla açıklanabilir (Ghosh., 2007).

3.4. Fotolüminesans Ölçümleri

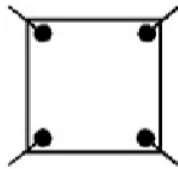
ZnO ince filmlerin fotolüminesans ölçümleri oda sıcaklığında 300 nm dalga boylu UV ışığı ile uyarılarak yapıldı. Elde edilen sonuçlar Şekil 47’de verildi. Görüldüğü üzere ZnO filmleri 5 farklı dalga boylarında emisyon pikleri göstermektedir. Bunlar sırası ile 377 nm, 421 nm, 466 nm, 481 nm ve 521 nm dalga boylarıdır. 377 nm’de bulunan emisyon piki, elektronların iletim bandının alt seviyesinden valans bandın üst seviyesine geçmesiyle oluşmaktadır. Bu geçiş mekanizması genelde yakın bant kenarı emisyonu olarak adlandırılmaktadır (Khan vd., 2011). 422 nm’de bulunan emisyon pikleri ise oksijen boşluklarının donör özelliğinden (V_O), veya çinko’nun yerine geçen oksijenin akseptör özelliğinden kaynaklanmaktadır (Li vd., 2005). 466 nm’de ve 485 nm’de bulunan emisyon pikleri ise arayer çinko kusurlarından (noktasal kusur) Zn_i ’den oluştuğu çalışmalarda rapor edilmektedir (Khokhra vd., 2017). 521 nm’de bulunan emisyon piki yapı yüzey durumlarında oksijen boşluklarına hapsedilen iyonize olmuş elektronların deliklerle rekombinasyonundan meydana gelmektedir (Raji vd., 2017). Aşağıdaki şekilde tavlama sıcaklığı artmasıyla bantların konumunda değişimler olmaksızın nispeten fotolüminesans emisyonunun şiddetinde azalmalar görülmektedir. Tavlama sıcaklığı artması ile ZnO çubukların büyümesi, yüzeye daha uzak olmasına neden olur ve böylece yüzeydeki fotouyarma ile üretilen deliklerin yakalanma hızını azalttırır ve bu da emisyon yoğunluğunun azalmasına neden olur. Ayrıca emisyon şiddetinin azalması, bazı ışımaz geçişlerden oluşan elektron-boşluk çiftlerinin yeniden birleşmesi olayı ile açıklanabilir (Raji vd., 2017).



Şekil 47. ZnO filmlerin fotoluminesans spektrumları, a) Tavlanmamış numune, b) 350 °C , c) 375 °C ve d) 400 °C sıcaklıklarında tavlanan numuneler.

3.5. ZnO'in Özdirenç Ölçümleri

Elde edilen tavllanmış ve tavlınmamış ZnO filmlerin özdirenç ölçümleri Van der Pauw metodu ile oda sıcaklığında yapıldı. Bu deneyde her numune köşelerinde (99,99%) indiyum tel yardımıyla şekil 48'deki gibi dört kontak konuldu.



Şekil 48. Van der Pauw metodu ile direnç ölçümünün şematik görünümü.

ZnO filmlerin özdirenç değerleri aşağıdaki denklemden hesaplandı ve elde edilen sonuçlar Tablo 5'te verildi.

$$\rho = R \cdot d \quad (18)$$

Burada d ; Film kalınlığı

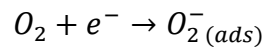
R ; Film direnci

ρ ; Film özdirenci

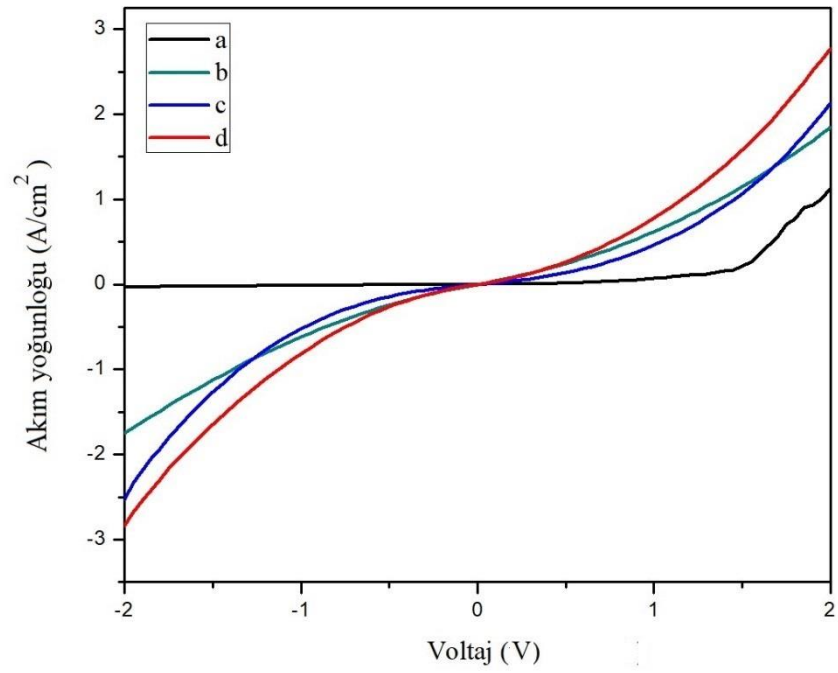
Tablo 5. ZnO filmlerin direnç ve özdirenç değeri.

Tavlama sıcaklığı (°C)	Direnç (M Ω)	Özdirenç (Ω -cm)
Tavlanmamış ZnO	1,05	$4,4 \times 10^4$
350	0,40	$1,6 \times 10^4$
375	0,18	$7,2 \times 10^3$
400	0,17	$6,8 \times 10^3$

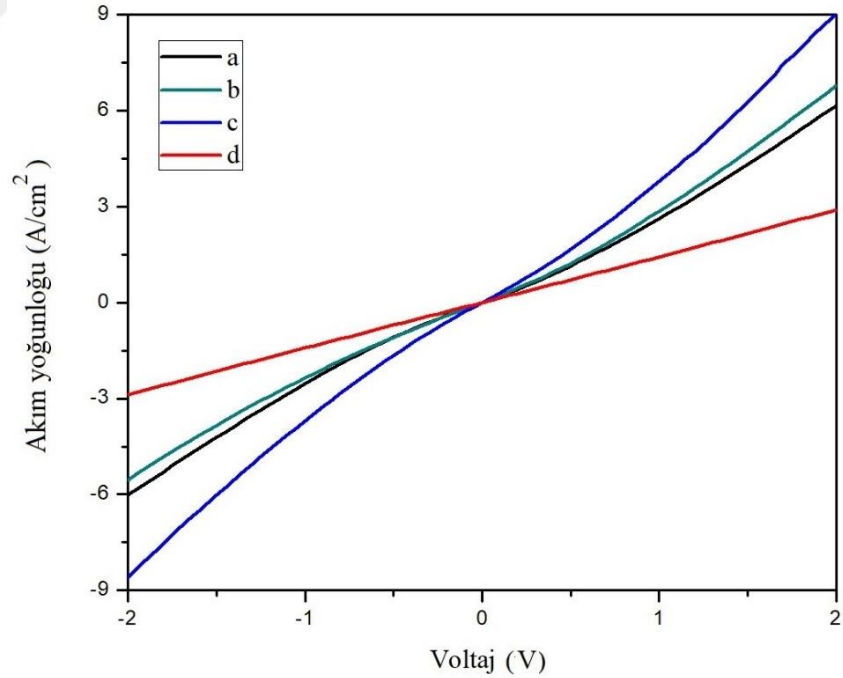
Tablo 5'ten görüldüğü üzere tavlamanın etkisi ile örneklerin özdirenç değeri küçülmektedir. Sıcaklığın etkisi ile özdirenç değeriindeki düşüşler kristal yapıda mikro çubukların genişliklerindeki artışlarla açıklanabilir. Bununla birlikte literatürde ve bazı çalışmalarda elektriksel iletkenliğin değişiminde farklı yorumlar yapılmıştır. Lupan vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, ZnO filminin hava ortamında tavlama durumunda yüzeyel bölgede bulunan oksijen boşluklarına (V_o) oksijen atomlarının adsorbe edilmesi ile ZnO yapısında var olan serbest elektronların yakalanmasının gerçekleşmesi rapor edilmektedir. Oksijen boşluklarına yakalanmış oksijen atomları aşağıda verilen reaksiyona uygun olarak negatif yüklü iyonla dönüştürmektedir.



Bu sürecin gerçekleşmesi durumunda yüzeye yakın bölgede enerji spektrumlarında bükülmeler meydana gelmektedir. Enerji diyagramlarındaki bükülmeler elektriksel iletkenlik değerlerini etkilemektedir. Bizim çalışmada tavlama sıcaklığına bağlı olarak ZnO örneklerinde elektriksel iletkenlik değeriinde artışlar görülmektedir. Bunun nedeni üretilen ZnO filmlerde oksijen boşluklarının yeterince olmamasıdır. Tabatabaei vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada ZnO ince filmleri sol-jel yöntemi ile cam altlık üzerinde biriktirilmiştir. Üretilen ZnO filmler 275 °C sıcaklıkta 10 dakika boyunca ısıtılmış, sonra 350 °C, 450 °C ve 550 °C'de 80 dakika süre ile tavlama yapılmıştır. Elde edilen ZnO filmlerin özdirençleri ölçülmüş ve ($0,282 \times 10^4$ - $1,319 \times 10^1 \Omega$ -cm) aralığında



Şekil 50. 200 K altlık sıcaklığında Ag buharlaştırarak üretilen ve fotouyarmalı difüzyon sürecine tabi tutulan Schottky diyotlarının (J-V) karakterizasyonu. a) Tavlanmamış $\text{SnO}_2/\text{ZnO}/\text{Ag}$, b) 350 °C, c) 375 °C ve d) 400 °C sıcaklıklarında tavlanan $\text{SnO}_2/\text{ZnO}/\text{Ag}$.



Şekil 51. 300 K altlık sıcaklığında Ag buharlaştırılarak üretilen ve 400 °C sıcaklıkta 30 dak. tavlanan Schottky diyotlarının (J-V) karakterizasyonu. a) Tavlanmamış $\text{SnO}_2/\text{ZnO}/\text{Ag}$, b) 350 °C, c) 375 °C ve d) 400 °C sıcaklıklarında tavlanan $\text{SnO}_2/\text{ZnO}/\text{Ag}$.

Şekil 50’da 200 K altlık sıcaklığında üretilen ve fotouyarmalı difüzyon sürecine tabi tutulan diyotların (J-V) karakteristikleri verildi. Şekilden görüldüğü üzere tüm diyotlar doğrultucu özellik göstermektedir. Bununla birlikte temel katmanı (ZnO) tavlanmamış SnO₂/ZnO/Ag diyodun daha yüksek doğrultucu özellikli olduğu ve diğer örneklerle kıyasla daha düşük idealite faktörüne sahip olduğu görülmektedir (Tablo 6). Şekil 51’de ise 300 K altlık sıcaklığında üretilen ve termouyarmalı difüzyon sürecine tabi tutulan SnO₂/ZnO/Ag diyotlar doğrultucu özellikli olmadıkları ve Tablo 6’da daha yüksek idealite faktörlerine sahip oldukları görülmektedir.

Bu davranış, çinko oksidin mikroçubuk yapılı filmlerde yüzey kusurlarının varlığı veya metal/yarıiletken arayüzünde meydana gelen bariyer homojensizliği ile açıklanabilir.

Diyodun doğru akımın aşağıdaki ifade ile hesaplanabilir.

$$I = I_o \exp \left(\frac{qv}{2nkt} \right) \left[1 - \exp \left(- \frac{qv}{2nkt} \right) \right] \quad (19)$$

Burada V uygulanan voltaj, q elektron yükü ve I_o ters doyma akımıdır. Doyma akımının (I_o) değerleri yarı-logaritmik ileri besleme durumunda I-V eğrilerinin doğrusal bölgesinin sıfır uygulanan gerilime ekstrapolasyonu ile bulunur ve aşağıdaki denklemle ifade edilir.

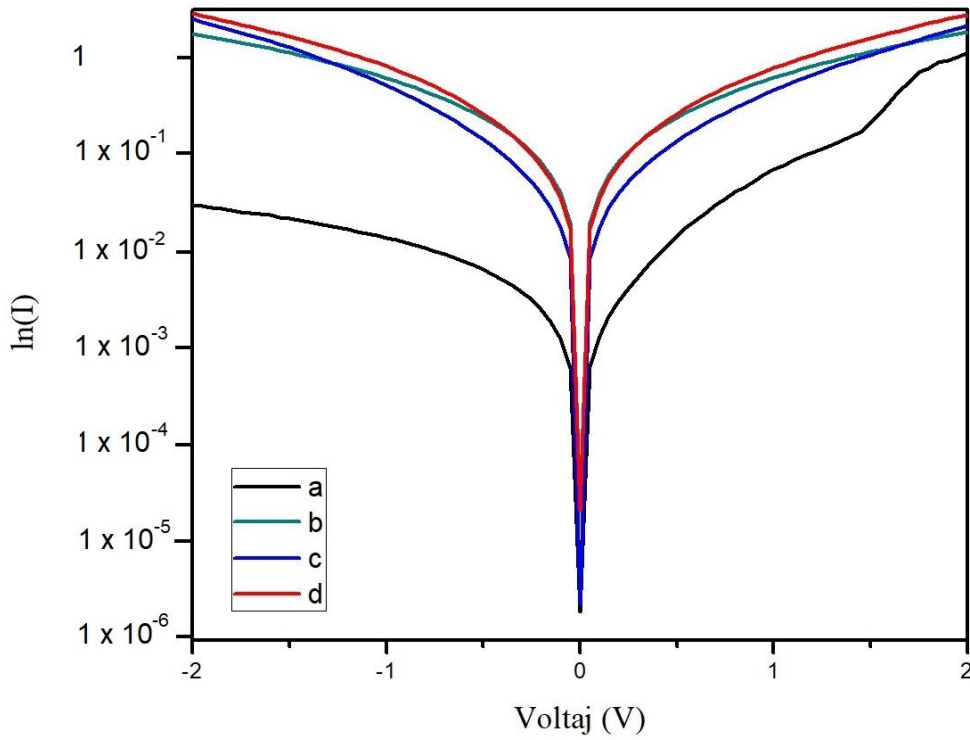
$$I_o = AA^*T^2 e^{\phi_b/kT} \quad (20)$$

Burada A* etkili Richardson sabiti (N tipi ZnO için 32 A/cm²K²), A etkili diyot alanı, T kelvin cinsinden sıcaklık, k Boltzman sabiti, ϕ_b etkin bariyer yüksekliği ve n idealite faktörüdür. İdealite faktörü hesaplamak için aşağıda verilen denklem kullanıldı.

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (21)$$

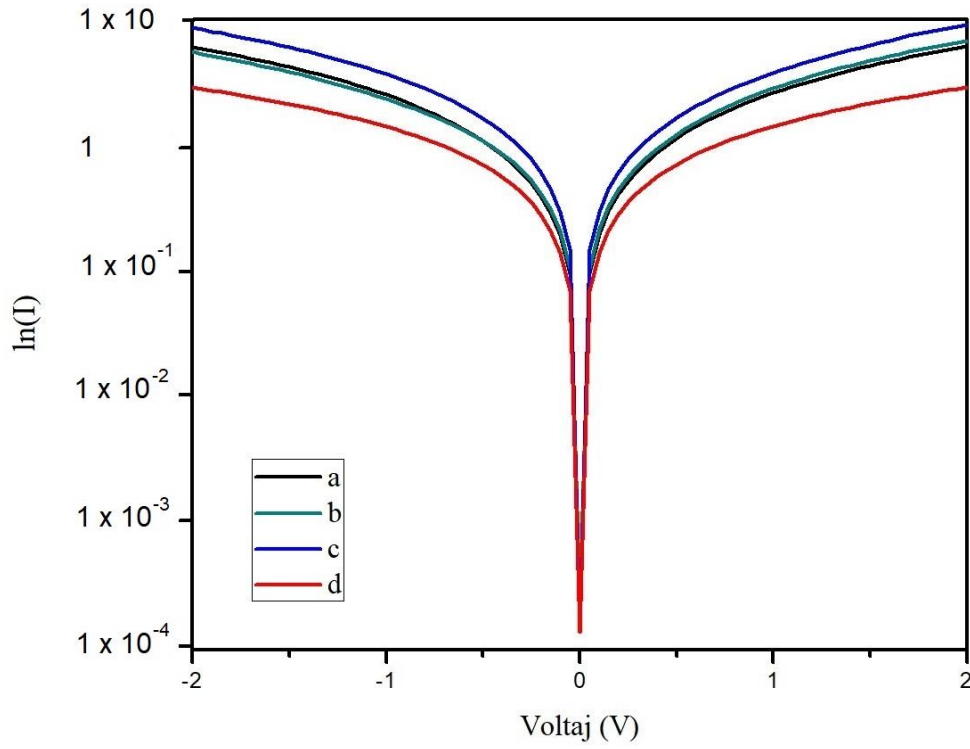
Denklemden $dV/d(\ln I)$ ileri besleme durumunda $\ln(I)$ -V eğrisinin doğrusal bölgesinin eğiminden belirlenebilir. İdealite faktörü n , diyotun I-V karakteristik parametrelerinden biridir. İdeal durumda idealite faktörünün 1 olması istenmektedir.

Diyotun elektriksel parametrelerinin hesaplamak için $\ln(I)$ -V karakteristiğinin incelenmesi önem taşımaktadır. Şekil 52’de deneysel sonuçlar kullanılarak 200 K altlık sıcaklığında üretilen diyotlar için $\ln(I)$ -V karakteristiği verildi.



Şekil 52. 200 K altlık sıcaklığında üretilen Schottky diyotun $\ln(I)$ -V grafiği. a) Tavlınmamış $\text{SnO}_2/\text{ZnO}/\text{Ag}$, b) 350 °C, c) 375 °C ve d) 400 °C sıcaklıklarında tavlanan $\text{SnO}_2/\text{ZnO}/\text{Ag}$.

Şekil 53’te deneysel sonuçlar kullanılarak 300 K altlık sıcaklığında üretilen diyotlar için $\ln(I)$ -V karakteristiği verildi.



Şekil 53. 300 K altlık sıcaklığında üretilen Schottky diyotun (lnI-V) grafiği. a) Tavlanmamış SnO₂/ZnO/Ag, b) 350 °C, c) 375 °C ve d) 400 °C sıcaklıklarında tavlanan SnO₂/ZnO/Ag.

Doyma akım değerinin belirlenmesi ile bariyer yüksekliği aşağıdaki denklem ile hesaplandı.

$$\phi_{bo} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_o}\right) \quad (22)$$

Tablo 6’da ve Tablo 7’de farklı altlık sıcaklıklarında üretilmiş SnO₂/ZnO/Ag Schottky diyotlarının elektriksel parametreleri verildi.

Tablo 6. 200 K altlık sıcaklıklarında üretilen Schottky diyotların elektriksel parametreleri.

Diyot Üretim sıcaklığı (K)	ZnO Tavlama sıcaklığı (°C)	$V - \ln(I)$ grafiğinden Idealite faktörü (n)	$I_0(A)$	$\Phi_b(eV)$
200	Tavlanmamış	5,53	$4,7 \times 10^{-6}$	0,57
	350	15,1	$4,8 \times 10^{-5}$	0,51
	375	17,0	$4,2 \times 10^{-5}$	0,52
	400	18,3	$6,6 \times 10^{-5}$	0,50

Tablo 7. 300 K altlık sıcaklıklarında üretilen Schottky diyotların elektriksel parametreleri.

Diyot Üretim sıcaklığı (K)	ZnO Tavlama sıcaklığı (°C)	$V - \ln(I)$ grafiğinden Idealite faktörü (n)	$I_0(A)$	$\Phi_b(eV)$
300	Tavlanmamış	22,7	$4,8 \times 10^{-4}$	0,45
	350	24,0	$4,0 \times 10^{-4}$	0,46
	375	27,0	$7,3 \times 10^{-4}$	0,44
	400	19,0	$4,2 \times 10^{-4}$	0,46

Tablo 6’da ve Tablo 7’de tüm üretilen Schottky diyotların idealite faktörlerinin 1’den çok büyük olduğu görülmektedir. Werner, J. H. ve Güttler, H. H., (2017) çalışmasında yüksek idealite faktörlerinin meydana gelişini metal-yarıiletken temas bölgesinde var olan çok sayılı arayüz durumlarından kaynaklandığını rapor etmişler. Yıldırım, M., (2016) tarafından yapılan çalışmada yüksek idealite faktör değerleri, arayüzey katmanının ve bariyer yüksekliğinin homojen olmayan dağılımları ile açıklanmıştır. Tung., (2001) çalışmasına göre yüksek idealite faktör değerleri, metal ve yarıiletken arasındaki arayüzey katmanında meydana gelen potansiyel değerindeki düşüş ile açıklanmıştır. Tablo 6’dan 200 K’de altlık sıcaklıklarında üretilen diyotların ters doyma akımları, Tablo 7’deki 300 K’de altlık sıcaklıklarında üretilen diyotların ters doyma akım değerlerine kıyasla daha düşük olduğunu görüldü. Tablo 6’dan görüldüğü üzere 200 K’de altlık sıcaklıklarında üretilen diyotların bariyer yüksekliği, Tablo 7’deki 300 K’de altlık sıcaklıklarında üretilen diyotların bariyer yüksekliği değerlerden daha büyüktür. Bu durum, başta kullanılan materyal ve yöntemin farklı olması ile birlikte, mevcut yüzey durumları, bariyerin yüksekliği ve oksit tabaka etkisinden dolayı kaynaklanıyor olabilir. Bu sonuçlar Tomakin vd., (2011) tarafından yapılan çalışmasındaki soğuk altlık ve klasik ısısal buharlaştırma yöntemleri ile üretilen farklı Schottky diyotların elektriksel parametreleri ve değişiklikleri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

4. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, fotoelektronik teknolojilerinde yaygın olarak kullanılan ZnO ince filmler 325 °C altlık sıcaklığında kimyasal püskürtme yöntemi ile cam ve SnO₂ kaplı cam altlıklar üzerinde büyütüldü. Püskürtme hızını dakikada 5 ml değerinde tutularak film büyüme hızı dakikada 60 Å olarak ayarlandı. Böylece 30 dakika püskürtme süresinde elde edilen ZnO filmlerin kalınlıkları yaklaşık 1,8-2,1µm oldu.

Elde edilen ZnO filmler oda ortamında 350 °C, 375 °C ve 400 °C sıcaklıklarda 30 dakika süreyle tavlandı. İncelemeler dört farklı örnek üzerinde yapıldı. X-ışını kırınımı desenleri tüm örneklerin hekzagonal kristal yapıda büyüdüğünü gösterdi. SEM ölçümlerinden tavlınmamış ve hava ortamında farklı sıcaklıklarda tavlınmış ZnO örneklerinin kristal yapılarında mikro çubuk genişliklerinde artışlar tespit edildi. 300-800 nm dalga boyu aralığında kaydedilen optik geçirgenlik ölçümlerinden 400 °C sıcaklığında tavlınmış ZnO ince filminin daha yüksek optik şeffaflığa sahip olduğu görüldü. Örneklerin optik geçirgenlik spektrumlarından hesaplanan enerji bant aralıklarının (E_g) 3,03 eV-3,3 eV değerleri arasında değiştiği gözlemlendi. Yapılan fotolüminesans ölçümlerinden ZnO filmlerinin kristal yapısında var olan ve fotolüminesans emisyonundan sorumlu olan yapısal kusurlar tespit edildi. Bu ölçümlerde 375 °C sıcaklığında tavlınmış ZnO filmin kristal yapısının daha az kusur yoğunluğuna sahip olduğu anlaşıldı.

Çalışmanın ikinci aşamasında örnekler iki gruba ayrıldı ve yüzeylerine 300 K ve 200 K altlık sıcaklıklarında soğuk altlık yöntemiyle Ag buharlaştırıldı. Elde edilen Ag/ZnO ikili yapılarda Schottky diyotlarının oluşumu için birinci grup olarak adlandırılan 300 K altlık sıcaklığında üretilen ikili yapılara 400 °C sıcaklıkta 30 dakika termo difüzyon işlemi uygulandı. 2. grup olarak adlandırılan 200 K altlık sıcaklığında üretilen ikili yapılara 354 nm dalga boyunda UV ışınları altında 1 saat süre ile fotouyarmalı difüzyon işlemi uygulandı ve Schottky diyotlar oluşturuldu. Farklı teknolojik uygulamalarla oluşturulan Schottky diyotlarının idealite faktörleri, bariyer yüksekliği ve ters doyma akım değerleri hesaplandı. 2. grup olarak adlandırılan fotouyarmalı difüzyon yöntemine tabi tutulan tüm diyotlar doğrultucu özellikler gösterirken 1.grup olarak adlandırılan örneklerde doğrultucu özellikler gözükmedi. Bununla birlikte 200 K ve 300

K altlık sıcaklığında üretilen Schottky diyotların idealite faktörlerinin yüksek değerlerde olması üretilen filmlerde yüzey durum yoğunluğunun varlığından ve metal/yarıiletken arayüzündeki bariyer homejensizliğiden kaynaklandığı anlaşıldı.



5. ÖNERİLER

Püskürtme yöntemi ile üretilen filmlerin kalitesi ve yüzey özellikleri, büyük ölçüde teknolojik işlemin parametrelerine bağlıdır. Ana çözelti, altlık sıcaklığı, püskürtme hızı, püskürtme açısı ve film kalınlığı gibi deneysel koşullar değiştirilerek filmlerin yüzey morfolojisi optimize edilebilir.

Soğuk altlık yöntemi kullanılarak soliton bölgesi olarak tanımlanan 200 K-100 K sıcaklıkları arasında Schottky diyodların üretilmesi ve karakteristik parametrelerin incelenmesi düşünülebilir.

Üretilen Schottky diyotların kalitesini arttırmak için, ITO gibi farklı altlıklar kullanılarak altlıkların etkisi daha ayrıntılı bir şekilde incelenebilir.

Elde edilen Schottky diyotların arayüz durumları değişikliğini iyi anlamak için üretilen diyotların yük taşıyıcıları yoğunluğun hesaplaması faydalı olacaktır.

200 K ve 300 K sıcaklıklarında üretilen Schottky diyotlara UV ışını ile fotouyarmalı difüzyon uygulamadan, sıcaklığa bağlı davranışlarını tespit etmek için aynı sıcaklıkta tavlmalı ve elektriksel parametreleri hesaplanıp kıyaslanmalıdır.

200 K ve 300 K sıcaklıklarında üretilen Schottky diyotlara termouyarmalı difüzyon uygulamadan, Görünür UV elektromanyetik dalgalara bağlı, yüzeydeki metal atomlarındaki elektronların davranışlarını incelemek için aynı dalga boyunda UV ışınları altında aynı süre ile fotouyarmalı difüzyon işlemi uygulanıp, elektriksel parametreleri hesaplanıp kıyaslanmalıdır. Bu durumda, seri dirençler ve yük taşıyıcıların yoğunluğu mutlaka dikkate alınmalıdır.

KAYNAKLAR

- Ananthu, C. and Renjanadevi., 2015.** Preparation of Zinc Oxide Nanoparticles and its Characterization Using Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-Ray Diffraction (XRD). *Procedia Technology*, 24, 761–766. Doi: 10.1016/j.protcy.2016.05.078.
- Ali, G.M., Hashem, M.A., Naji, M.W., 2015.** Performance Analysis of Ag/ZnO Based UV MSM Photodetectors Prepared by Sol-gel Technique. Department of Electrical Engineering Al- Mustansiriya University, Baghdad, Iraq. ISBN: 978-1-4799-5680-7/15.
- Aljwafi, R.N., Alam, M.N., Rahman, F., Ahmad, S., Shahee. A., Kumar, S., 2018.** Impact of annealing on the structural and optical properties of ZnO nanoparticles and tracing the formation of clusters via DFT calculation. *Arabian Journal of Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2018.04.006>.
- Bozkaplan, C., 2011.** Ag/ZnO/p-Si Yapısının elektriksel karakterizasyonu. Yüksek lisans tezi. Dicle üniversitesi, Fen bilimleri enstitüsü, Diyarbakır, Türkiye. 69 s., 50.
- Benramache, S., Belahssen, O., Guettaf, A., Arif, A., 2013.** Correlation between electrical conductivity – optical band gap energy and precursor molarities ultrasonic spray deposition of ZnO thin films. *Journal of Semiconductors*, 34, 11. DOI: 10.1088/1674-4926/34/11/113001.
- Brillson, J. and Lu, Y., 2013.** ZnO Schottky barriers and Ohmic contacts. Departments of Electrical and Computer Engineering. *Journal of Applied Physics* 109(12), 121301-121301-33. DOI: 10.1063/1.3581173
- Bedir, A., 2015.** Sodyum Katkılı CdS İnce Filmlerinin ve nCdS/pSi Güneş Pillerinin Bazı Karakteristik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Rize, Türkiye, 79 s., 4-10.
- Buldu, İ., 2019.** TiO₂-Ag yapıların soğuk altlık yöntemiyle üretilmesi ve incelenmesi Yüksek lisans tezi. Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Rize, Türkiye. 80 s., 10.
- Chen, Y., Nayak, J., Ko, H., Kim, J., 2012.** Effect of annealing temperature on the characteristics of ZnO thin films. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 73, 1259–1263. Doi.org/10.1016/j.jpcs.2012.06.007.
- Çavaş, M., 2017.** Al/P-Si/Zno/Al Foto Diyotun Üretimi ve Elektriksel Karakterizasyonu. *Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi*. 29(1), 325-330.
- Damius, P. ve Ludwig, J., 2005.** Thin Film Deposition Using Spray Pyrolysis. *Journal of Electroceramics*, 14, 103–111.

- Das, S.C., 2009.** Characterization of structural, optical and electrical properties of Ni doped ZnO thin film. Master OF PHILOSOPHY. Department of physics, bangladesh university of engineering and technology, Dhaka, Bangladesh. 97 s., 50.
- Fallah, H.R., Ghasemi, M., Hassanzadeh, A., Steki, H., 2005.** The effect of annealing on structural, electrical and optical properties of nanostructured ITO films prepared by e-beam evaporation. Materials Research Bulletin, 42, 487-496. doi.org/10.1016/j.materresbull.2006.06.024.
- Ghosh, A., Deshpande, N.G., Gudage, Y.G., Joshi, R.A., Sagade, A.A., Phaseb, D.M., Sharma, R., 2007.** Effect of annealing on structural and optical properties of zinc oxide thin film deposited by successive ionic layer adsorption and reaction technique. Journal of Alloys and Compounds, 469, 56–60. Doi:10.1016/j.jallcom.2008.02.061.
- Gölcür, D., 2012.** CdInTe İnce Filmlerinin Elektriksel ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, Türkiye, 102 s., 5-12.
- Genç yılmaz, O., Atay, F., Akyüzi, İ., 2012.** ZnO Yarıiletken Filmlerinin Optik, Elektrik ve Yüzey Özellikleri Üzerine Isıl Tavlama İşleminin Etkileri. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 16-1, 56-60. DOI: 10.19113/sdufbed.76992.
- Guo, E., Zeng, Z., Zhang, Y., Long, X., Zhou, H., Wang, X., 2015.** The effect of annealing temperature on the electronic parameters and carrier transport mechanism of Pt/n type Ge Schottky diode. Microelectronics Reliability, 0026-2714. http://dx.doi.org/10.1016/j.microrel.2016.03.025.
- Ghusoon, M., Muneer, A., Hashem, A., Mohammed, W., 2015.** Performance Analysis of Ag/ZnO Based UV-MSM Photodetectors Prepared by Sol-gel Technique. 2015 Third International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering (TAECE), ISBN: 978-1-4799-5680-7. DOI: 10.1109/TAECE.2015.7113629.
- Holger, V., Alexander, L., Andreas, L., Bruno, K., Holger, H., Michael, L., Marius, G., 2009.** Ag related defect state in ZnO thin films. AIP Conference Proceedings 1199, 122. DOI: 10.1063/1.3295327.
- Hogyoung, K., Haeri, K. and DongW., 2010.** Silver Schottky contacts to a-plane bulk ZnO. Journal of Applied Physics, 108, 074514. https://doi.org/10.1063/1.3493261
- Haider, M., 2019.** Sol-gel ile büyütülen ZnO ince filmlerine soğuk altlık yöntemiyle Ag buharlaştırılarak diyot üretimi ve karakterizasyonu. Yüksek lisans tezi. Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Rize, Türkiye. 78 s., 40.

- Jessica, H., Chai, J., 2010.** Combining Zinc Oxide and Silver for Potential Optoelectronic Applications. Thesis of doctor, Philosophy in Electrical and Computer Engineering at the University of Canterbury, Christchurch, New Zealand. 194 s., 90.
- Jong, H., Chang, H., Ah, R., Hong, S., Nak, W., Young, Y., Jin-Gyu, K., Min, W. and Won, J., 2012.** Schottky Diodes Prepared with Ag, Au, or Pd Contacts on a MgZnO/ZnO Heterostructure. Japanese Journal of Applied Physics, 51, 9S2.
- Khelil, A., Cattin, L., Morsli, M., 2007.** Characterisation of porous doped ZnO thin films deposited by spray pyrolysis technique. Journal of Applied Surface Science, 253, 23, 9241-9247. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.05.055>.
- Kaya, İ., 2010.** Metal -yarıiletken schottky diyotların elektriksel karakteristiklerin frekans ve sıcaklığa bağlı incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Gazi üniversitesi, Fen bilimleri enstitüsü, Türkiye. 77 s., 10.
- Khan, Z.R., Khan, M.S., Zulfequar, M., Khan, M. S., 2011.** Optical and Structural Properties of ZnO Thin Films Fabricated by Sol-Gel Method. Materials Sciences and Applications, 2, 340-345. doi:10.4236/msa.2011.25044.
- Krajewska, T.A., Lukaa, G., Smertenko, P.S., Zakrzewska, A.J., Dybko, K., Jakiela, R., Wachnicki, L., Gieraltowska, S., Witkowski, B.S., Godlewskia M., Guziewicz, E., 2011.** Schottky Junctions Based on the ALD-ZnO Thin Films for Electronic Applications. Acta Physica Polonica Series, 120, 6A. DOI: 10.12693/APhysPolA.120.A-17.
- Keskenler, E.F., Turgut G., Aydin S., Dogan S., Duman S., Sonmez E., 2012.** A study on characterization of Al/ZnS/p-Si/Al heterojunction diode synthesized by sol-gel technique. Materials Letters, 102, 106-108.
- Karaca, G., 2015.** Bor Katkılı CdS İnce Filmlerine ve CdS/Cu₂S Güneş Pillerinin Fotovoltaik Parametrelerine Ultraviyole Işınımının Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Rize, Türkiye, 87 s., 1-8.
- Khokhra, R., Bharti, B., No-Lee, H., Kumar, R., 2017.** Visible and UV photo-detection in ZnO nanostructured thin films via simple tuning of solution method. Scientific Reports, 7, 15032. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15125-x>.
- Kadhim, Y.H. ve Ameer, A.A., 2017.** Synthesis and Characterization of ZnO and Ag Nanoparticles. Journal of Babylon University/Pure and Applied Sciences, 3, 25.
- Küçükömeroğlu, T., Yılmaz, S., Polat, İ., Bacaksız, E., 2018.** An evaluation of structural, optical and electrical characteristics of Ag/ ZnO rods/SnO₂/In–Ga Schottky diode. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 29(12), 1-7. DOI: 10.1007/s10854-018-9049-5.

- Li, Q.H., Gao, T., Wang, Y.G., Wang, T.H., 2005.** Adsorption and desorption of oxygen probed from ZnO nanowire films by photocurrent measurements. *Applied Physics Letters*, 86, 123117. <https://doi.org/10.1063/1.1883711>.
- Liaoyong, W., Kin, M., Yaoguo, F., Minghong, W., Yong L., 2011.** Fabrication and characterization of well-aligned, high density ZnO nanowire arrays and their realizations in Schottky device applications using a two-step approach. *Journal of materials chemistry*, 21, 7090. Doi:10.1039/C1JM10496A.
- Lu, M.Y., Lu, M.P., You, S.J., Chen1, C.W., Wang, Y.J., 2014.** Quantifying the barrier lowering of ZnO Schottky nanodevices under UV light. *Scientific Reports*, 5, 15123. <https://doi.org/10.1038/srep15123>.
- Lupan, O., Cretu, V., Postica, V., Ahmadi, M., Cuenya, B.R., Chow, L., Tiginyanu, I., Viana, B., Pauportc, T., Adclung, R., 2016.** *Sensor Actuators, B*, 223, 893.
- Polyakov, A.Y., Smirnov, N.B., Kozhukhova, E.A. and Dovin, V.I., 2003.** Electrical characteristics of Au and Ag Schottky contacts on n-ZnO, *Applied Physics Letter*, 83, 1575. <https://doi.org/10.1063/1.1604173>.
- Persson, E., 2013.** Printed Schottky Diodes based upon Zinc Oxide Materials. Department of Science and Technology, Linköping University, Norrköping, Sweden. LiU-ITN-TEK-A--13/073—SE.
- Raji, R., Gopchandran, K.G., 2017.** ZnO nanostructures with tunable visible luminescence: Effects of kinetics of chemical reduction and annealing. *Journal of Science, Advanced Materials and Devices*, 2, 1, 51-58. doi.org/10.1016/j.jsamd.2017.02.002.
- Singh, S., Jit, S., Park, S.-H., 2016.** Characterization of Ag/ZnO Nanorod Schottky Diode-Based Low-Voltage Ultraviolet Photodetector. *Nano brief reports and reviews*, 12, 5, 1750063. DOI:10.1142/S1793292017500631.
- Shaivalini, S., Jit, S. and Si-Hyun, P., 2017.** Characterization of Ag/ZnO Nanorod Schottky Diode-based Low-voltage Ultraviolet Photodetector. *Nano brief reports and reviews*, 12, 05, 1750063. <https://doi.org/10.1142/S1793292017500631>.
- Schifano, R., 2019.** Schottky contacts and electrical characterization of n-type hydro thermally grown ZnO. *Philosophiae Doctor*, Department of Physics/Center for Materials Science and Nanotechnology, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University of Oslo. 67 s., 40.
- Şahin, D., 2012.** Sol-Jel Yöntemiyle elde edilen Na katkılı ZnO ince filmlerin yapısal, elektriksel ve optic özelliklerin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen bilimleri enstitüsü, Fizikanabilim dalı, Türkiye. 89 s., 10.
- Tung, R.T., 2001.** Recent advances in Schottky barrier concepts. *Materials Science and Engineering*, 35, 1-3, 1-138.

- Tomakin, M., Altunbaş, M., Bacaksız, E., 2011.** The influence of substrate temperature on electrical properties of Cu/CdS/SnO₂ Schottky diode. *Physica B Condensed Matter*, 406, 4355-4360. Doi:10.1016/j.physb.2011.08.067.
- Tabatabaei, M.R., Ardekani, A.V., 2014.** Physical and Electrical Characterization of ZnO Thin Films Prepared by Sol-Gel Method. *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, 8, No:5.
- Uslu, H., Altında, Ş., Polat, İ., Bayrak, H., Bacaksız, E., 2010.** On the mechanism of current-transport in Cu/CdS/SnO₂/In–Ga structures. *Journal of Alloys and Compounds*, 509, 18, 5555-5561. doi:10.1016/j.jallcom.2011.02.033.
- Werner, J.H., ve Güttler, H.H., 1991.** Barrier inhomogeneities at Schottky contacts. *Journal of Applied Physics*, 69, 1522. <https://doi.org/10.1063/1.347243>.
- Xinan, Z., Fusheng, H., Ting, Z., Caihong, J., Xianwen, S., Linghong, D. and Weifeng Z., 2012.** Analysis of the electrical characteristics of the Ag/ZnO Schottky barrier diodes on F-doped SnO₂ glass substrates by pulsed laser deposition. *Microelectronic Engineering*, 93, 5-9. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2011.12.009>.
- Xinan, Z., JunXia, Z., XianKun, Y., LingHong, D. and WeiFeng, Z., 2013.** Fabrication and characterization of flexible Ag/ZnO Schottky diodes on polyimide substrates. *Thin Solid Films*, 548, 623-626. DOI: 10.1016/j.tsf.2013.09.090.
- Yi, C., Jyoti, N., Hyun-U, K. and Jaehwan, K., 2012.** Effect of annealing temperature on the characteristics of ZnO thin films. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 73, 11, 1259-1263. doi.org/10.1016/j.jpcs.2012.06.007.
- Yıldırım, M., 2016.** Determination of Contact Parameters of Au/n-Ge Schottky Barrier Diode with Rubrene Interlayer. *Journal of Polytechnic*, 20, 165-173. (DOI): 10.2339/2017.20.1. 165-173.
- Yaseen, H., Nihad A., 2017.** Synthesis and Characterization of ZnO and Ag Nanoparticles. *Journal of Babylon University/Pure and Applied Sciences*, 25.
- Zhang, X., Hai, F., Zhang, T., Jia, C., Sun, X., Ding, L., Zhang, W., 2012.** Analysis of the electrical characteristics of the Ag/ZnO Schottky barrier diodes on F-doped SnO₂ glass substrates by pulsed laser deposition. *Microelectronic Engineering*, 93, 5-9. doi:10.1016/j.mee. 2011.12.009.
- Zhang, X., Zhai, J., Yu, X., Ding, L., Zhang, L., 2013.** Fabrication and characterization of flexible Ag/ZnO Schottky diodes on polyimide substrates. *Thin Solid Films*, 548, , 623-626. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2013.09.090>.

ÖZGEÇMİŞ

Muhammet MANDO, 18/07/1991 tarihinde Suriye'nin Humus ilinde doğdu. Ortaöğretimini 2009 yılında Humus ilinde Alamal Lisesi'nde tamamladı. 01/10/2009 tarihinde başladığı lisans eğitimini 13/06/2015 tarihinde Albaas Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Enerjisi Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı. 2016 yılında Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladığı yüksek lisans öğrenimini halen devam ettirmektedir. İyi seviyede İngilizce ve Arapça bilmektedir

