

**ZnO/NiO pn EKLEM DİYOTUNUN SOL-JEL
YÖNTEMİYLE HAZIRLANMASI VE ELEKTRONİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Ayşe Merih AKYÜZLÜ

Yüksek Lisans Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Fethi DAĞDELEN

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZnO/NiO pn EKLEM DİYOTUNUN SOL-JEL YÖNTEMİYLE HAZIRLANMASI
VE ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ayşe Merih AKYÜZLÜ
(112114105)

Anabilim Dalı: Fizik
Programı: Katıhal Fiziği

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Fethi DAĞDELEN

ARALIK-2014

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZnO/NiO pn EKLEM DİYOTUNUN SOL-JEL YÖNTEMİYLE HAZIRLANMASI
VE ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ayşe Merih AKYÜZLÜ
(112114105)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 03.12.2014

Tezin Savunulduğu Tarih: 18.12.2014

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Fethi DAĞDELEN
Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU
Prof. Dr. Sefa KAZANÇ

ARALIK-2014

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın hazırlanması süresince bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, ilgi ve desteğini esirgemeyen Danışman Hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Fethi DAĞDELEN'e, araştırma ve uygulama aşamasında yardımlarını esirgemeyen Sayın Hocam Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU' na, tez süresince bana yol gösterip engin bilgilerinden faydalandığım İnönü Üniversitesi kimya bölümü Doç. Dr. Ahmet GÜLTEK' e, tez süresince benden desteğini esirgemeyen bilgi ve becerilerinden faydalandığım değerli arkadaşım Uzman Ercan ERCAN' a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her anında daima maddi manevi her türlü desteği sağlayan canım aileme teşekkürlerimi sunarım.

Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi FÜBAP tarafından **FÜBAP FF 13.08** numaralı proje olarak desteklenmiştir.

Ayşe Merih AKYÜZLÜ

ELAĞIĞ-2014

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	IX
SİMGELER.....	X
1.GİRİŞ.....	1
2. YARI İLETKENLER	3
2.1 Element Yarıiletkenler	4
2.2 Bileşik ve Alaşım Yarıiletkenler	4
2.3 Yarıiletkenlerin Doyum Yapıları	5
2.4 Yarıiletken Tipleri	8
2.4.1 Katkısız (Saf) Yarıiletkenler	8
2.4.2 Katkılı Yarıiletkenler	9
2.4.2.1 p-tipi Yarıiletkenler	9
2.4.2.2 n-tipi Yarıiletkenler	10
2.4.3 Oksit Yarıiletkenler	12
2.4.3.1 ZnO'in Kristal Yapısı ve Özellikleri	12
2.4.3.1.1 ZnO'in Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	13
2.4.3.2 NiO'in Kristal Yapısı ve Özellikleri	14
2.4.3.2.1 NiO'in Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	15
3. pn EKLEMLERİ VE ÖZELLİKLERİ	16
3.1 pn Eklemi'nin Temel Yapısı	17
3.2 pn Eklemi'nde Kontak Potansiyeli	18
3.3 pn Eklemi'nde Elektrik Alanı	20
3.4 Eklem Bölgesinin Genişliği	21
3.5 Eklem Kapasitesi	21
3.6 pn Eklem Diyotun I-V Karakteristikleri	22

3.7 pn Eklem Diyot Direnci	25
3.8 Omik Kontak	26
4. SOL-JEL YÖNTEMİ	27
4.1 Sol-Jel Kaplama Yöntemleri	30
4.1.1 Daldırarak Kaplama (Dip Coating)	30
4.1.2 Püskürterek Kaplama (Spray Pyrolysis) Tekniği	31
4.1.3 Döndürerek Kaplama (Spin-Coating) Tekniği	32
4.1.3.1 Spin Kaplamada Karşılaşılabilen Sorunlar	33
4.1.3.1.1 Kuyruklu Yıldızlar	33
4.1.3.1.2 Desenlenmeler	33
4.2 Sol-Jel Uygulamaları	34
5. MATERYAL VE METOT	35
5.1 Kaplama Öncesi Hazırlıklar	35
5.2 Çözeltilerin Hazırlanması	35
5.3 İnce Filmlerin Kaplanması	36
5.3.1 Çinko Oksit Filmlerinin Eldesi	36
5.3.2 Nikel Oksit Filmlerinin Eldesi	38
5.3.3 pn Eklem Diyot Filmlerinin Eldesi	39
5.4 Optik Ölçümler	39
5.5 Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Analizleri	40
5.6 Akım-Voltaj (I-V) Ölçüm Analizleri	40
6. BULGULAR	41
6.1 Optik Ölçüm Sonuçları	41
6.1.1 ZnO' in Optik Özelliklerinin Belirlenmesi	41
6.1.2 NiO' in Optik Özelliklerinin Belirlenmesi	44
6.1.3. ZnO/NiO pn Eklem Diyotunun Optik Özelliklerinin Belirlenmesi	46
6.2 Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Sonuçları	48
6.3 ZnO/NiO pn Ekleminin Akım-Voltaj (I-V) Ölçüm Sonuçları	50
7. SONUÇ VE TARTIŞMA	55
KAYNAKLAR	58
ÖZGEÇMİŞ	63

ÖZET

ZnO ve NiO filmleri sol-jel yöntemiyle sentezlendi. Filmlerin yapısal ve optik özellikleri atomik kuvvet mikroskobu ve UV-VIS spektrofotometre ile incelendi. ZnO ve NiO filmlerinin optik bant genişlikleri sırasıyla 3,198 ve 3,827 eV olarak bulundu.

ZnO/NiO pn eklem diyot sol-jel yöntemi ile hazırlandı. pn eklem diyotun elektriksel özellikleri Termioyonik emisyon ve Norde yöntemleri kullanılarak analiz edildi. Elektriksel parametreler; idealite faktörü, bariyer yüksekliği ve seri direnç sırasıyla 6,46, 1,036 eV ve 39,1 M Ω olarak bulundu.

Yüksek elektrik alanlarında, diyotun yük taşıma mekanizması uzay yük limit akımı tarafından kontrol edilir.

Bu çalışmada hazırlanan ZnO/NiO pn eklem diyotu elektronik cihaz uygulamalarında kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: ZnO, NiO, pn eklem diyot, Sol-Jel

SUMMARY

Preparation By Sol-Gel Of ZnO/NiO pn Junction Diode And Investigation Of Their Electronic Properties

The ZnO and NiO films were synthesized by the sol-gel method. The structural and optical properties of the films were investigated by atomic force microscopy and UV-VIS spectrophotometers. The optical band gaps of ZnO and NiO films were obtained to be 3,198 and 3,827 eV respectively.

The ZnO/NiO pn junction diode was prepared by the sol-gel method. The electrical characteristics of the diode were analyzed using thermionic emission and Norde methods. The electrical parameters such ideality factor, barrier height as series resistance were found to be 6,46, 1,036 eV and 39,1 M Ω respectively.

At the higher electric fields, the charge transport mechanism of the diode is controlled by the space charge limited currents.

It is evaluated that the prepared ZnO/NiO pn diode can be used in transparent electronic devices applications.

Key Words: ZnO, NiO, pn junction diode, Sol-gel

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1.	(a) İletkenlerin (b) Yarıiletkenlerin (c) Yalıtkanların Doyum Yapıları6
Şekil 2.2	Yarıiletkenlerde Elektron-Deşik Çifti Oluşumu7
Şekil 2.3	Katkısız (Saf) Yarıiletken Oluşumu.....8
Şekil 2.4	p-Tipi Katkılı Yarıiletken Oluşumu.....10
Şekil 2.5	p-Tipi Yarıiletkenin Doyum Yapısı10
Şekil 2.6	n-Tipi Katkılı Yarıiletken Oluşumu.....11
Şekil 2.7	n-Tipi Yarıiletkenin Doyum Yapısı11
Şekil 2.8.	ZnO'nun Kristal Yapısı.....13
Şekil 2.9	ZnO'in Wurtzite ve Kaya Tuzu Yapısının Şekli a) Wurtzite Görünüşü b) Kaya Tuzu Görünüşü13
Şekil 2.10	NiO'in Kristal Yapısı.....14
Şekil 2.11	NiO'in Kaya Tuzu Görünüşü.....15
Şekil 3.1	pn Eklem Oluşumu.17
Şekil 3.2	pn Eklem Oluşmadan Önceki p-Tipi ve n-Tipi Yarıiletkenin Enerji-Band Diyagramı18
Şekil 3.3	Denge Durumundaki pn Eklemin Enerji-Band Diyagramı pn Eklemden Oluşan Kontak Potansiyeli.....19
Şekil 3.4	pn Eklem Diyotta Uygulanan Gerilimin Etkileri (a) Denge Durumu, (b) İleri Besleme Durumu ve (c) Ters Besleme Durumu İçin Enerji Band Diyagramları23
Şekil 3.5	İdeal pn Eklem Diyotun I-V Grafiği [18].25
Şekil 3.6	Ters Besleme Durumunda pn Eklemin Zener ve Çığ Tipi Kırılmaları ...25
Şekil 4.1	Sol-Jel Oluşumunun Şematik Gösterimi.....28
Şekil 4.2	Çeşitli Jel Türevli Ürünlerin Şematik Görüntüsü29

Şekil 4.3	Daldırarak Kaplama Yönteminin Şematik Gösterimi.....	31
Şekil 4.4.	Döndürerek Kaplama Yönteminin Şematik Gösterimi.....	32
Şekil 4.5	Spin Kaplama Yönteminde Kuyruklu Yıldız Oluşumu	33
Şekil 4.6.	Spin Kaplamada Oluşan Desenlenmeler	34
Şekil 5.1	ZnO Film Kaplama Aşamalarının Özet Diyagramı	37
Şekil 5.2	NiO Film Kaplama Aşamalarının Özet Diyagramı	38
Şekil 5.3	Sol-Jel Metodu İle Kaplanan pn Eklmi.....	39
Şekil 6.1	ZnO Filmin Dalga Boyuna Bağlı Optik Geçirgenlik Grafiği	42
Şekil 6.9	ZnO İnce Filminin AFM Görüntüsü (30 µmx30 µm) a) İki Boyutlu b) Üç Boyutlu.....	48
Şekil 6.10	ZnO İnce Filminin AFM Görüntüsü (1 µmx1 µm) a) İki Boyutlu b) Üç Boyutlu.....	48
Şekil 6.11	NiO İnce Filminin AFM Görüntüsü (30 µmx30 µm) a) İki Boyutlu b) Üç Boyutlu.....	49
Şekil 6.12	NiO İnce Filminin AFM Görüntüsü (30 µmx30 µm) a) İki Boyutlu b) Üç Boyutlu.....	49
Şekil 6.14	Üretilen ZnO/NiO pn Diyotunun lnI-V Grafiği.....	51
Şekil 6.15	Üretilen ZnO/NiO pn Diyotunun F(V)-V Grafiği	53

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa no

Tablo 2.1	Periyodik Cetvelin Yarıiletkenler İle İlgili Bölümü	3
Tablo 2.2.	Önemli Element ve Bileşik Yarıiletkenler	5
Tablo 2.3	Bazı Yarıiletkenlerin Yasak Enerji Aralıkları (Eg)	7
Tablo 4.1	Sol-Gel Kimyasının Anlaşılması İçin Gereken Kavramlar	29
Tablo 4.2	Sol-Jel Yönteminin Üstünlük ve Sınırlılıkları	34
Tablo 5.1	Deneylerde Kullanılan Kimyasal Maddeler, Bu Maddelerin Kimyasal Formülleri, Mol Ağırlıkları ve Miktarları.....	36
Tablo 6.1	Hazırlanan İnce Filmlerin Yasak Enerji Aralıkları.....	47
Tablo 6.2	Filmlerin Ortalama Yapısal Parametreleri.....	49
Tablo 6.3	ZnO/NiO pn Eklem Diyotunun Oda Sıcaklığında, Farklı Metotlar Kullanılarak Hesaplanan Elektronik Parametreleri	53

SİMGELER

E_B	: Bağlanma enerjisi
E_c	: İletim bandı minimum enerji seviyesi
E_v	: Valans bandı maksimum enerji seviyesi
E_A	: Alıcı(akseptör) enerji düzeyler
E_D	: Verici(donör) enerji düzeyler
E_F	: Fermi enerjisi
E_g	: Yasak enerji aralığı
p	: Boşluk konsantrasyonu
n	: Elektron konsantrasyonu
n_i	: Saf taşıyıcı yoğunluğu
p_p	: Çoğunluk taşıyıcılar boşluklar
n_p	: Azınlık taşıyıcılar elektronlar
n_n	: Çoğunluk taşıyıcılar elektronlar
p_n	: Azınlık taşıyıcılar boşluklar
N_d	: Verici atomların konsantrasyonu
N_a	: Alıcı atomların konsantrasyonu
ZnO	:Çinko oksit
$ZnAc$	: Çinko asetat
NiO	:Nikel oksit
$NiAc$	:Nikel asetat
EA	:Etanolamin

HCl	: Hidroklorik asit
T	: Mutlak sıcaklık
I	: Akım
I₀	: Ters doyma akımı
n	: İdealite faktörü
hν	: Foton enerjisi
α	: Lineer soğurma katsayısı
R	: Direnç

1. GİRİŞ

Yarıiletken malzemeler 1940 yılının sonlarına doğru ortaya çıkmıştır. Bu tarihten sonra günümüze kadar yarıiletken malzemeler üzerinde birçok çalışma yapılmış ve buna paralel olarak yarıiletken teknolojisinde büyük gelişmeler olmuştur. Yarıiletkenler; iletkenlik bakımından iletkenler ile yalıtkanlar arasında yer alan malzemelerdir [1]. Yarıiletkenlerde iletim; genellikle safsızlık atomlarına, sıcaklığa, ışığa, ısıya ve manyetik alana bağlıdır [2]. İletimdeki bu duyarlılık yarıiletken malzemeleri elektronik uygulamalar için önemli hale getirir [2]. Bugün elektronik devre elemanların hemen hemen hepsinde yarıiletken malzeme kullanılmaktadır. Yarıiletken malzemelerin, küçük boyutlu, uzun ömürlü ve verimli olmalarından dolayı elektronik devre elemanlarında kullanılmaları tercih edilir. Bugün kullanılan birçok yarıiletken cihazların işleyişi, p-tipi ve n-tipi yarıiletkenler arasındaki eklemlerin doğası üzerine kuruludur. Yapısında yarıiletken malzeme kullanılan elektronik elemanlarına fotovoltaiik pil, dedektör, diyot ve transistör örnek verilebilir [3].

Birçok elektronik aygıt, yarıiletken-yarıiletken, metal-yarıiletken ya da metal-metal arasında oluşan eklemleri içerirler. pn eklem, p ve n-tipi yarıiletkenler atomik boyutta kontak haline getirilme sonucu oluşturulur. pn eklem dışarıdan gerilim uygulandığı zaman pn eklem ileri besleme altında üzerinden büyük bir akımın akmasına izin verirken, ters besleme durumunda akımın akması oluşan engel tarafından engellenir. Bu özelliğinden dolayı pn eklem yarıiletken diyot görevi görür [3]. Bu tür cihazların üretilmesi için günümüzde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biride Sol-jel yöntemidir.

Sol-jel yöntemi önemli film kaplama yöntemlerinden biridir. Bu yöntem çok saf başlangıç malzemeleri kullanarak oda koşullarında gerçekleştirilebilmektedir. Bu yöntem yüksek sıcaklık reaksiyonlarından kaçınarak kararlı yapı sağlanması, çok küçük ölçüde bileşikler kullanılabilmesi, moleküler ve mikro gözeneklerin oluşumuna imkan sağlaması gibi özellikleri ile bilimsel ve teknolojik çalışmalara kolaylıklar sağlamaktadır [2].

Bu çalışmada sol-jel metoduyla ZnO/NiO pn eklem diyotu üretildi. pn eklem diyot üretmeden önce ZnO ve NiO ince filmleri spin kaplama, daldırma ile kaplama ve püskürtme ile kaplama metotlarıyla üretildi. ZnO ince film için en uygun metodun spin kaplama, NiO ince filmi için ise daldırma metodu olduğu görüldü. Bu özellikleri incelemek

üzere UV-VIS spektrumu, AFM görüntüleri ve akım-gerilim (I-V) ölçümleri alınarak çıkan sonuçlar literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırıldı. Elde edilen bu filmler ile ZnO/NiO pn eklem diyot yapılarak UV-VIS ve I-V karakteristikleri incelendi. ZnO/NiO pn eklem diyotun geleneksel akım-gerilim ($\ln I$ -V) karakteristiklerinden doyum akımı, idealite faktörü ve bariyer yüksekliği gibi temel elektriksel parametreler ayrıca Norde tarafından öne sürülen $F(V)$ -V fonksiyonu yardımıyla da bariyer yüksekliği ve seri direnç değerleri hesaplandı. Geleneksel yöntemle ve Norde metoduyla elde edilen değerler karşılaştırıldı ve bu değerlerin uyumlu olduğu görüldü. Ayrıca uzay yükü sınır akımı metodu için $\ln I$ - $\ln V$ grafiği çizildi. Bu grafikte iki lineer bölge belirlendi ve bu iki lineer bölge $I = BV^m$ denklemi ile analiz edildi. $\ln I$ - $\ln V$ grafiğinde düşük ve yüksek voltaj değerleri için birinci ve ikinci bölge eğimleri olan m_1 ve m_2 değerleri bulundu.

2. YARIİLETKENLER

İletkenlik bakımından iletkenler ile yalıtkanlar arasında yer alan yarıiletken malzemeler, mutlak sıcaklıkta ($T=0K$) yalıtkanların özelliklerini gösterirler. Ancak yarıiletken malzemeler; ışık, ısı ya da manyetik alana bırakıldığında veya gerilim uygulandığında valans bandında bulunan elektronların bir kısmı yasak enerji aralığını geçerek iletim bandına çıkarlar. İletim bandına çıkan elektronlar ilettime katılacağından yarıiletken iletkenlik özelliği kazanır. Yarıiletkenler bu özelliklerinden dolayı elektronik teknolojide oldukça yaygın olarak kullanılır. Bazı yarıiletkenler kristal yapıya sahiptir yani atomları düzenli bir şekilde sıralanmıştır. Yarıiletkenlerde yük taşınması, elektron veya boşluklar tarafından gerçekleştirilir. Yarıiletkenlerin elektriksel iletkenlikleri aşağıda verilen şu özelliklere göre değişir [4].

1. Saf (katkısız) yarıiletkenlerde iletkenlik, malzemenin sıcaklığı artıkça artar.
2. Saf olmayan (katkılı) yarıiletkenlerde iletkenlik safsızlık konsantrasyonuna bağlıdır.
3. Yarıiletkenlerin iletkenliğini etkileyen diğer bir faktör de yük taşıyıcılarıdır.

Yarıiletkenler tabiatta doğal halde bulunduğu gibi laboratuvar ortamında bileşim şeklinde elde edileceğinden dolayı yarıiletken malzemeler element, bileşik ve alaşım yarıiletkenler olmak üzere üç gruba ayrılır. Periyodik cetvelin yarıiletkenler ile ilgili kısmı Tablo 2. 1' de verilmiştir.

Tablo 2.1. Periyodik cetvelin yarıiletkenler ile ilgili bölümü [2].

Periyot	II. Sütun	III. Sütun	IV. Sütun	V. Sütun	VI. Sütun
2		B	C	N	O
3	Mg	Al	Si	P	S
4	Zn	Ga	Ge	As	Se
5	Cd	In	Sn	Sb	Te
6	Hg		Pb		

2.1 Element Yarıiletkenler

Element yarıiletkenler, aynı atomlardan oluşan yarıiletkenler olup atomları birbirine kovalent bağlar ile bağlıdır. Tablo 2. 1’ de verilen periyodik cetveldeki Si ve Ge element yarıiletkenlere birer örnektir. Bu iki yarıiletkene “doğal yarıiletken” de denmektedir.

2.2 Bileşik ve Alaşım Yarıiletkenler

Bileşik yarıiletkenler, iki elementten meydana gelen yarıiletkenlerdir. Bileşik yarıiletkenlerde elektronegatiflikteki farklılıktan dolayı kristal bağlanma, iyonik ve kovalent bağlanmanın bir kombinasyonudur. Bileşik yarıiletkenler, ikili, üçlü, dördü yarıiletkenler olmak üzere üç gruba ayrılır. İki elementin birleşmesiyle oluşan yarıiletkenler “alaşım yarıiletken” olarak adlandırılır [3].

-
- **Bileşik yarıiletkenler:** Kimyasal formülü AB olan yarıiletken bileşiklerdir. Eğer A elementine üç valans elektronu ve B elementine de beş valans elektronu bağlı ise bu ikili bileşik yarıiletken grubuna “III-V grubu yarıiletkenler” denir. GaAs, InP ve GaP örnek olarak verilebilir.
- **Üçlü bileşimli yarıiletkenler (alaşım yarıiletkenler):** İkili bileşiğe az miktarda üçüncü bir elementin eklenmesi ile oluşur. $GaAs_xP_{1-x}$ örnek olarak verilebilir.
- **Dördü bileşimli yarıiletkenler (alaşım yarıiletkenler):** Bu tipteki yarıiletkenler birçok ikili ve üçlü bileşik yarıiletkenlerin bileşiminden elde edilir. $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ örnek olarak verilebilir.

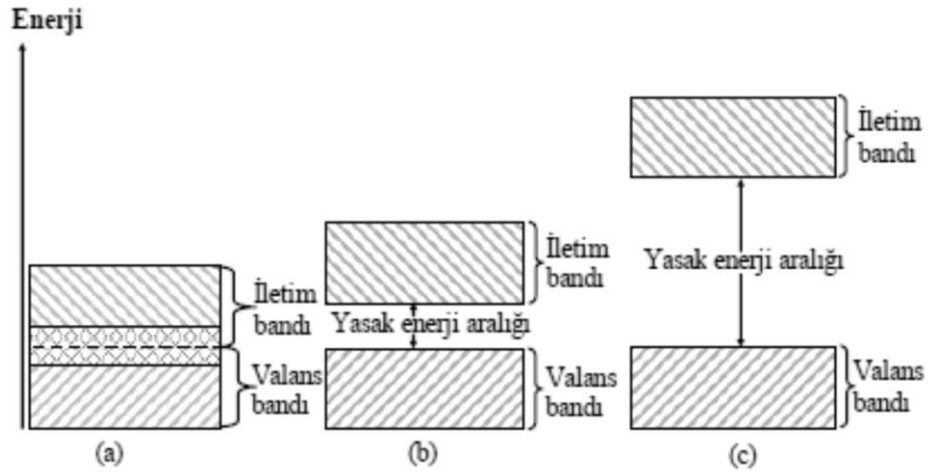
Son zamanlarda yarıiletken bileşimler çeşitli elektronik ve optoelektronik aygıtlarda kullanılmaya başlanmıştır [2]. Bu aygıtlarda en çok kullanılan element ve bileşim yarıiletkenlere örnekler Tablo 2. 2’de verilmiştir.

Tablo 2.2. Önemli element ve bileşik yarıiletkenler [3].

Genel Sınıflandırma	Yarıiletkenler	
	Sembol	İsim
Element	Si	Silisyum
	Ge	Germanyum
İkili Bileşikler		
IV-VI	SiC	Silisyum karbit
III-V	Al As	Alüminyum arsenit
	GaN	Galyum nitrat
	GaP	Galyum fosfat
II-VI	ZnO	Çinko oksit
	ZnS	Çinko sülfür
	CdSe	Kadmiyum selenit
IV-VI	PbS	Kurşun sülfür
	PbTe	Kurşun tellür
Üçlü Bileşim	$Al_xGa_{1-x}As$	Alüminyum galyum arsenit
	$GaAs_{1-x}P_x$	Galyum arsenit fosfat
Dörtlü Bileşim	$Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$	Galyum indiyum arsenik fosfat
	$In_xGa_{1-x}As_yN_{1-y}$	İndiyum galyum arsenik nitrat

2.3 Yarıiletkenlerin Doyum Yapıları

Doğada bulunan katıların birçoğu kristal yapıya sahiptir. Kristal yapı, katı içinde iyon ve moleküllerin üç boyutlu ve periyodik dizilişidir yani katı içinde atom veya atom grupları düzenli bir şekilde bulunmaktadır [5]. Kristal yapı içerisinde atomlar bir araya geldiği zaman atom içindeki elektronların enerji seviyeleri birbirinden etkilenir. Kristal yapının biçimine bağlı olarak atomlar birbirine daha da yakın olduğunda valans kabukları iç içe geçecek ve valans elektronlarının enerji seviyeleri Pauli dışarlama ilkesine göre farklı değerler alacaktır [6].



Şekil 2.1. (a) İletkenlerin (b) Yarıiletkenlerin (c) Yalıtkanların doyum yapıları [3].

Valans elektronlarının enerji seviyelerindeki farklılaşmalarından dolayı kristal yapıya bağlı olarak enerji bandı, valans bandı ve iletim bandı olarak ikiye ayrılır [6].

Valans bandı ile iletim bandı arasında elektronların bulunamayacağı enerji seviyelerini içeren doyum aralığı oluşur ve bu oluşan enerji band aralığına “yasak enerji aralığı” denir ve E_g ile ifade edilir. Valans doyum; yasak enerji aralığının altında kalan, bağlı elektronların oluşturduğu enerji bölgesidir ve E_v ile ifade edilir. İletim bandı ise yasak enerji aralığının üstünde kalan ve serbest elektronların oluşturduğu enerji bölgesidir ve E_c ile ifade edilir [3].

Bir katı malzeme doyum yapısına göre iletken (metal), yarıiletken veya yalıtkan olarak üç gruba ayrılır. Şekil 2. 1’de iletkenlerin, yarıiletkenlerin ve yalıtkanların doyum yapıları verilmiştir.

İletkenlerin (metallerin), valans bandı enerji seviyesi ile iletim bandı enerji seviyesi Şekil 2. 1 (a)’ da görüldüğü gibi iç içe geçmiş şekildedir. Bu malzemelere dışarıdan küçük bir enerji verildiği zaman valans bandındaki elektronların birçoğu iletim bandına geçer. Bundan dolayı iletkenler elektrik akımını kolaylıkla iletirler. Yarıiletkenlerin valans bandı ile iletim bandı arasında Şekil 2. 1 (b)’de görüldüğü gibi yaklaşık 0. 5-5 eV’luk bir yasak enerji aralığı vardır [7]. Tablo 3’de bazı yarıiletkenlerin 0K ve 300K sıcaklıklarındaki yasak enerji aralıkları verilmiştir.

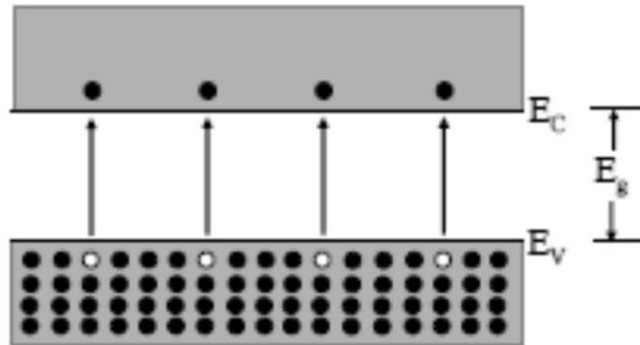
Tablo 2.3 Bazı yarıiletkenlerin yasak enerji aralıkları (E_g) [3].

Kristal	Yasak Enerji Aralığı (eV)	
	0K	300K
Ge	0,74	0,66
Si	1,17	1,11
GaAs	1,52	1,43
GaP	2,32	2,25
AlSb	1,65	1,60
InP	1,42	1,27
GaSb	0,81	0,68

Tabloda 2. 3’de görüldüğü gibi yarıiletken malzemede sıcaklık artıkcça yasak enerji aralığı küçölmektedir.

Yarıiletken malzemelerin mutlak sıcaklıkta ($T=0$ K’de) elektronlarının hepsi valans bandındadır ve yarıiletken malzeme bu durumda yalıtkan özelliğı gösterir. Ancak valans bandında bulunan elektronlara yasak enerji aralığının enerjisi kadar dışarıdan bir enerji verilirse elektronların birçoğı iletim bandına geçer. Bu durumda yarıiletken iletken hale geçer.

Yarıiletken malzemede valans bandından iletkenlik bandına elektronlar geçtiğinde, valans bandında boşluk oluşur ve oluşan bu boşluğı “hol” ya da “boşluk” adı verilir [8]. Bu durumda yarıiletken malzemelerde Şekil 2. 2’de görüldüğü gibi elektron–boşluk çiftleri meydana gelir.



Şekil 2.2 Yarıiletkenlerde elektron-deşik çifti oluşumu [3].

Yalıtkanlarda valans bandı ile iletkenlik bandı arasında Şekil 2. 1(c)'de görüldüğü gibi yaklaşık 5. 5 eV' tan büyük yasak enerji aralığı vardır [7]. Bu durumda yalıtkanlarda valans bandındaki elektronları iletim bandına geçirmek çok zordur. Bunun için de yalıtkanlar elektrik akımını iletmezler.

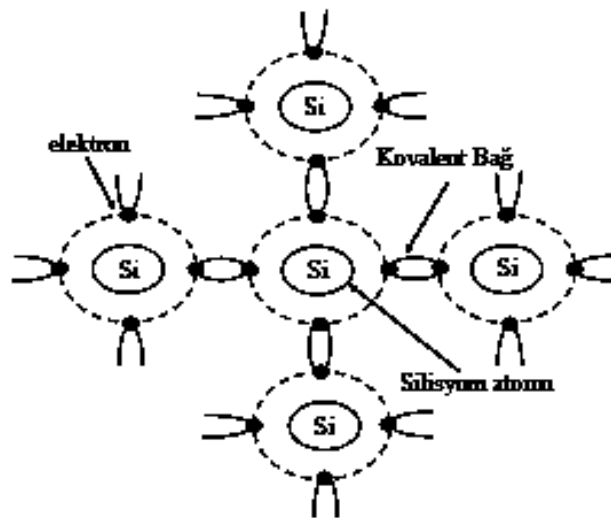
2.4 Yarıiletken Tipleri

2.4.1 Katkısız (Saf) Yarıiletkenler

Hiçbir safsızlık ve kristal kusur içermeyen mükemmel bir yarıiletken kristal “katkısız (saf) yarıiletkenler” olarak adlandırılır [9]. Katkısız yarıiletken bir malzemede mutlak sıfır sıcaklığında yük taşıyıcıları yoktur, ancak sıcaklık arttıkça yarıiletken malzemelerde elektron-boşluk çiftleri oluşur [10]. Bu durumda taşıyıcılar çift olarak üretildikleri için iletkenlik bandının birim hacmindeki elektron sayısı (n) ile, valans bandının birim hacmindeki boşluk sayısı (p) birbirine eşittir ve;

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

eşitliği ile verilir. Eşitlikteki n_i saf taşıyıcı yoğunluğu olup, yarıiletken malzemenin cinsine ve ortamın sıcaklığına bağlı olarak değişir [6].



Şekil 2.3 Katkısız (saf) yarıiletken oluşumu [3].

Silisyum (Si) atomları normal şartlarda Şekil 2. 3’de görüldüğü gibi son yörüngede ki elektronları ortak kullanarak kovalent bağ oluştururlar. Bu şekilde oluşan kristal yapılar katkısız (saf) yarıiletkenlere örnek olarak verilebilir [3].

2.4.2 Katkılı Yarıiletkenler

Yarıiletken malzemenin elektriksel özelliklerini değiştirmek için, kristali oluşturan atomlardan bir kısmının yerine farklı ancak uygun atomların yerleştirilmesi işlemine “katkılama ” adı verilir [11]. Katkılama işlemi, değişik yöntemler ile yarıiletken malzemenin kristal yapısını bozmadan gerçekleştirilir [6]. Katkılama oranı arzu edilen özelliğe ve kullanım yerine göre değiştirilebilir.

Bir yarıiletken malzemenin yük taşıyıcılarının sayısı uygun safsızlık atomlarının katkılanması ile artırılabilir [10]. Bu şekilde elde edilen yarıiletken malzemelere “katkılı yarıiletken” denir.

Yarıiletken malzeme alıcı (akseptör) atomları ile katkılıandığı zaman p-tipi yarıiletken, verici (donör) atomları ile katkılıandığı zaman ise n-tipi yarıiletken olarak adlandırılır.

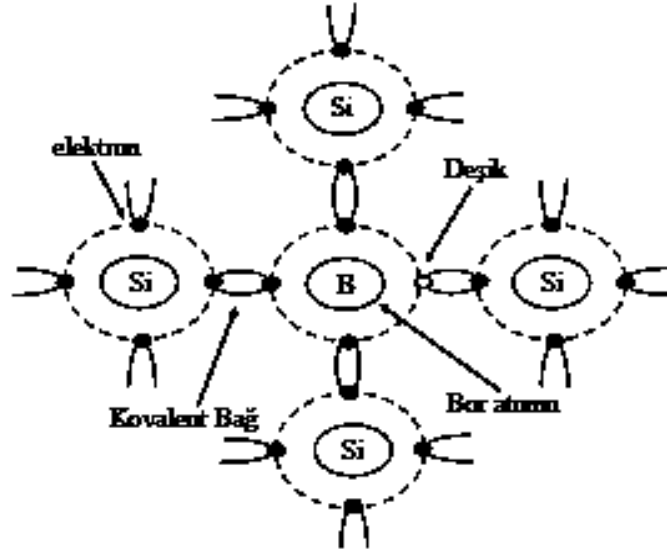
2.4.2.1 p-tipi Yarıiletkenler

Saf bir yarıiletken malzemeye, kristal yapısı bozulmayacak şekilde periyodik tablonun III. sütununda bulunan bir element katkılıandığı zaman p-tipi yarıiletken oluşur. Örneğin; periyodik tablonun IV. sütunda bulunan Silisyum (Si) atomu ile periyodik tablonun III. sütunda bulunan Bor (B) atomu ile katkılıandığında yarıiletken atomları ile katkı atomları arasında Şekil 2. 4’de görüldüğü gibi kovalent bağ oluşur. Ancak katkılanan elektronun son yörüngesinde üç elektron olduğu için bir bağda bir elektron eksik kalır ve bu elektron eksikliğine “hol” denir.

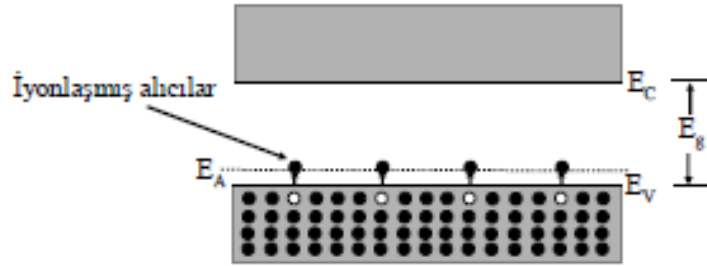
Boşlukların taşıyıcı yoğunluğu elektronların taşıyıcı yoğunluğundan büyük olan katkılı yarıiletkenlere “p-tipi yarıiletkenler” denir [12]. p-tipi yarıiletken kristalde boşluk

üreten katkılar “alıcı (akseptör)” olarak adlandırılır. p-tipi yarıiletken malzemelerde çoğunluk taşıyıcılar boşluklar (p_p), azınlık taşıyıcılar elektronlar (n_p)’dır.

p-tipi yarıiletkenlerde alıcı enerji düzeyleri (E_A), Şekil 2.5’de görüldüğü gibi yasak enerji aralığındadır.



Şekil 2. 4 p-tipi katkılı yarıiletken oluşumu [3].

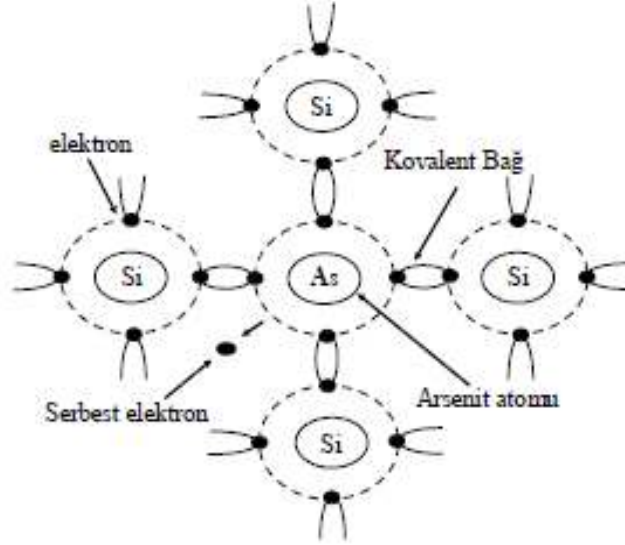


Şekil 2. 5 p-tipi yarıiletkenin doyum yapısı [3].

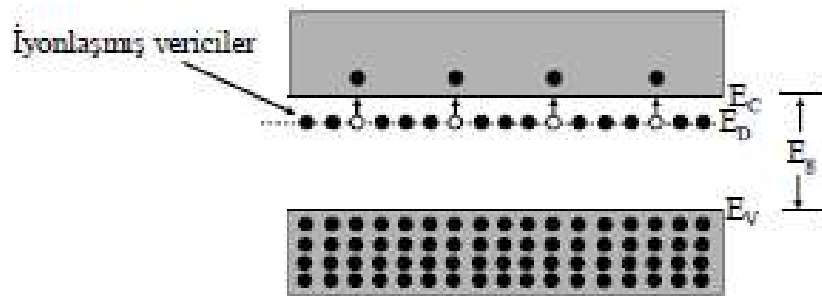
2.4.2.2 n-tipi Yarıiletkenler

Saf bir yarıiletken malzemeye, kristal yapısı bozulmayacak şekilde periyodik tablonun IV. sütununda bulunan bir element katkılındığında n-tipi yarıiletken oluşur.

Örneğin periyodik tablonun IV. sütunda bulunan Silisyum (Si) atomuna bu sefer periyodik tablonun V. sütunda bulunan Arsenit (As) atomu katkıldığı zaman Şekil 2.6’ da görüldüğü gibi Si ve As atomlarının son yörüngesindeki dört elektron arasında kovalent bağ oluşur. As atomunun son yörüngesindeki bir elektron ise bağ yapmaz ve bu elektron atoma zayıf bağlı olduğundan kristale küçük bir enerji verildiğinde kristal içinde serbest hareket eder. Bu elektron, kristalin taşıyıcı yoğunluğunu artırır.



Şekil 2.6 n-tipi katkılı yarıiletken oluşumu [3].



Şekil 2.7 n-tipi yarıiletkenin doyum yapısı [3].

Elektronların taşıyıcı yoğunluğu boşlukların taşıyıcı yoğunluğundan büyük olan katkılı yarıiletkenlere “n-tipi yarıiletkenler” denir [12]. n-tipi yarıiletkenlerde kristale bir elektron veren katkılar “verici (donör)”olarak adlandırılır. n-tipi yarıiletkenlerde elektronlar çoğunluk taşıyıcılar (n_n), deşikler ise azınlık taşıyıcılar (p_n)’ dır.

n-tipi yarıiletkenlerin verici enerji düzeyleri (E_D), Şekil 2.7'de görüldüğü gibi yasak enerji aralığındadır.

n-tipi bir yarıiletken malzemeye yeteri kadar alıcı atomlarının katkılanması ile yarıiletken malzeme katkısız yarıiletkene dönüşebilir, yine bu malzemenin alıcı yoğunluğunu artırarak malzeme p-tipi yarıiletken haline, yine bu malzemeye verici atomların katkılanması ile katkısız yarıiletken haline ve yine verici atomların katkılanması ile n-tipi yarıiletkene dönüştürülebilir [11]. Bu işlemler malzeme yarıiletken özelliğini kaybedinceye kadar devam edilebilir ve yarıiletkenlerin bu özellikleri entegre devre yapımında çok önemlidir [11].

2.4.3 Oksit Yarıiletkenler

2.4.3.1 ZnO'in Kristal Yapısı ve Özellikleri

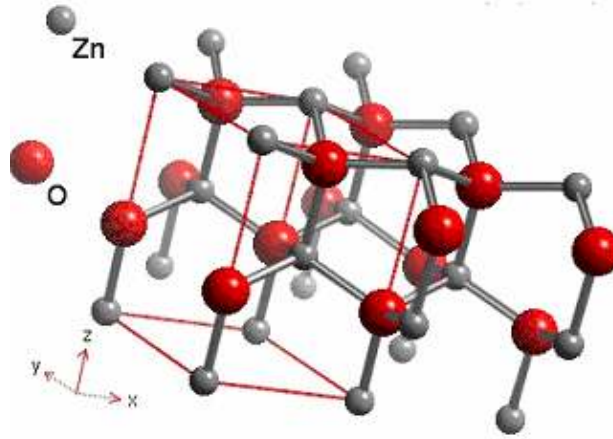
Çinko ile oksijenin birleşmesi ile oluşan yarı iletken özellikteki ZnO kristalleri her bir çinko atomunun etrafını 4 adet oksijen atomunun sarması ile oluşan tetrahedral görünüme sahiptir (Şekil 2.8). Bu tetrahedral yapıyı oluşturan bağlar tipik sp^3 kovalent bağlarıdır. ZnO'nun kristal yapısı wurtzite, zinc-blende veya kaya tuzu fazlarında olabilir. Normal şartlar altında termodinamik olarak dayanıklı olan faz wurtzite fazdır. Zinc blende faz kübik yapıların büyümesi ile dayanıklı hale gelir. Kaya tuzu fazı ise yüksek basınç altında gözlemlenebilmektedir [13].

Örgü sabitleri $y = 3,250 \text{ Å}$ ve $z = 5,206 \text{ Å}$ 'dır. z/y oranı 1,60'tır ve ideal olan 1,633'den çok az bir miktar küçüktür. Zn ve O arasındaki mesafe z yönüne paralel olarak $1,992 \text{ Å}$ ve diğer üç yönde $1,973 \text{ Å}$ 'dur. Özgül ağırlığı $5,72 \text{ gr/cm}^3$ 'dür [14]. Şekil 2. 9' da wurtzite ve kaya tuzu yapıları görülmektedir [15].

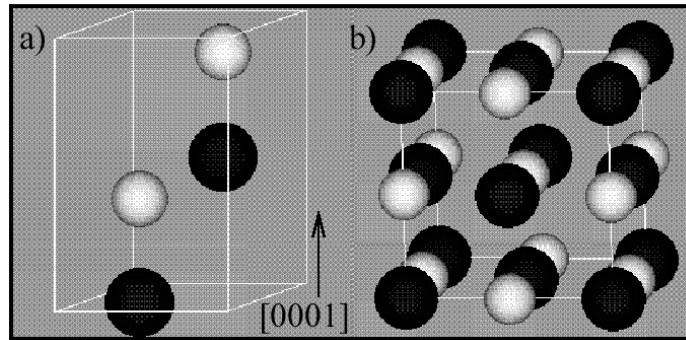
Şekil 2. 9' da ZnO birim hücrelerinin a) Wurtzite görünüşü b) Kaya tuzu görünüşü. Zn atomları siyah, Oksijen atomları ise beyaz renkle gösterilmiştir [15].

ZnO yapısı oldukça açıktır, Oktahedrallerin tamamıyla tetrahedrallerin yarısı boştur. Bu nedenle ZnO örgüsünün içerisine dışardan gelen ilaveler oldukça kolay

yerleşirler. Bu açık yapı ayrıca hataların çeşidini ve difüzyon mekanizmasını etkiler. ZnO'nun tek kristali n-tipi iletkenlik gösterir [14].



Şekil 2.8. ZnO'nun Kristal Yapısı [13] .



Şekil 2.9 ZnO 'in Wurtzite ve kaya tuzu yapısının şekli. a) Wurtzite görünüşü b) Kaya tuzu görünüşü [15]

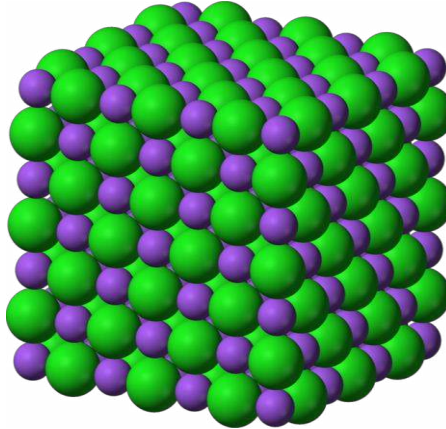
2.4.3.1.1 ZnO'in Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

- a) **Renk:** Saf ZnO oda sıcaklığında beyaz renktedir. Ancak ısıtıldığında sarı rengini alır. ZnO, farklı sıcaklıklara ısıtıldığında sarı, yeşil, kahverengi ve kırmızı başta olmak üzere farklı renkler de alabilir. Bu renk farklılıkları kristal yapıdaki % 0,02-0,03 oranındaki boşluklardan kaynaklanmaktadır[16].
- b) **Ergime sıcaklığı ve buhar basıncı:** ZnO ergime özelliğine sahip değildir ve bozulma sıcaklığı yaklaşık olarak 1975 ± 25 °C'dir. Kısmi buharlaşma ise 1300°C'nin üzerinde meydana gelir. 1458 °C'nin üzerinde buhar basıncı artar ve 1500°C'de buhar basıncı 12 mmHg ve 1700°C'de 760 mmHg'ya ulaşır [16].

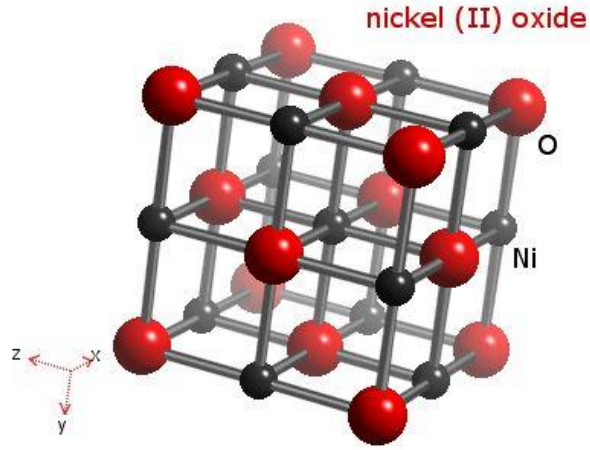
- c) **Eriyebilirlik:** ZnO suda çözünme özelliğine sahip değildir, çözünürlüğü 25 °C’de 0,005 gr/lt’dir. ZnO’nun sulu amonyaktaki çözünürlüğü ise daha fazladır (0,28 gr/lt). ZnO hem asit hem de baz içersinde çözünür, yani amfoterdir [16].
- d) **Elektronik yapısı ve elektriksel iletkenlik:** ZnO, n-tipi yarı iletkenlik özelliğine sahiptir, hareketli elektronlar elektrik iletimini ($\text{Zn}_{(1+x)}\text{O}$) sağlarlar ve ZnO’nun elektrik iletimini Li_2O ve Al_2O_3 gibi bazı oksitlerin değişik miktarlarda ilavesiyle farklılık göstermektedir [11]. ZnO’in elektronik yapısı, tamamen dolu bir 2p (O^{-2}) bandı ve boş bir 4s bandı (Zn^{-2}) içermektedir. Band (band gap) genişliği ise yaklaşık olarak 3. 3 eV’tur [17]. Bununla birlikte, ZnO’teki kusurların üzerine yapılan araştırmaların pek çoğu, ana kusurun $\text{Zn}_{(1+x)}\text{O}$ formülü ile gösterilen sitokimiyetrik olmayan Zn fazlası sonucu oluşan arayer Zn olduğunu göstermektedir [16].

2.4.3.2 NiO’in Kristal Yapısı ve Özellikleri

Yarı iletken özellikteki NiO’in kristal yapısı yaygın kaya tuzu yapı olarak bilinir (Şekil2.10). NiO kristalleri oktahedral görünüşe sahiptir (Şekil 2.11). NiO’in tek kristali p-tipi iletkenlik gösterir.



Şekil 2. 10 NiO’in kristal yapısı



Şekil 2. 11 NiO'in kaya tuzu görünüşü

2.4.3.2.1 NiO'in Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

- a) **Renk:** Saf NiO yeşil renktedir. Ancak farklı sıcaklıklarda ısıtıldığında gri ve siyah olmak üzere farklı renkler de alabilir.
- b) **Eriyebilirlik:** NiO suda çözünme özelliğine sahip değildir. NiO amonyum hidroksit ve potasyum siyanürde çözünür. NiO'in erime noktası 1955 °C'dir.
- c) **Elektronik yapısı ve elektriksel iletkenlik:** NiO çok yönlü geniş doyum aralığına sahip yarıiletken bir malzemedir. Nikel oksit, indiyum oksit, kalay oksit ve çinko oksit gibi saydam iletken oksit filmleri, rutin olarak optik-elektronik cihaz için şeffaf bir elektrot ve pencere kaplamalar olarak kullanılır. Bu filmlerin n-tipi olanları vardır. Ancak p-tipi iletken filmler püskürtme yöntemi ile çalışan cihazlar için optik camlar olarak gereklidir. NiO yarıiletkeninin band aralığı yaklaşık 3,6-4,0 eV aralığına sahiptir. Bu malzeme görünür ve yakın kızılötesi radyasyon bölgesindedir. NiO filmler, termistörler, yüksek güçlü ultra-kapasitörler, minyatür pil ve optik anahtarlama cihazları, elektro kaplama, yakıt pili elektrotlarında potansiyel uygulamaların bir sonucu olarak sanayi ve akademik alanlarda büyük ilgi görür. Pek çok çöktürme tekniği NiO filmlerin hazırlanması için kullanılmıştır.

3. pn EKLEMLERİ VE ÖZELLİKLERİ

pn eklem 1940 yılında Ohl tarafından keşfedilmiştir ve bir pn eklemden p-tipi bölgede ileri besleme durumunda diyot üzerinden büyük akım geçerken n-tipi bölgede ters besleme durumunda ise diyot üzerinden küçük bir akım geçtiğini bulmuştur. Daha sonra da Bell Laboratuvarlarında p-tipi alıcı safsızlıkları ile n-tipi verici safsızlıkları arasındaki ilişkiyi bulmuşlardır. 1949 yılında Shockley tarafından pn eklem diyot denklemi bulunmuştur [3].

pn eklem; p-tipi yarıiletkende n-tipi bir bölge oluşturulması veya n-tipi yarıiletkende bir p-tipi bölge oluşturulması ile elde edilir ve pn eklem oluşturulurken en önemli nokta, yarıiletkenin kristal yapısının bozulmamasıdır [18]. Bir yarıiletkende p-tipi ve n-tipi bölgeler oluşturulurken katkı oranları az, orta veya çok katkılı olabileceğinden pn eklem farklı davranışlar gösterirler. Bundan dolayı çok çeşitli ve çok sayıda pn eklem vardır [19].

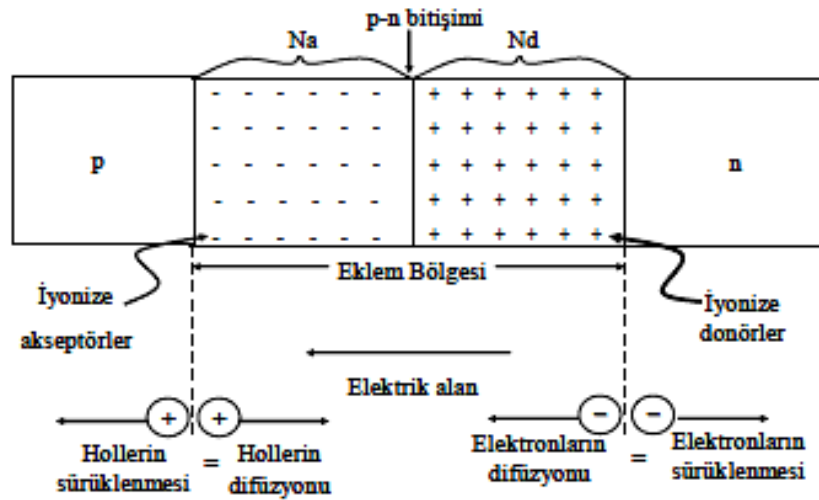
pn eklem modern yarıiletken güç cihazların temel yapı taşlarını oluştururlar [20]. Böylece pn eklem modern elektronik uygulamaların ve yarıiletken cihazların anlaşılmasında büyük önem taşır. pn eklem doğrudan ve anahtarlama gibi elektronik devrelerde temel işlevleri vardır [21]. Yapısında pn eklem bulunan elektronik elemanlara örnek olarak pn eklem diyot, transistör, güneş pili verilebilir.

pn eklem; p-tipi bölgesi n-tipi bölgesine göre pozitif olduğunda yani ileri besleme durumunda pn eklem üzerinden büyük akım geçerken, p-tipi bölgesi n-tipi bölgesine göre negatif olduğunda yani ters besleme durumunda ise pn eklem üzerinden çok küçük akım geçer. Bundan dolayı pn eklem bir yönde akım geçiren bir devre elemanı, yani diyot olarak kullanılabilir. Böylece pn eklem yarıiletken diyot görevini görür [22]. pn eklem diyot; entegre devre teknolojisinde en temel yarıiletken cihazlarından biridir ve pn eklem diyot karakterizasyon ve eklem özellikleri için kontrol etme aracıdır [22]. pn eklem karakteristiklerinden eklem genişliği, katkı konsantrasyonu, termal tavlama ve kontak kalitesi tahmin edilebilir ve böylece diyot denklem çözümleri sadece cihazın karakterizasyonu ve uygulamaları için önemli değil aynı zamanda üretim süreci karakterizasyonu ve kalibrasyonu içinde önemlidir [22].

3.1 pn Eklemi Temel Yapısı

p-tipi yarıiletkende boşlukların konsantrasyonu, n-tipi yarıiletkende ise elektronların konsantrasyonu büyüktür. Bundan dolayı bir p-tipi yarıiletkende n-tipi bir bölge oluşturulduğu zaman ya da n-tipi yarıiletkende bir p-tipi bölge oluşturulduğu zaman yani bir pn eklem oluşumu sırasında büyük konsantrasyon gradyandı oluşur. Bu durumda p-tipi bölgedeki çoğunluk taşıyıcılar olan boşluklar n-tipi bölgeye doğru difüz ederken, n-tipi bölgedeki çoğunluk taşıyıcılar olan elektronlar ise p-tipi bölgeye doğru difüz ederler [23].

Şekil 3. 1’de görüldüğü gibi boşlukların p-tipi bölgeden ayrılması ile geride eksi (-) yükler kalırken elektronların n-tipi bölgeden ayrılması ile de geride artı (+) yükler kalır [24]. Boşlukların ve elektron difüzyonları denge kuruncaya kadar yani p-tipi ile n-tipi yarıiletkenin Fermi enerjileri eşit oluncaya kadar devam eder [18]. Denge durumunda yük geçişlerini engelleyecek bir elektrik alan oluşur. Bu durumda eklem yüzeyinin her iki tarafındaki bölge serbest taşıyıcılar açısından arınmış bölgedir. Bu bölgeye “tüketim bölgesi, uzay yük bölgesi veya eklem bölgesi” denir. pn eklem oluşumu 3.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 pn eklem oluşumu [3].

3.2 pn Ekleminde Kontak Potansiyeli

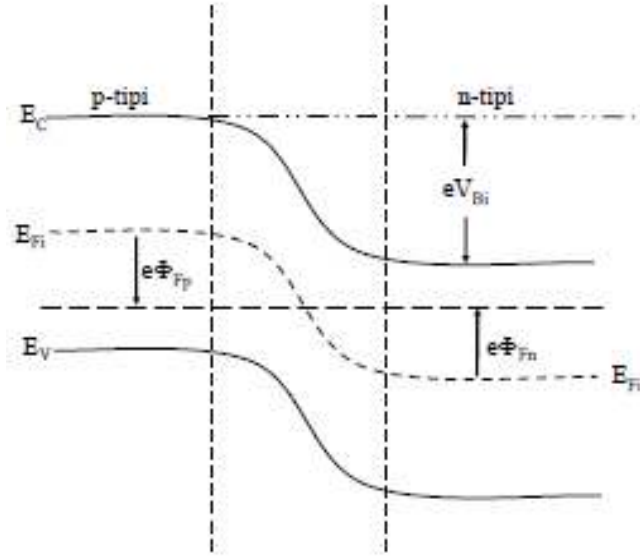
pn eklem oluşmadan önceki p-tipi ve n-tipi yarıiletkenin enerji band diyagramı Şekil 3. 2 'de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi p-tipi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi valans bandının hemen üzerinde bir yerde iken n-tipi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi iletim bandının hemen altında bir yerdedir.

pn eklem oluşum esnasında p-tipi ve n-tipi yarıiletkenin Fermi enerjileri denge durumunda eşitleneceğinden eklem bölgesinde Şekil 3. 3'de görüldüğü gibi valans ve iletim bandlarında bir bükülme meydana gelir. Bunun sebebi ise pn eklem oluşurken tüketim bölgesinde meydana gelen eV_{Bi} enerjisidir [21]. Oluşan bu potansiyele “kontak potansiyel” ya da “dahili potansiyel” denir ve V_{Bi} ile ifade edilir [20].

Kontak potansiyeli oluştuğunda her iki bölgedeki çoğunluk taşıyıcıların difüzyonu sona ererken her iki bölgedeki azınlık taşıyıcılar sürüklenme yoluyla karşı tarafa geçebilir. Bundan dolayı kontak potansiyeli denge niceliğidir. Bu potansiyelin büyüklüğü Kelvin prob kullanılarak ölçülebilir [24]. Bir pn eklem diyotunda kontak potansiyeli;



Şekil 3.2 pn eklem oluşmadan önceki p-tipi ve n -tipi yarıiletkenin enerji-band diyagramı [3].



Şekil 3.3 Denge durumundaki pn eklemnin enerji-band diyagramı pn ekleminde oluşan kontak potansiyeli [3].

$$V_{BI} = |\Phi_{F_n}| + |\Phi_{F_p}| \quad (3.1)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlikteki Φ_{F_n} n-tipi tarafta oluşan potansiyel ve Φ_{F_p} p-tipi tarafta oluşan potansiyeldir. p-tipi bölgede valans bandındaki boşluk konsantrasyonu

$$P_0 = N_a = n_i \exp \left[\frac{E_{F_i} - E_F}{kT} \right] \quad (3.2)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlikteki N_a akseptör katkı yoğunluğu, n_i ; saf taşıyıcı konsantrasyonu, E_{F_i} Fermi enerjisi, k Boltzmann sabiti ve T mutlak sıcaklıktır. p-tipi bölgedeki potansiyel;

$$\Phi_{F_p} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_a}{n_i} \right) \quad (3.3)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlik (3.3) Eşitlik (3.2)'de yerine yazılıp düzenlenirse (3.4) eşitliği elde edilir. n-tipi bölgede iletim bandındaki elektron konsantrasyonu

$$n_0 = N_d = n_i \exp \left[\frac{E_{F_F} - E_{F_i}}{kT} \right] \quad (3.4)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlikteki N_d donör katkı konsantrasyonu, n_i ; saf taşıyıcı konsantrasyonu, E_{F_i} Fermi enerjisi, k Boltzmann sabiti ve T mutlak sıcaklıktır. n-tipi bölgedeki potansiyel

$$e\Phi_{F_n} = E_{F_i} - E_F \quad (3.5)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlik (3. 6) Eşitlik (3. 5)'de yerine yazılıp düzenlenirse;

$$e\Phi_{F_n} = -\frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_d}{n_i} \right) \quad (3. 6)$$

eşitliği elde edilir. Eşitlik (3. 4) ve Eşitlik (3. 6) Eşitlik (3. 1)'de yerine yazılırsa;

$$V_{bi} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \quad (3. 7)$$

eşitliği elde edilir. Kontak potansiyeli, pn eklem sıcaklığına, alıcı ve verici katkı yoğunluklarına göre değişir.

3.3 pn Ekleminde Elektrik Alanı

pn ekleminde eklem bölgesindeki pozitif ve negatif uzay yük yoğunluklarının ayrılması ile eklem bölgesinde bir elektrik alan oluşur [23]. Elektrik alan Poisson denklemlerinden elde edilir ve tek boyutlu Poisson denklemi;

$$\frac{d^2\Phi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s} = \frac{dE(x)}{dx} \quad (3. 8)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlikteki $\Phi(x)$ elektrostatik potansiyel, ρ uzay yük yoğunluğu, ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti ve $E(x)$ elektrik alanıdır. Bu Poisson denklemi çözüldüğünde elektrik alan

$$E = -\frac{eN_a}{\epsilon_i} (x + x_p) \quad -x_p \leq x \leq 0 \quad (3. 9)$$

$$E = -\frac{eN_d}{\epsilon_s} (x_n + x) \quad 0 \leq x \leq x_n \quad (3. 10)$$

eşitlikleri elde edilir. Eşitlik (3. 10) ile Eşitlik (3. 11)'in sol tarafları eşit olduğundan sağ tarafları da birbirine eşit olacaktır

$$N_a X_p = N_d X_n \quad (3. 11)$$

ifadesi elde edilir. Bu eşitlik p-tipi bölgedeki birim alandaki deşiklerin sayısının, n-tipi bölgedeki birim alandaki elektronların sayısına eşit olduğunu gösterir. Eşitlik (3.11) elektronik aygıtların işleyişini açıklamada oldukça önemlidir.

3.4 Eklem Bölgesinin Genişliği

Eklem bölgesi yasak enerji aralığındaki bir konumda difüzyon esnasında tekrar birleşerek nötrleşen elektron-deşik çiftlerini içerir [18]. Eklem bölgesi sınırları içinde taşıyıcı bulanamayacağından bu bölge yalıtkandır. p-tipi bölge tarafındaki eklem bölgesinin genişliği;

$$x_p = \left[\frac{2\varepsilon_s V_{bi}}{e} \left(\frac{N_d}{N_a} \right) \left(\frac{1}{N_a + N_d} \right) \right]^{1/2} \quad (3.12)$$

eşitliği ile verilir. n-tipi bölge tarafındaki eklem bölgesinin genişliği ise;

$$x_p = \left[\frac{2\varepsilon_s V_{bi}}{e} \left(\frac{N_a}{N_d} \right) \left(\frac{1}{N_a + N_d} \right) \right]^{1/2} \quad (3.13)$$

eşitliği ile verilir. pn eklemdeki eklem bölgesinin genişliği eşitlik (3.12) ile eşitlik(3.13) toplamalarına eşit olur. Böylece eklem bölgesinin genişliği;

$$W = \left[\frac{2\varepsilon_s V_{bi}}{e} \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) \right]^{1/2} \quad (3.14)$$

eşitliği ile verilir.

3.5 Eklem Kapasitesi

pn eklem eklem bölgesi yalıtkan olup bu bölgenin iki tarafı ise yarıiletken bölgelerden oluşur. Bundan dolayı pn eklem paralel plakalı bir kondansatör gibi davranır. pn eklem dışarıdan uygulanan voltajın değişmesi ile pn eklem içerisindeki yükün miktarı değişir ve bu değişim kapasitansı verir. Böylece eklem bölgesindeki kapasitans değişimi

$$C = \left| \frac{dq}{dV} \right| \quad (3.15)$$

eşitliği ile verilir. pn eklem eklem bölgesinin yükü ile ilgili olan bu kapasitansa “eklem kapasitansı” veya “tüketim bölge kapasitansı” denir. Eşitlik (3.16)’daki Q

$$Q = eN_d X_p = eN_a X_n \quad (3.16)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlik (3. 16) Eşitlik (3. 15) de yerine yazılırsa

$$C_j = \left[\frac{q\epsilon_s A^2}{2} \left(\frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right) \right]^{1/2} \quad (3.17)$$

eşitliği elde edilir. Bu ifade

$$C_j = \frac{A\epsilon_s}{w} \quad (3.18)$$

eşitliği ile verilebilir. Eşitlikteki C_j eklem kapasitansı, A diyodun alanıdır. Bir taraflı pn eklem katkısı yoğunluğu ve eklem potansiyeli kapasitansın voltaja göre ölçümü kullanılarak bulunabilir. Kapasitansın karesinin tersi;

$$\frac{1}{C_j^2} = \frac{2}{q\epsilon_s A^2} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} (V_i - V) \quad (3.19)$$

eşitliği ile verilir. Bu eşitlik doğrusal bir bağımlılık gösterir. Eklem potansiyeli;

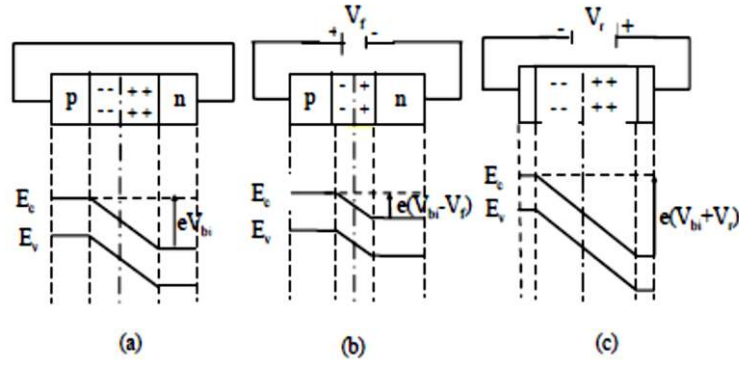
$$\frac{d\left(\frac{1}{C_j^2}\right)}{dV_i} = - \frac{2}{q\epsilon_s A^2} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \quad (3.20)$$

eşitliğinden elde edilir yani, $1/C^2$ eğrisi ve voltaj ekseninin kesişmesinden bulunur. Katkı yoğunluğu ise eğrinin eğiminden elde edilir.

3.6 pn Eklem Diyotun I-V Karakteristikleri

pn eklem diyotun I-V karakteristikleri; pn eklem diyot uçlarına uygulanan gerilim ile pn eklem diyotun üzerinden geçen akım arasındaki ilişkiyi gösterir. pn eklem diyot doğru ve ters besleme altında farklı davranışlar sergiler.

pn eklem diyota dışarıdan bir voltaj uygulanırsa pn eklem diyot beslenmiş olur. Böylece pn eklemde denge durumu bozulur yani boşlukların ve elektronların arasındaki difüzyon ve sürüklenme akımlarındaki denklemler bozulur. Böylece diyot üzerinden net bir akım geçer.



Şekil 3.4 pn eklem diyotta uygulanan gerilimin etkileri [19]. (a) denge durumu, (b) ileri besleme durumu ve (c) ters besleme durumu için enerji band diyagramları

Şekil 3. 4 (a)'da dışarıdan bir gerilim uygulanmadan önceki bir pn eklem diyotun nötr bölgeleri ve eklem bölgesi gösterilmiştir. Bu durumda diyotun eklem bölgesinde eV_{bi} kadar bir potansiyel enerji meydana gelir.

pn eklem diyotun Şekil 3. 4 (b)'de görüldüğü gibi p-tipi tarafına pozitif n-tipi tarafına negatif olacak şekilde dışarıdan bir gerilim uygulanırsa diyot ileri beslenmiş durumda olur ve V pozitifdir. Bu durumda pn eklem diyotun p-tipi bölgesindeki elektron enerji düzeyleri n-tipi bölgesine göre aşağıya iner. Enerji engeli azaldığı için n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye elektronların ve boşlukların akışı artar [25]. Böylece elektronlar ve boşluklar p-tipi bölgeden n-tipi bölgeye oluşan net elektrik akımına katkıda bulunurlar.

pn eklem diyotun Şekil 3. 4 (c)'de görüldüğü gibi p-tipi tarafına negatif n-tipi tarafına pozitif olacak şekilde bir gerilim uygulanırsa eklem ters beslenmiş durumda olur ve V negatiftir. Bu durumda pn eklem diyotun elektronların n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye doğru akışı ve boşlukların p-tipi bölgeden n-tipi bölgeye doğru akışları potansiyel engelin artışından dolayı azalır. n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye doğru küçük bir elektrik akımı oluşur [3]. Oluşan bu akıma “doyum akımı” denir. pn eklem diyot ters besleme durumunda bu akım değerinden başka akım değeri geçirmediği için bir doğrultucu görevi görür [18].

pn eklem diyota dışarıdan bir gerilim uygulandığı zaman üzerinden geçen toplam akım;

$$I = I_0 \left[\exp \frac{qV_D}{nkT} - 1 \right] \quad (3. 21)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlikteki I_0 doyum akımı, V_D diyot üzerine düşen gerilim, n idealite faktörü, k Boltzmann sabiti, T Kelvin cinsinden sıcaklıktır. Eşitlik (3. 22)'deki n idealite faktörü çekilirse;

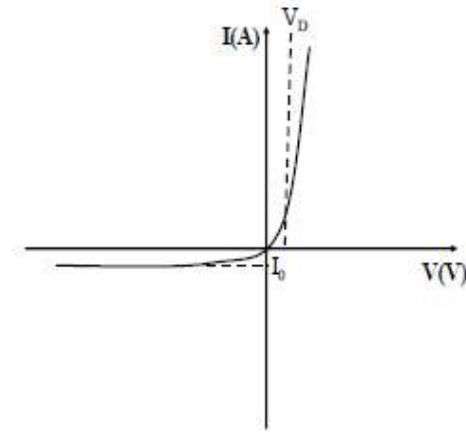
$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (3. 22)$$

eşitliği elde edilir. n idealite faktörü; gerilim ve sıcaklığa bağlı deneysel bir değişkendir [25]. İdealite faktörü ideal diyot karakteristiğinden olan sapmayı belirler. Yarıiletken aygıtları için en önemli parametre idealite faktörüdür, çünkü idealite faktörü bu aygıtların elektriksel davranışlarını açıklar [26]. Eklem bölgesinde yeniden-birleşme göz önüne alınırsa idealite faktörü $1 < n \leq 2$ arasında bir değer alır [27]. Eğer eklem bölgesinde taşıyıcı yeniden birleşmenin olmadığı kabul edilirse idealite faktörü $n=1$ olur [27]. İdealite faktörü 1'e eşit ise bu diyota "ideal diyot" denir. İdeal pn eklem diyota dışarıdan bir gerilim uygulandığı zaman diyot üzerinden geçen toplam akım;

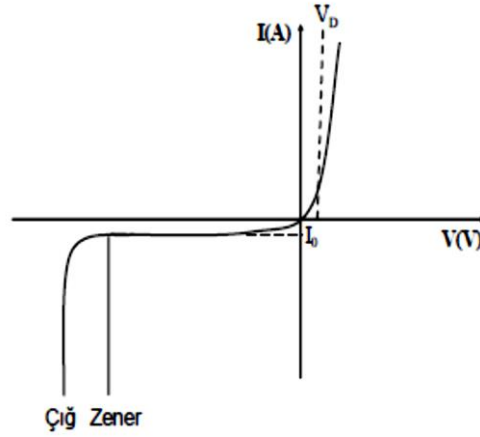
$$I = I_0 \left[\exp \frac{qV_D}{kT} - 1 \right] \quad (3. 23)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlikteki V_D diyot üzerine düşen gerilim, I_0 doyum akımı, k Boltzmann sabiti ve T Kelvin cinsinden sıcaklığıdır. İdeal pn eklem diyot modeli için akım-gerilim (I-V) karakteristiği Şekil 3. 5 'te verildiği gibidir.

İdeal pn eklem diyotta ileri besleme durumunda akım eksponansiyel olarak artarken, ters besleme durumunda ise akım I_0 doyum akımından sonra sabit kalmaktadır [3]. I_0 doyum akımı değerinden sonra voltaj değeri arttırılırsa eklem bölgesindeki elektrik alan büyür ve elektrik alanın belli bir değerinden sonra eklemden büyük bir akım geçer [18]. Bu olaya "eklem kırılması" denir. Eklem kırılması Şekil 3. 6' da görüldüğü gibi çığ ve zener tipi olmak üzere iki guruba ayrılır ve çığ tipinde akım daha yumuşak zener tipinde akım daha sert şekilde artmaktadır [18].



Şekil 3.5 İdeal pn eklem diyotun I-V grafiği [18].



Şekil 3. 6 Ters besleme durumunda pn eklem zener ve çığ tipi kırılmaları [18].

3.7 pn Eklem Diyot Direnci

pn eklem diyotun elektriksel olarak direnci; diyot uçlarındaki gerilim ile diyot üzerinden geçen akımın oranı;

$$R = \frac{V}{I} \quad (3. 24)$$

eşitliği ile verilir. Ancak R büyüklüğü V ve I ya bağımlı olarak çok fazla değiştiğinden ΔI akım aralığındaki ΔV değişimine bağlı olarak,

$$R = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (3. 25)$$

şeklinde tanımlanması daha uygundur.

3.8 Omik Kontak

İleri ve ters besleme durumlarında akımın iletildiği kontaklara “omik kontak” denir. Omik kontak metal ile yarıiletken arasında gerçekleşir. Yarıiletken yüzeyde omik kontak oluşturulması için yarıiletkenin yüksek katkılı olması gerekir. Bundan dolayı yarıiletkende omik kontak oluşturmak için yarıiletken yüzey metal ile kaplanır. Metaldeki elektronların yarıiletken yüzeye difüzyon etmesi için ısıtma işlemi yapılır. Metaldeki elektronların ısıtılma sonucu yarıiletken yüzeye geçmesi ile yarıiletken yüzeyin katkı konsantrasyonu artar. Bu nedenle p ve n-tipi katmanlara kontak yapılacak metalin seçimi önemlidir. Yarıiletkende katkı konsantrasyonu arttıkça bariyer yüksekliği azalır ve elektronlar tünelleme yolu ile yarıiletken yüzeye kolaylıkla geçerler [3].

İdeal bir omik kontakın I-V karakteristikleri doğrusal olmalıdır. Omik kontakın direnci yarıiletkenin bulk direncine göre veya yarıiletkenin seri direncine göre çok küçük olduğundan ihmal edilebilir [2]. Omik kontakın direncini azaltmak için aygıtın aktif bölgesi ile metal arasına yüksek katkılı yarıiletken yerleştirilmelidir. Kontak oluşturacak metalin yarıiletkene iyi difüz etmesi, metal-yarıiletken engelini daraltır. Böylece taşıyıcıların transferi tünelleme ile olabileceğinden, kontak seri direnci azalır ve akım iletimi iyileşir.

Omik kontakların spesifik kontak dirençleri;

$$R_C = \left(\frac{\partial J}{\partial V} \right)^{-1}_{V=0} \quad (3.26)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlikteki J akım yoğunluğu ve R_C kontak direncinin birimi $\Omega \cdot m^2$ 'dir. Eşitlik (3. 26) düzenlenirse;

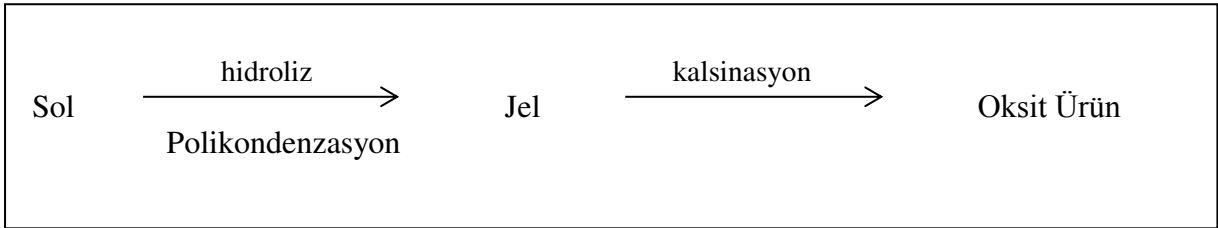
$$R_C = \frac{k}{eA^*T} \exp \left(\frac{e\Phi_B}{kT} \right) \quad (3.27)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlik düşük bariyer yüksekliğine sahip metal-yarıiletken kontaklarda küçük kontak direnci (R_C) elde etmek için kullanılır [2]. İdeal bir omik kontakın I-V karakteristikleri doğrusal olması gerekir. İncelen bir yapının eğer I-V karakteristikleri doğrusal değilse, metal-yarıiletken arasında bir engel oluşmuştur; bu engeli azaltmak için yapıya termal tavlama işlemi uygulanır. Bu tavlama işlemin

sonucunda metal-yarıiletken arasındaki omik kontakın I-V karakteristikleri doğrusal hale gelmeye başlar. Tavlama sıcaklıkları artırılarak omik kontakın I-V karakteristiğinde istenilen doğrusallık elde edilir [3].

4. SOL-JEL YÖNTEMİ

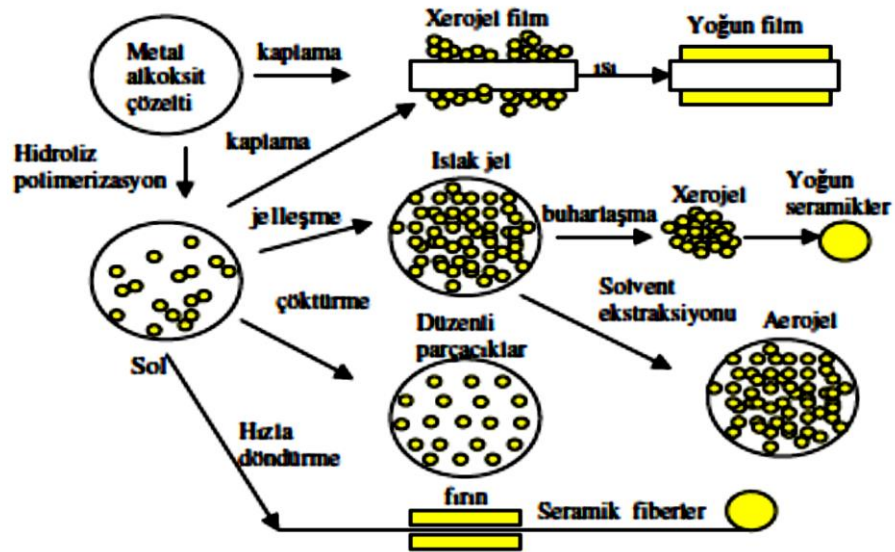
Sol-jel yönteminin, cam ve seramik alanındaki önemi geçmiş yıllar içinde hızla artmıştır. Metal alkoksit monomerlerinden, çeşitli inorganik ağların oluşturulduğu bu yöntem, ilk kez 1800’lerde keşfedilmiş ise de, 1930’ ların başlarından itibaren üzerinde daha kapsamlı çalışılmaya başlanmıştır [28-29]. 1970’lerde monolitik inorganik jellerin, yüksek sıcaklıkta erime yöntemi kullanılmadan, düşük sıcaklıklarda oluşturulması ve camlara dönüştürülmesi, bu konuya olan ilgiyi yeniden gündeme getirmiştir [30]. Bu proses sayesinde, istenilen özelliklere (sertlik, optik transparanlık, kimyasal dayanıklılık, gözeneklilik ve kimyasal direnç) sahip homojen inorganik oksit malzemeler, inorganik camlara dönüşüm için gerekli olan yüksek erime sıcaklığına ihtiyaç duyulmadan, oda sıcaklığında elde edilebilmektedir [30,32]. Ayrıca jelleşmiş çözeltinin viskozitesine ve jelleşme şartlarına bağlı olarak elde edilen ürünler; fiberler, monolitler, ince- kalın film tabakaları ve tozlar gibi çeşitli formlarda oluşturularak, optik, koruyucu ve gözenekli filmler, optik kaplamalar, dielektrik ve elektronik kaplamalar, yüksek ısıli süper iletkenler, destek fiberler, dolgular ve katalizörler gibi özel uygulama alanlarında kullanılabilmektedir [32,34]. Sol-jel kimyasının anlaşılması için gereken kavramlar Tablo 4. 1’ de verilmiştir.



Şekil 4. 1 Sol-jel oluşumunun şematik gösterimi

Tablo 4. 1 Sol-gel kimyasının anlaşılması için gereken kavramlar [33].

Kavram	Tanım
Kolloid	Kolloid ayrılmış fazların çok küçük olduğu (1-1000nm) ve bu nedenle gravitasyonel kuvvetin ihmal edilebildiği, etkileşimlerin kısa erimli Van-der Waals etkileşimi, yüzey yükleri gibi etkileşimleri daha çok bağlı olduğu süspansiyondur.
Sol	Katı parçacık veya kümelerin bir sıvıdaki koloidal süspansiyonudur.
Ligand	Metal-Organik bileşikte metal içermeyen kısımdır. Başka bir deyişle bir metal katyon merkezi ile birleşerek kompleks oluşturan iyon veya moleküldür.
Metal Alkosit	Bir metal veya metaloit atomuna bağlı organik liganda sahip metal-organik bileşiktir.
Alkosit	Sıvı formundaki metal-organik bileşimdir. Örneğin; Silikon Tetraethoksit (TEOS). $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$
Alkan	Tekbir bağ ile bağlı sadece C ve H' dan oluşmuş moleküldür. Örneğin; Metan (CH_4)
Alkil	Alkan molekülünden bir Hidrojen alınarak elde edilmiş ligandtır. Örneğin; Metil (CH_3), Etil (C_2H_5)
Alkol	Bir alkil grubuna OH (Hidroksil) grubu ekleyerek oluşturulan moleküle denir. Örneğin; Metanol (CH_3OH), Etanol (Etil alkol: $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ v.b.)
Alkosi	Alkoldeki hidroksilden bir hidrojen alınarak elde edilen liganda denir. Örneğin; Methoksi (OCH_3), Ethoksi (OC_2H_5)
Hidroliz	Bir hidroksil iyonunun metal atomuna bağlandığı reaksiyona denir.
Yoğunlaşma	Hidrolize olmuş moleküllerin birbirine bağlanmasına denir.



Şekil 4.2 Çeşitli Jel Türevli Ürünlerin Şematik Görüntüsü [35].

Sol-jel yönteminde, metal alkoksitlerin (Si, Ti, Al, Zn, v.s.) asidik ya da bazik ortamda hidrolizini takiben kondenzasyonundan çeşitli inorganik ağ yapılar oluşturulmaktadır [36, 38]. Şekil 4. 1’de sol-jel oluşumu şematik olarak ve Şekil 4. 2’ de sol-jel reaksiyonu sonucunda elde edilen yapılar gösterilmiştir [39-40].

Bu yapılar; jellerin kurutulmasıyla meydana gelen katı haldeki xerojellerden elde edilen yoğun filmler ve seramikler, sollerin çöktürülmesiyle oluşan çeşitli düzenli parçacıklar, hızlı döndürme ve fırınlama işlemlerinden sonra elde edilen seramik fiberler, ıslak jelin sıvı bileşeninin gazla yer değiştirilmesiyle oluşan jele benzeyen yalıtkan, düşük yoğunluklu ve gözenekli bir katı olan arojelldir.

4.1 Sol-Jel Kaplama Yöntemleri

Sol-Jel kaplama yöntemleri üç tanedir. Bunlar, daldırarak kaplama (dipcoating), spin-kaplama (spin-coating) ve püskürterek kaplama (spray pyrolysis) yöntemleridir.

4.1.1 Daldırarak Kaplama (Dip Coating)

Daldırarak kaplama, temel olarak bir tabakayı, solüsyon içine daldırma ve daha sonra tabakayı yavaşça geri çekmekle gerçekleştirilen bir kaplama tekniğidir.

Tabaka dışarı doğru çekilirken fazla çözelti tabakadan ayrılır. Daha sonra çözelti buharlaşarak ince film elde edilir. Genellikle daldırma birkaç kez tekrarlanarak daha kalın bir film elde edilir. Tek bir daldırma ile elde edilen ideal film kalınlığı 0,1 – 0,45 µm arasındadır. Film bundan daha kalın olursa çözelti kurutulduğunda filmdeki yapışma kuvveti filmin taban yüzeyine paralel yönde daralmaya zorlayarak filmin kırılmasına neden olabilir. Daldırarak kaplamada film kalınlığı aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir [41]. Daldırarak kaplama yönteminin şematik gösterimi şekil 4. 3’ de gösterilmiştir.

$$h = c_1 \sqrt{\frac{\eta U}{\rho g}} \quad (4. 1)$$

h =kalınlık

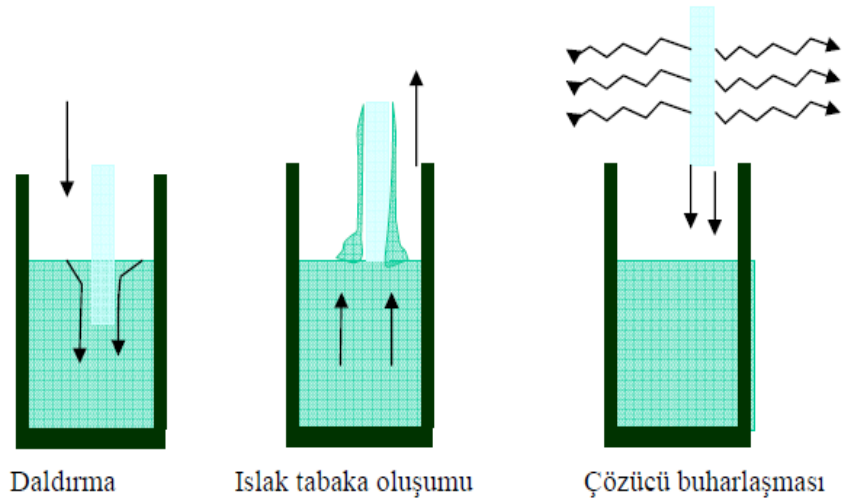
c_1 =sabit

U =geri çekme hızı

η =viskozite

ρ =yoğunluk

g =yerçekimi ivmesidir.



Şekil 4. 3 Daldırarak kaplama yönteminin şematik gösterimi [42]

4.1.2 Püskürterek Kaplama (Spray Pyrolysis) Tekniği

Bu teknikte kaplama çözeltisinin kaplanacak yüzey, sprej tabancalarıyla veya püskürtme materyalleriyle kaplama yapılır. Bu yöntemde solüsyon ısıtılmış tabakaya püskürtülür. Sprej damlacıkları tabakaya çarptığında çözünen madde tabaka üzerinde yoğunlaşırken çözelti buharlaşır ve bir süre sonra yüzeyde ince film oluşur.

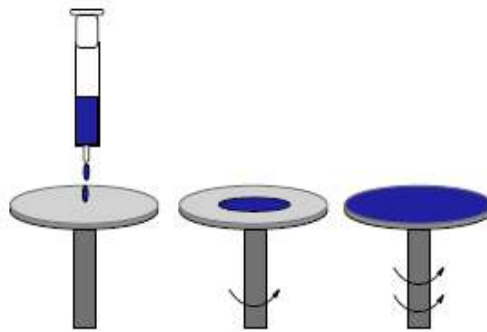
Özellikle, daldırma ve döndürme gibi kaplama teknikleri ile kaplanmayacak kadar düzgün olmayan yüzeylerin kaplanmasında bu yöntem tercih edilmektedir [43].

4.1.3 Döndürerek Kaplama (Spin-Coating) Tekniği

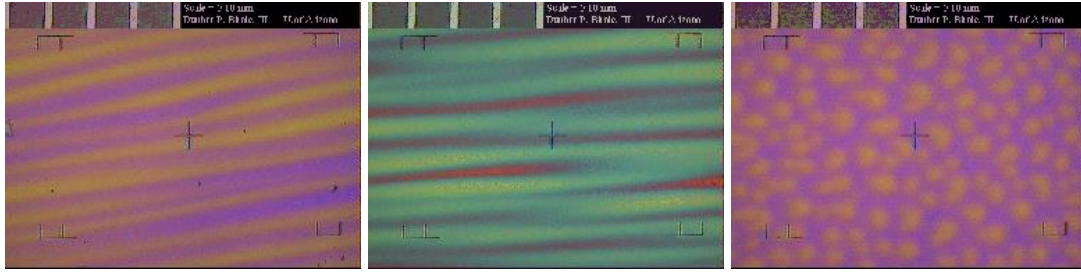
Döndürme ile kaplama tekniği, uzun zamanlardan beri ince film oluşturmada kullanılmaktadır. Döndürme ile kaplama, Şekil 4.4' te görüldüğü gibi, kaplama çözeltisinin, küçük bir gölet oluşturacak şekilde, kaplanacak olan malzemenin ortasına damlatılması ve daha sonra substratın yüksek hızla döndürülmesi temeline dayanır. Merkezci hızlandırma, kaplama çözeltisinin tamamının substrat üzerinde yayılmasını ve yüzeyde ince bir film oluşmasını sağlar. Film kalınlığı ve diğer özellikler kaplama çözeltisinin özelliğine (Viskozite, katı oranı, yüzey gerilimi v.b) bağlıdır ve kaplama işlemindeki parametreler kaplama çözeltisinin özelliğine göre seçilir. Son döndürme hızı, hızlandırma, döndürme süresi ve buhar çıkışının bitmesi (uçucu malzemeler için) gibi faktörler filmin özelliklerini ve kalitesini belirler.

Döndürme ile kaplamada en önemli faktörlerden birisi tekrarlanabilirliktir. Parametrelerdeki küçük bir değişiklik kaplamada çok fazla değişikliğe neden olabilir.

Döndürme ile kaplamanın işlem sırası temel olarak, substrat yüzeyinde kaplama çözeltisinin dağılması, sıvının ince bir şekilde yayılması için yüksek hızla (500-4000 rpm) döndürme ve film üzerinden çözeltinin fazlasının uzaklaştırılması için kurutma basamaklarını içerir. Döndürme hızı 10 saniye ile birkaç dakika arasında olabilir. Dönme hızı ve süresi kalınlığı belirlemede önemlidir. Genel olarak 500-4000 rpm gibi yüksek döndürme hızı ve daha uzun döndürme süresi, oldukça ince bir kaplamanın elde edilmesini sağlamaktadır [43]. Döndürerek kaplama yönteminin şematik gösterimi Şekil 4.4' de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Döndürerek kaplama yönteminin şematik gösteri [43].



4.2 Sol-Jel Uygulamaları

Sol jel yönteminin kullanıldığı bazı uygulamalar aşağıdaki gibi verilebilir;

- Mikro devre üretiminde - fotoresistleri kaplamada.
- Magnetik disk kaplamalarında.
- Düz ekran display kaplamalarında- Antireflection kaplamalarında.
- Kompak Disklerde-DVD, CD ROM, v.b.
- Televizyon tüpü fosforu kaplamada.
- Kimyasal veya termal koruyucu katmanlarda.
- Optik amaçlı filtre kaplamalarında.
- Sol-Jel cam elde etmede.
- İnce seramik tozları elde etmede.

Sol jel yönteminin üstünlükleri ve sınırlılıkları Tablo 4. 2' de özetlenebilir.

Tablo 4. 2 Sol-jel yönteminin üstünlük ve sınırlılıkları [33].

Üstünlükleri	Sınırlılıkları
Maliyeti düşüktür.	Film kalınlığını kontrol altında tutmak daha zordur.
Kimyasal kompozisyonu kontrol etmek daha kolaydır.	Yüksek kalitede ince film kristali elde etmede diğer yöntemlere göre daha az idealdir.
Çalışma prosesi için basit kaplar ve ortam için atmosferik şartlar yeterli olabilmektedir.	Kullanılan organik hammadelerin sağlığa zararlı olmaları uygulamalarda özel koruyucu tedbirler alınmasına neden olduğundan maliyeti artır.
Uygulanması diğer yöntemlere göre daha kolaydır.	Solüsyonun yüzeye yapışabilir olması gerekir.

5. MATERYAL VE METOT

5.1 Kaplama Öncesi Hazırlıklar

Kaplama öncesi kullanacağımız FTO (Flor Katkılı Kalay Oksit) camlar belirlenip, ölçümler için uygun şekilde kesildi. Kesilen camların temiz olmaması oluşturulacak filmlerde kırılmaya neden olabileceği gibi film oluşumunu bile etkileyebileceğinden, kaplama öncesi yapılması gerek en önemli işlemlerden biri olan kaplanacak camların temizlenme kısmına geçildi. Bunun için çalışmanın yapılacağı her FTO camı ultrasonik banyoda sırasıyla aseton, alkol ve De-iyonize su içerisinde beşer dakika yıkandıktan sonra çıkarıldı. Çıkarılan camlar 80°C' ye ayarlanan etüv içerisinde yerleştirilip kurutulmaya bırakıldı. Son olarak camlara azot gazı verilerek yüzeyde oluşabilecek tozlardan temizlendi.

5.2 Çözeltilerin Hazırlanması

Filmlerin oluşturulması için kullanılacak çözeltide; çinko kaynağı olarak çinko asetat ($(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), nikel kaynağı olarak nikel asetat ($\text{Ni}(\text{OCOCH}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) kullanıldı.

Çinko asetat çözeltisi hazırlanırken öncelikle uygun çinko asetat miktarı belirlenip, hassas terazi ile tartılarak beher içine bırakıldı. Daha sonra beherin içine çözücü olarak 2-methoxyetanol eklenerek manyetik karıştırıcıda 60°C de 30 dakika karıştırıldı. Elde edilen çözeltiye yavaş yavaş etanolamin eklenerek çözeltinin şeffaflaşması ve daha stabil hale gelmesi sağlandı. Çözelti tekrardan 60°C' de 30 dakika daha karıştırıldı. Böylece elde edilen çözelti sol-jel metodu ile kaplanacak filmlerin sol kısmını oluşturmuş oldu.

Nikel asetat çözeltisi hazırlanırken de uygun nikel asetat miktarı belirlenip hassas terazi ile tartılarak beher içine bırakıldı. Daha sonra beherin içine çözücü olarak 2-methoxyetanol eklenerek manyetik karıştırıcıda nikel asetat çözünene kadar karıştırıldı ve yeşil renkli bir çözelti elde edildi. Hazırlanan çözelti içerisinde damla damla HCl ilave

edilerek 60 °C’ de 60 dakika karıştırıldı. Böylece sol-jel metodunun sol kısmı olan çözelti hazırlanmış oldu. Yapılan deneylerde kullanılan kimyasal maddelerin açık formülleri, mol ağırlıkları ve çözeltilerdeki miktarları aşağıdaki tablodaki gibidir.

Tablo 5. 1 Deneylerde kullanılan kimyasal maddeler, bu maddelerin kimyasal formülleri, mol ağırlıkları ve miktarları

Madde	Formül	Mol Ağırlığı(g/mol)	Miktarı
Çinko Asetat	$(\text{CH}_3\text{COO})_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	219.49	1.0974 gr
2-Methoxyetanol	$\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$	76.09	10 mL
Etanolamin	$\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$	61,08	0.3 mL
Nikel Asetat	$(\text{Ni}(\text{OCOCH}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O})$	248.84	1.86645gr
2-Methoxyetanol	$\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$	76.09	50 mL
Hidroklorik asit	HCL	36.45	0.1 µL

5.3 İnce Filmlerin Kaplanması

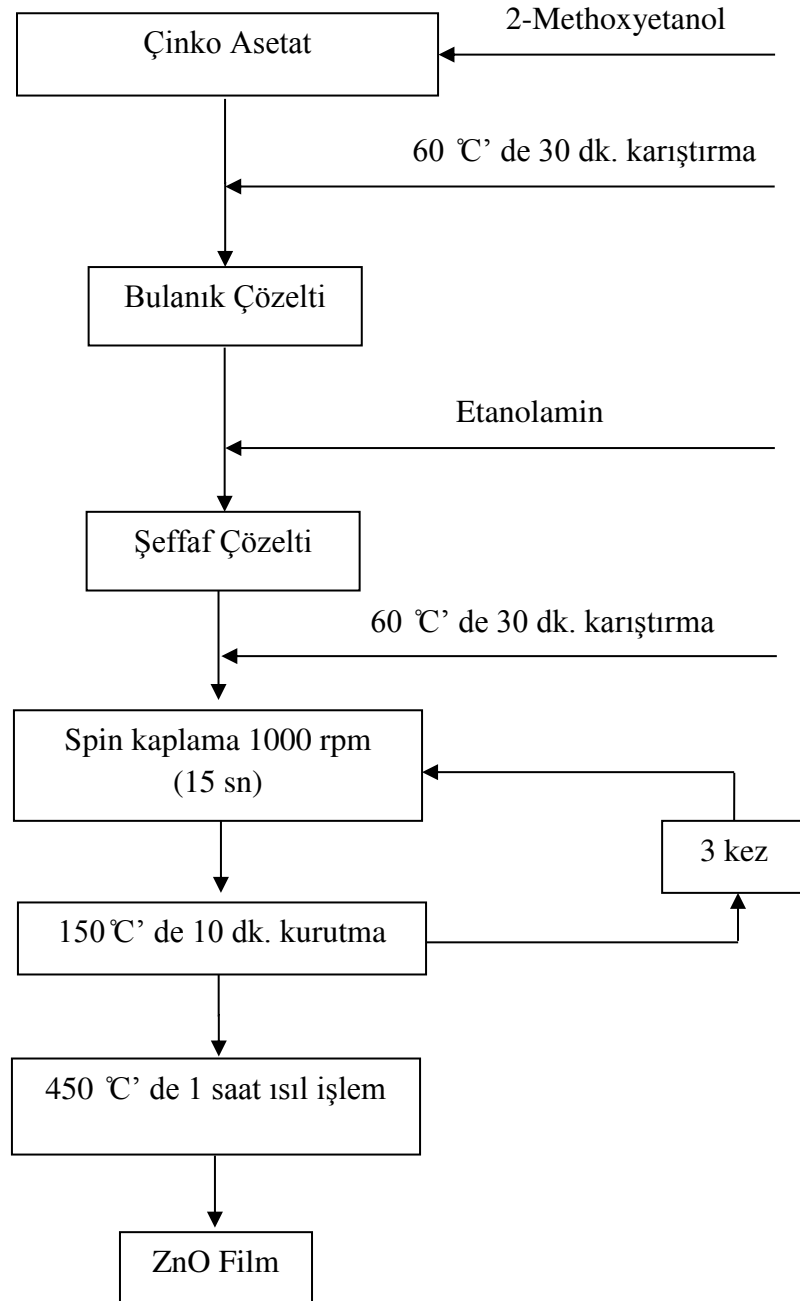
İnce filmlerin kaplanması için daldırma, püskürtme ve döndürme metotları kullanıldı. Çinko asetate çözeltisi ile kaplanacak filmler için döndürme ile kaplama metodu, nikel asetate çözeltisi içinse daldırma ile kaplama metodunun uygun olduğu belirlenip filmler kaplandı.

5.3.1 Çinko Oksit Filmlerinin Eldesi

Çinko oksit filmlerinin elde edilme metodu belirlendikten sonra, döndürme cihazı 15 saniye süre boyunca 1000 rpm dönme hızı olacak şekilde ayarlandı. Cihazın numune yerleştirme kısmına FTO camı yerleştirilip cihaz çalışır duruma getirildi. Dönme esnasında camın üzerine çözelti damlatılarak filmler oluşturuldu. Kaplanan taşıyıcılar 150 °C’ ye kadar ısıtılmış sıcak yüzey üzerinde 10 dakika süresince kurutuldu. Bu ısıtmanın amacı kalan solventi buharlaştırmak ve filmi sertleştirmektir. Filmler aynı şekilde 3 kat oluncaya kadar hazırlandı ve ısıtma işlemi her kat arasında tekrar edildi. Hazırlanan bu filmlere 450 °C’ de 1 saat ısıtma işlemi uygulanarak şeffaf ve homojen filmler elde edildi. Bu ısıtma

işlemi ise çinko asetatın çinko oksite dönüştürmenin yanında spin solüsyonunu istenilen materyal durumuna getirmek için yapıldı. Yapılan bu işlem kristalleşme içinde kritik bir adımdır.

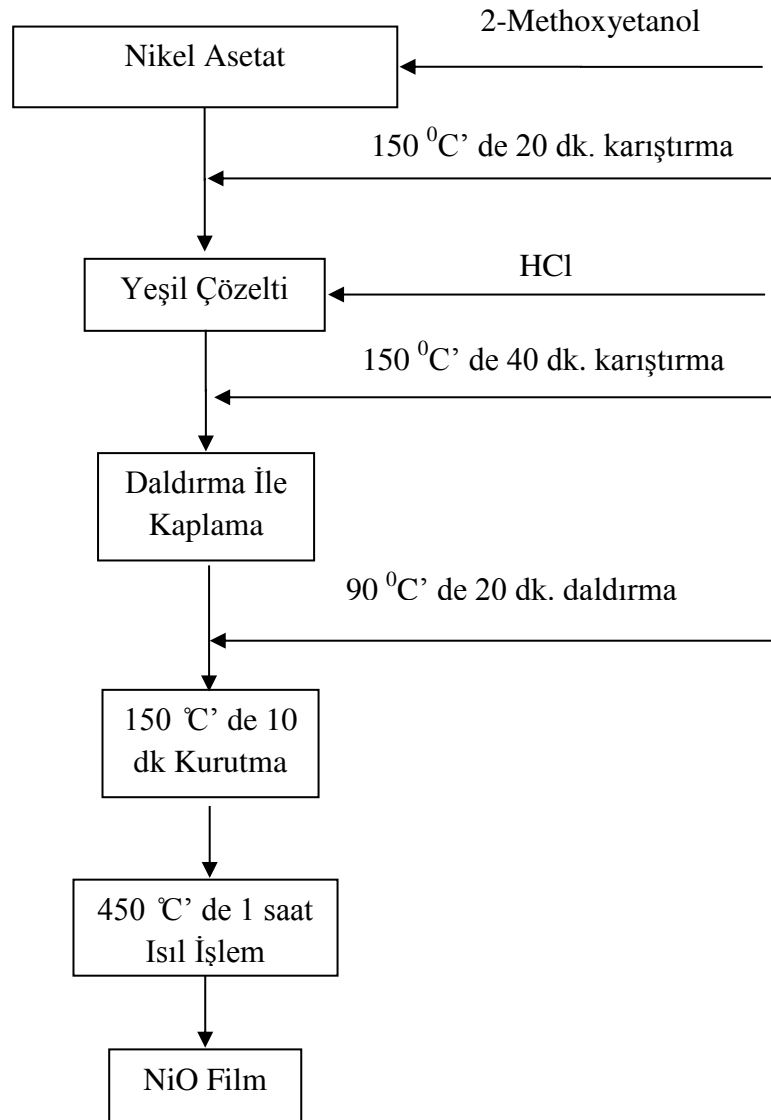
Çalışmada filmler hazırlanırken izlenen yol, Şekil 5. 1.' de verilmektedir.



Şekil 5.1 ZnO film kaplama aşamalarının özet diyagramı

5.3.2 Nikel Oksit Filmlerin Eldesi

Nikel oksit filmleri; temizlenen taşıyıcılar üzerine, 90 °C ye kadar ısıtılmış olan sol içerisinde 20 dakika süreyle daldırma metodu kullanılarak kaplandı. Kaplanan taşıyıcılar 150 °C' ye kadar ısıtılmış sıcak yüzey üzerinde 10 dakika süresince kurutuldu. Daha sonra bu filmlere 450 °C' de 1 saat ısıt işlem uygulanarak şeffaf ve homojen filmler elde edildi. Çalışmada filmler hazırlanırken izlenen yol, Şekil 5. 2.' de verilmektedir.



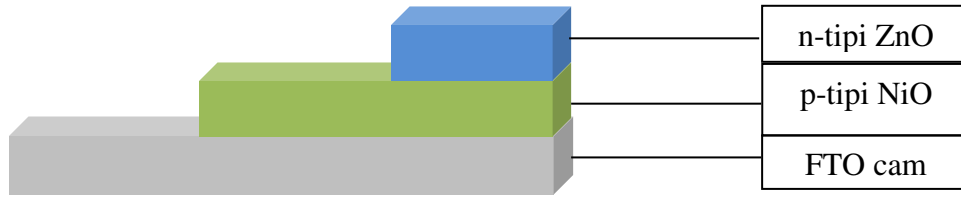
Şekil 5. 2 NiO film kaplama aşamalarının özet diyagramı

5.3.3 pn Eklem Diyot Filmlerinin Eldesi

Herhangi bir yarıiletkenin bir kısmı p-tipi, diğer kısmı n-tipi olacak şekilde katkılандığında oluşan sınır bölgesi pn eklemi oluşturur. Oluşan bu kısım tek yönde akım geçiren bir devre elemanı, yani diyot olarak kullanılmaktadır.

Çalışmamızda pn eklem diyot elde etmek için hazırladığımız p-tipi (nikeloksit) filminin bir kısmı kapatıldı. Açık kalan kısma ise n-tipi' ni oluşturmak için çinkoasetat çözeltisi kullanıldı. Çinkoasetat çözeltisi döndürme ile kaplama metodu kullanılarak pn eklem diyot için sınır bölgesi oluşturuldu.

Çalışmada sol-jel metoduyla hazırlanan pn eklemi şematik gösterimi Şekil 5.3' de verilmiştir.



Şekil 5. 3 Sol-jel metodu ile kaplanan pn eklemi

5.4 Optik Ölçümler

Farklı sıcaklıklarda hazırlanan NiO ve ZnO ince filmlerin optik özellikleri 200-1100 nm dalga boyu aralığında Perkin Elmer Lambda-45 UV-VIS spektrometresi ile ölçüldü. Filmlerin dalgaboyuna bağlı soğrulma ve geçirgenlik değerleri alındı. Filmlerin soğurma katsayıları hesaplandı.

5.5 Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Analizleri

Hazırlanan filmlerin makro yapısını incelemek için atomik kuvvet mikroskobu ile yüzey karakterizasyonları incelenmiştir. Bunun için Park Systems XE-100 atomik kuvvet mikroskobu kullanıldı ve non-contact mod ile yüzey topoğrafyası çıkarıldı.

5.6 Akım-Voltaj (I-V) Ölçüm Analizleri

Elektriksel ölçüm için hazırlanan NiO/ZnO pn eklem diyotunun akım-gerilim (I-V) ölçümleri Keithley 2400 programlanabilir sabit akım kaynağı ile iki prop yöntemiyle alındı.

6. BULGULAR

6.1 Optik Ölçüm Sonuçları

Elde edilen filmlerin optik ölçümleri 200-1100 nm dalga boyu arasında yapıldı. Şekil 6.2 ve Şekil 6.5 grafiklerinden faydalananak ince filmlerin yasak enerji aralığı $(\alpha h\nu)^2$, nin $h\nu$ ’ ye karşı grafiğinin lineer kısmı kullanılarak hesaplandı. Grafiğin lineer olduğu kısımdan çizilen doğrunun $(\alpha h\nu)^2/n = 0$ da $h\nu$ eksenini kestiği nokta ($h\nu = E_g$)’ den filmlerin yasak enerji değerleri hesaplanmaktadır [44].

Hesaplama yapılırken filmlerin değerlik bandı ile iletim doyumları arasındaki geçişlerin direkt geçiş olduğu ($n=1$) kabul edilmiştir. Grafiklerden alınan yasak enerji aralık değerleri tablo 6.1’ de verildi.

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^{n/2} \quad (6.1)$$

α = soğurma katsayısı

$h\nu$ = foton enerjisi

E_g = doyum aralığı

$n = 1$ (direkt geçişler için)

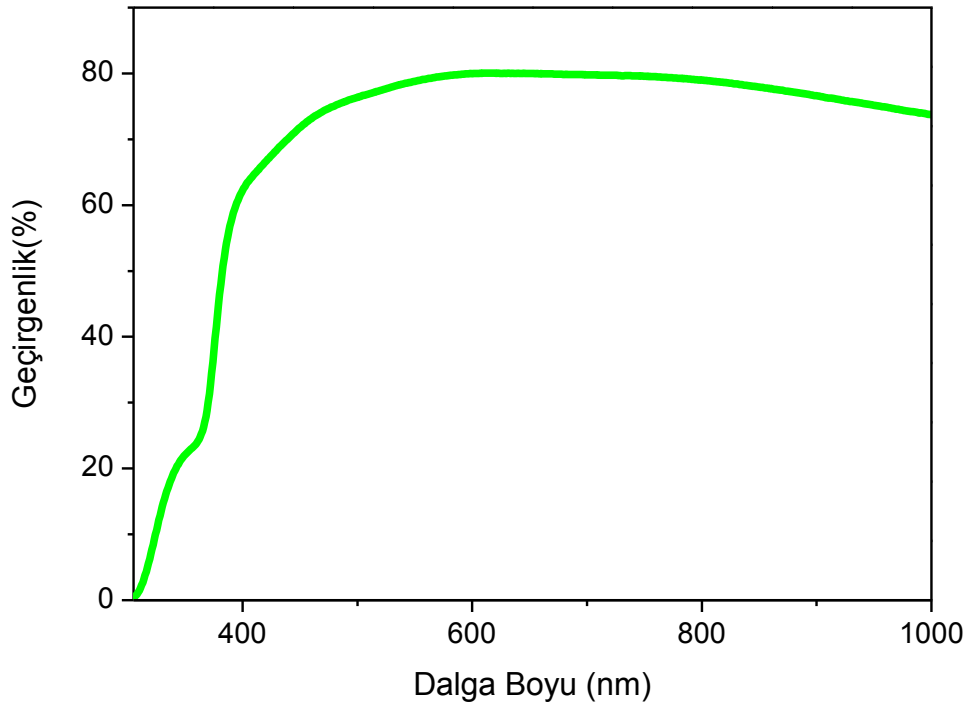
A = sabit

6.1.1 ZnO’ in Optik Özelliklerinin Belirlenmesi

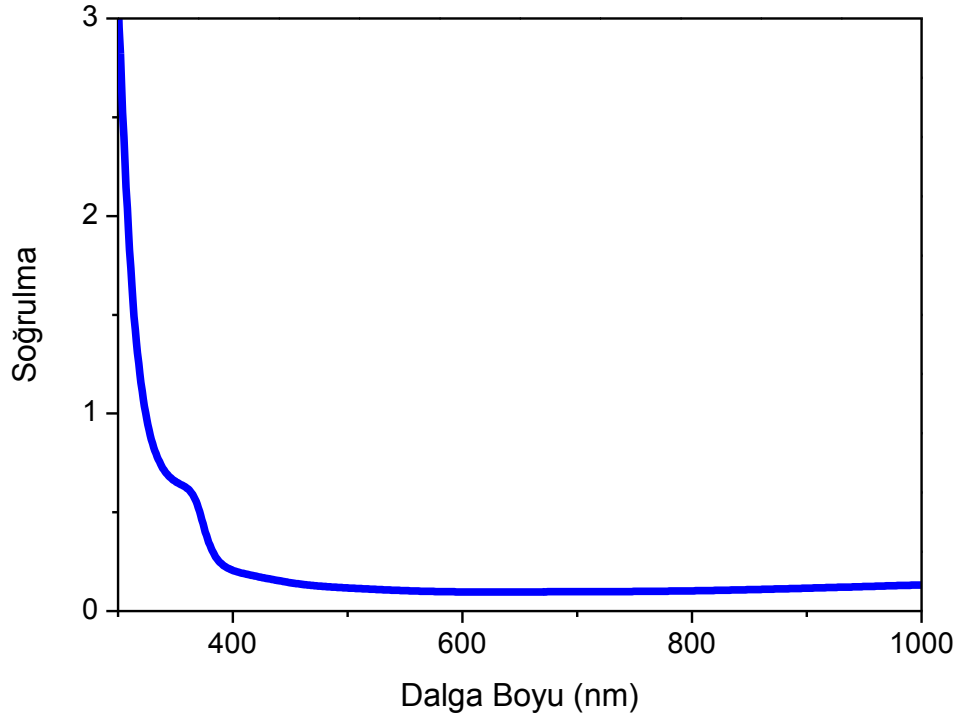
450 °C’ de sol-jel yöntemiyle hazırlanan ZnO filmin dalga boyuna karşı geçirgenlik değerleri alınıp Şekil 6. 1’ de verildi. ZnO filmi, görünür bölgede (380-700 nm) %75’ in üzerinde geçirgenlik sergiledi ve bu filmlerin UV bölgesindeki (200-400 nm) geçirgenliği ise düşük olduğu görüldü. Böylece ZnO’ nun iyi bir saydam iletken olduğu gözlemlendi. A.Y. Oral ve diğerlerinin yaptığı bir çalışmada ZnO’ nun UV bölgede düşük geçirgenlik sergilemesini nedenini, bu bölgedeki elektromagnetik dalgaların enerjilerinin ZnO optik doyum aralığından yüksek olması ve bunun sonucu olarak valans bandı ile iletkenlik

doymaları arasında elektronik geçişlerin meydana gelmesi nedeniyle optik dalgaların soğurulduğundan kaynaklanabileceğini belirtmiştir [45].

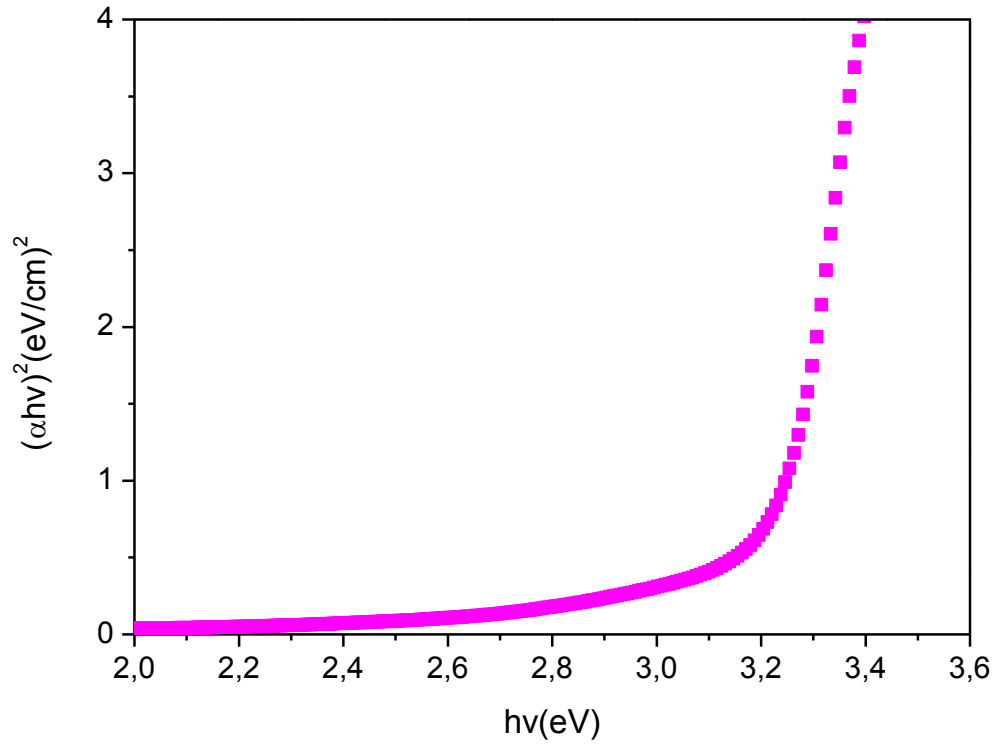
Daha sonra dalga boyuna karşı optik soğurma değerleri alınıp Şekil 6. 2’ de verildi. Şekilde görüldüğü gibi ZnO ince film 400 nm gibi düşük dalga boylarında bir soğurma sınırı göstermektedir. Bu grafik yardımı ile denklem (6. 1) kullanılarak direkt geçişleri belirlemek için $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafiği çizildi (Şekil 6. 3). Bu grafikten elde edilen sonuçlar yardımıyla ZnO ince filminin yasak enerji aralığı 3.19 eV olarak belirlendi. Elde edilen bu değer literatüre uygunluğu görüldü [46-48].



Şekil 6.1 ZnO filmin dalga boyuna bağlı optik geçirgenlik grafiği



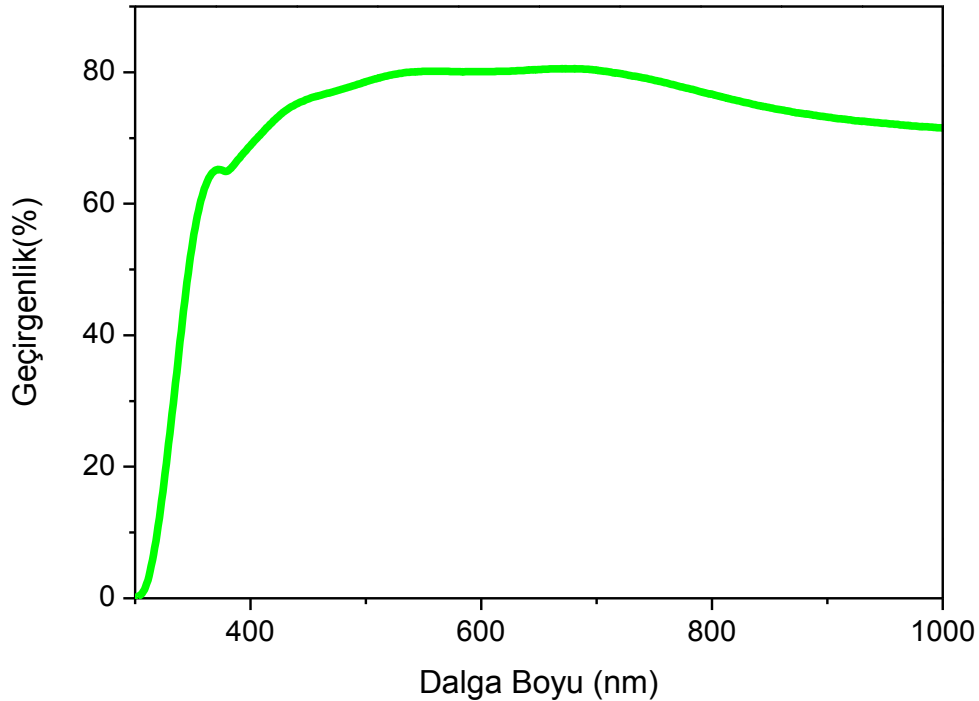
Şekil 6.2 ZnO filmin dalga boyuna bağlı soğrulma grafiği



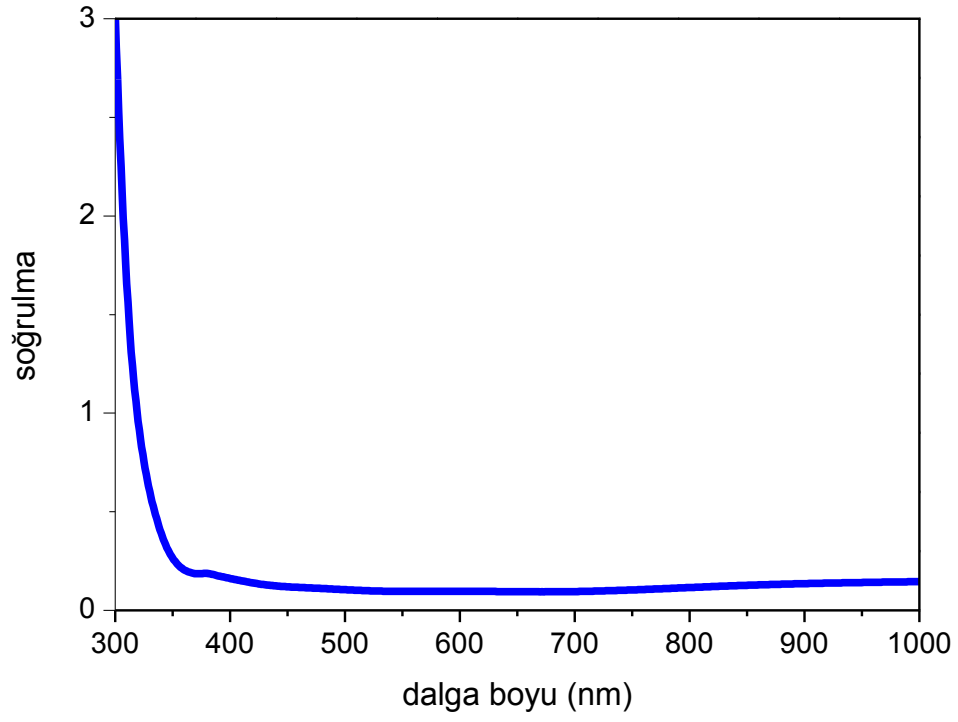
Şekil 6. 3 ZnO filmin $(\alpha h\nu)^2$ - $h\nu$ grafiği

6.1.2 NiO' in Optik Özelliklerinin Belirlenmesi

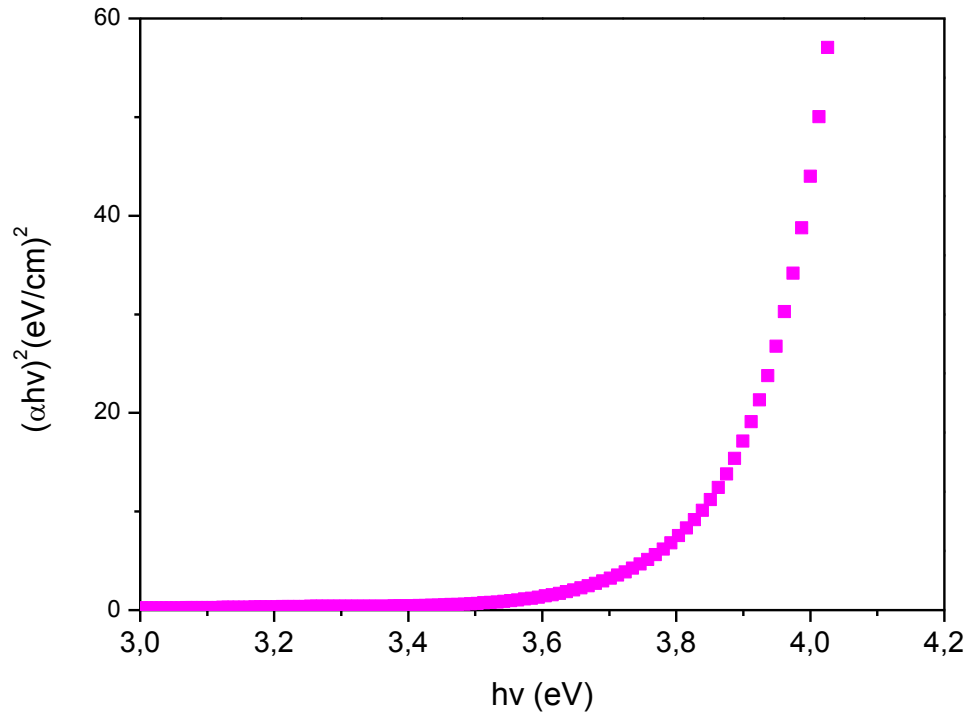
450 °C' de sol-jel yöntemiyle hazırlanan filmlerin optik ölçümleri 200-1100 nm dalga boyu arasında alındı. Hazırlanan NiO filmin dalga boyuna karşı geçirgenlik değerleri alınıp Şekil 6.4' de verildi. NiO filmi görünür bölgede (380-700 nm) yaklaşık %75' in üzerinde geçirgenlik gösterdi. Filmlerin UV bölgesindeki (200-400 nm) geçirgenliği ise 200-300 nm arasında oldukça düşük olmasına karşın 300 nm' den sonra gözlemlenebilir artış görülmektedir. Daha sonra dalga boyuna karşı soğurma değerleri alınıp Şekil 6. 5' de verildi. Şekilde görüldüğü gibi NiO filmler 400 nm gibi düşük dalga boylarında bir soğurma sınırı göstermektedirler. Soğurma kenarının alınan değerleri yardımıyla denklem (6. 1) kullanılarak direkt geçişleri belirlemek için $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ değişimi gözlemlendi (Şekil 6.6). Bu grafikten elde edilen sonuçlar yardımıyla NiO ince filminin yasak enerji aralığı 3.83 eV olarak belirlendi. Elde edilen bu değer literatürle uyumludur[49-51].



Şekil 6.4 NiO filmin dalga boyuna bağlı optik geçirgenlik grafiği.



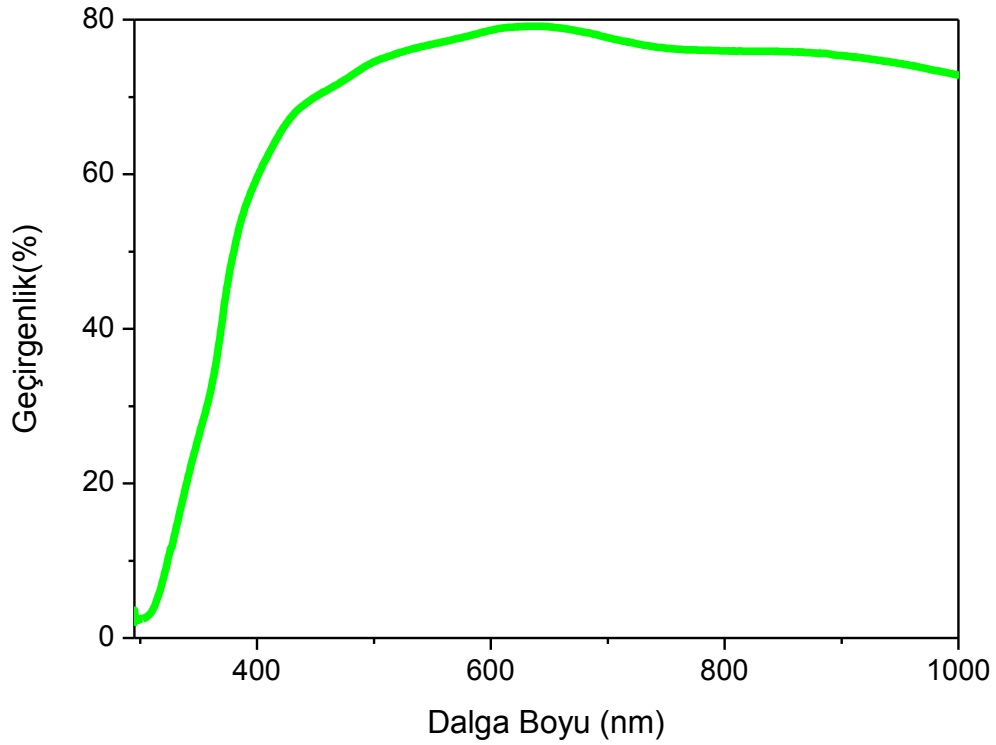
Şekil 6.5 NiO filmin dalga boyuna bağlı soğrulma grafiği.



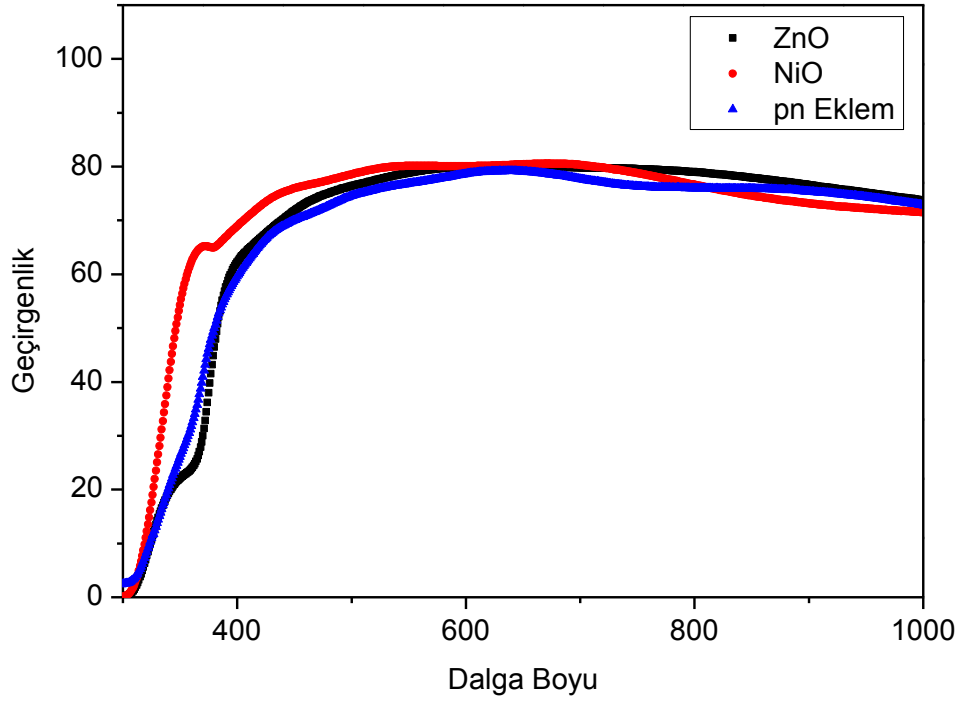
Şekil 6.6 NiO filmin $(\alpha h\nu)^2$ - $h\nu$ grafiği

6.1.3. ZnO/NiO pn Eklem Diyotunun Optik Özelliklerinin Belirlenmesi

450 °C’ de sol-jel yöntemiyle hazırlanan pn eklem diyotun optik ölçümleri 200-1100 nm dalga boyu arasında alındı. Hazırlanan pn filmin dalga boyuna karşı geçirgenlik değerleri Şekil 6.7’ de verildi. pn eklem diyotu görünür bölgede (450-700 nm) %70’ in üzerinde geçirgenlik sergiledi. pn eklem diyotun UV bölgesindeki (200-400 nm) geçirgenliği oldukça düşük olmasına karşın, 400 nm’ den sonra geçirgenlik değerleri gözlemlenebilir bir artış görüldü.



Şekil 6.7 pn eklem diyot filminin optik geçirgenlik, dalga boyu grafiği



Şekil 6.8 ZnO,NiO ve pn eklem diyot filmlerinin optik geçirgenlik, dalgaboyu grafiği

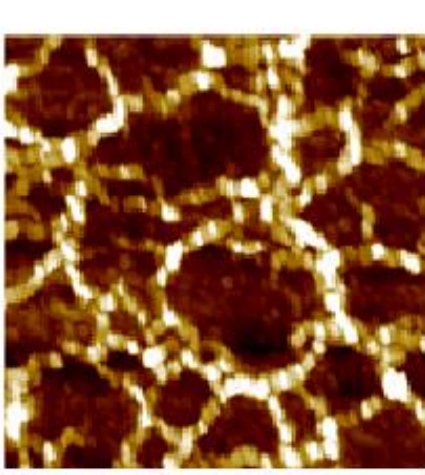
Şekil 6. 8’ de ZnO, NiO ve pn eklem diyotunun optik geçirgenliğinin dalga boyuna karşılık gelen grafikleri bir arada verildi. 450 ⁰C’de sol-jel yöntemiyle hazırlanan ince ZnO ve NiO filmlerin ve ZnO/NiO pn eklem diyotun yasak enerji aralıkları Tablo 6. 1’ de verildi.

Tablo 6.1 Hazırlanan ince filmlerin yasak enerji aralıkları

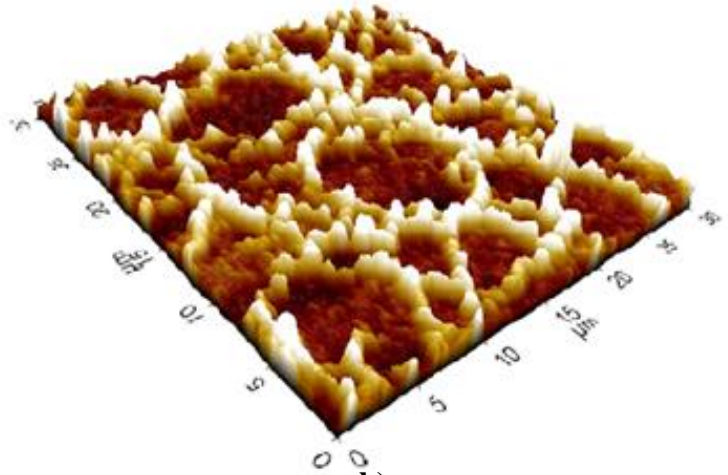
Numune adı	E _g (eV)	Literatür değerleri
ZnO	3.198	3.31 eV [Sh.A Mansour ve diğ.]. 3.27 eV [R. Vettunperumal ve diğ.]. 3.28 eV [S. Ilıcan ve diğ.].
NiO	3.827	3.85 eV [M. Jlassi ve diğ.]. 3.88 eV [I. Sta ve diğ.]. 3.85 eV [Y. Akaltun ve diğ.].

6.2 Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Sonuçları

AFM tekniği ile hazırlanan ZnO ve NiO ince filmlerin görüntüleri taranarak yüzey pürüzlülüğü, fiber çapı ve tanecik boyutu analizi yapıldı. ZnO ve NiO ince filmlerin iki ve üç boyutlu 30x30 μm ve 1x1 μm tarama alanlı görüntüleri Şekil 6.9-6.12 da verildi.

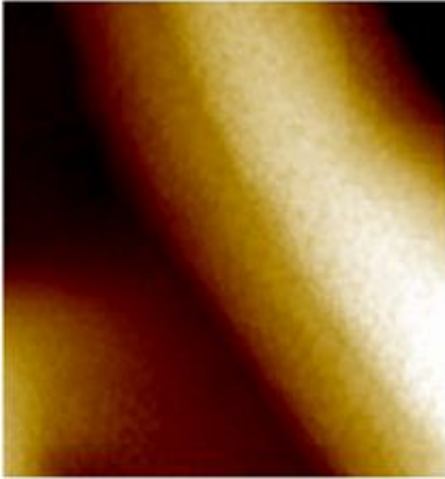


a)

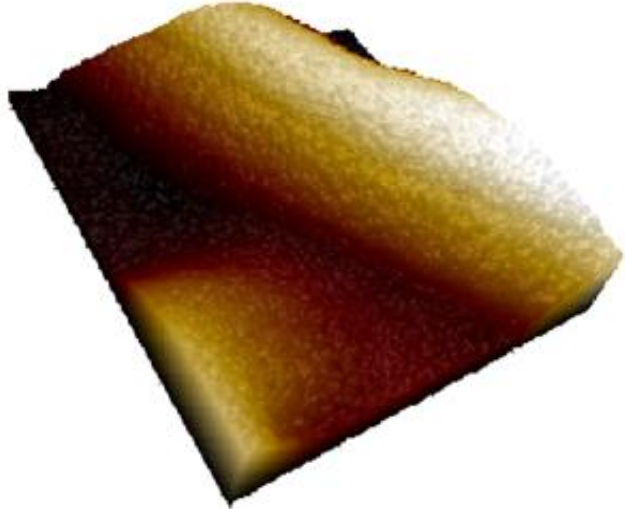


b)

Şekil 6. 9 ZnO ince filminin AFM görüntüsü (30 μm x30 μm) a) iki boyutlu b) üç boyutlu

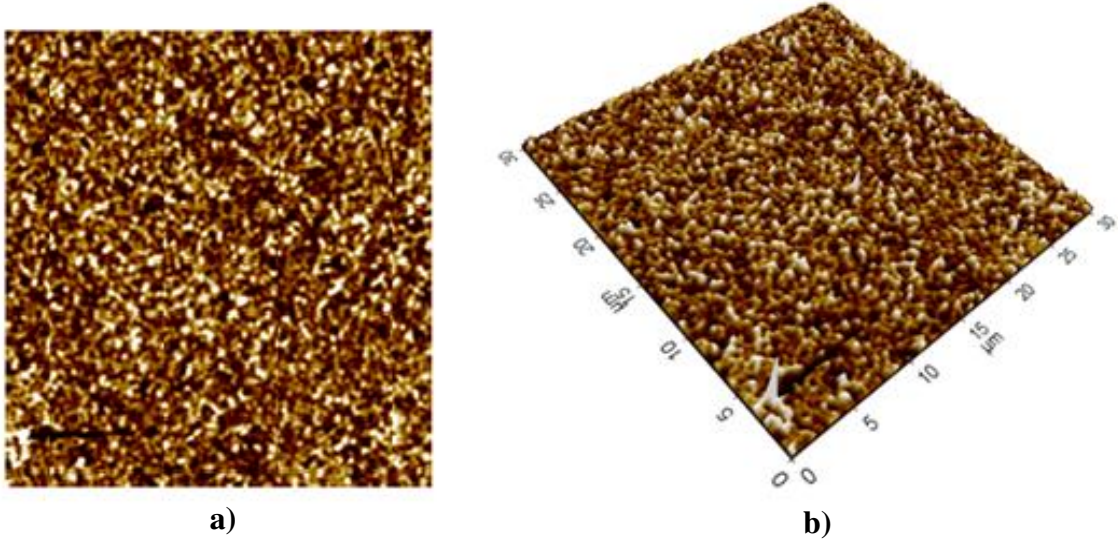


a)

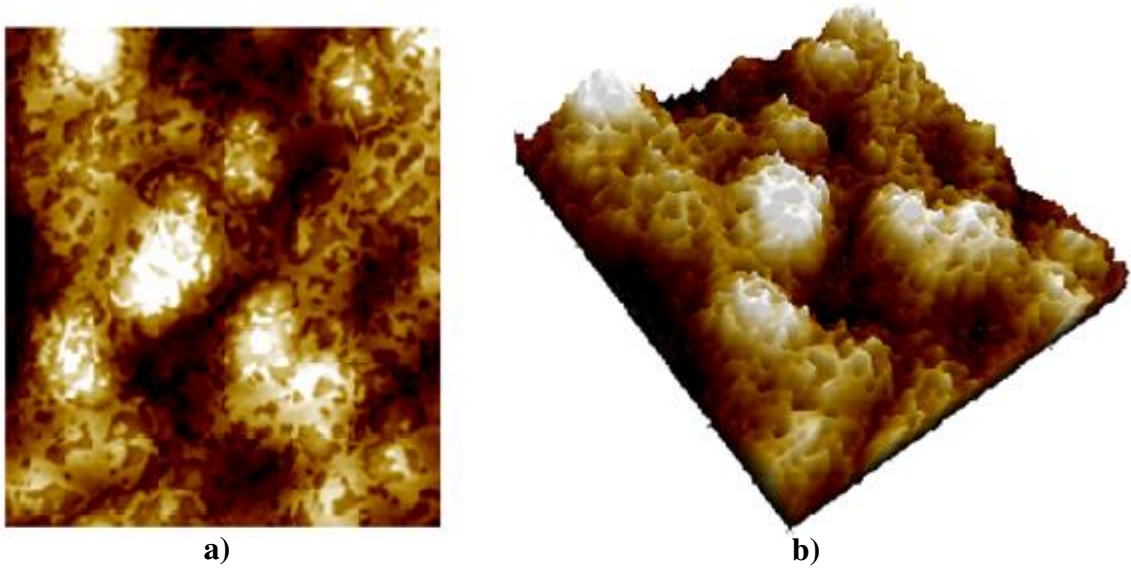


b)

Şekil 6.10 ZnO ince filminin AFM görüntüsü (1 μm x1 μm) a) iki boyutlu b) üç boyutlu



Şekil 6. 11 NiO ince filminin AFM görüntüsü (30 μm x 30 μm) a) iki boyutlu b) üç boyutlu



Şekil 6.12 NiO ince filminin AFM görüntüsü (30 μm x 30 μm) a) iki boyutlu b) üç boyutlu

Tablo 6.2 Filmlerin Ortalama Yapısal Parametreleri.

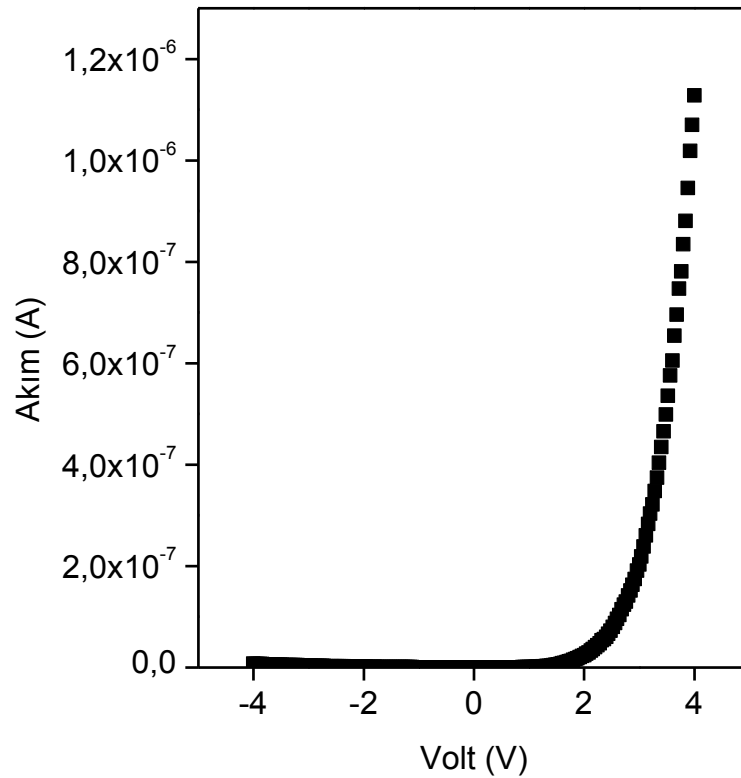
Numune	Parçacık Tipi	Yüzey Pürüzlülüğü(nm)
ZnO	0.770 μm (fiber)	10.067
NiO	0.137 μm (tane)	3.705

Tablo 6.2’ de gösterildiği gibi ZnO ve NiO ince filmlerin AFM görüntülerinden elde edilen sonuçlarda tanelerin ortalama boyutu ve fiberlerin ortalama yarıçapı mikro, yüzey pürüzlülüğü ise nano boyutta ölçülmüştür.

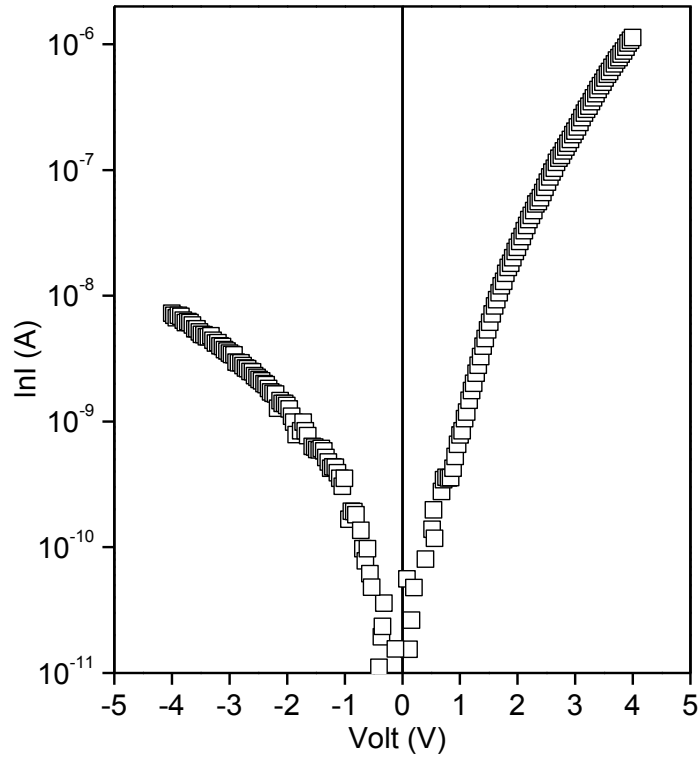
6.3 ZnO/NiO pn Eklemının Akım-Voltaj (I-V) Ölçüm Sonuçları

Sol-jel yöntemi ile hazırlanan ZnO/NiO pn eklem diyotun akım-voltaj (I-V) karakteristiği alınarak bazı elektriksel parametreleri geleneksel I-V ve Norde yöntemi ile hesaplandı. pn eklemının düz beslemedeki I-V ölçümlerinden doyum akımı (I_0), idealite faktörü (n), bariyer yüksekliği (Φ_B) belirlendi. pn eklem diyotun oda sıcaklığında karanlık ortamda alınan akım-voltaj grafiği Şekil 6.13’ deki gibidir. Elde edilen bu karakteristik tipik diyot karakteristiğidir.

Oda sıcaklığında düz ve ters beslem gerilim ölçümlerinden elde edilen veriler yardımı ile yarı logritmik $\ln I$ -V grafiği çizildi (Şekil 6.14).



Şekil 6. 13 ZnO/NiO pn diyotunun I-V grafiği



Şekil 6.14 Üretilen ZnO/NiO pn diyotunun lnI-V grafiği

Düşük voltajlı diyotun oluşumu üssel olarak alındığı için diyot, schottky diyot gibi davranır. Bundan dolayı diyotun akım-iletim mekanizmasını belirlemek için aşağıdaki eşitlik kullanıldı [49].

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (6. 2)$$

Burada I_0 doyum akımını, V uygulama voltajını, n idealite faktörünü, göstermektedir. Oda sıcaklığında ölçüm yapılan I_0 doyum akım değeri akım-gerilim eğrisinin akımı kestiği noktadan belirlendi. Doygma akımı I_0 ;

$$I_0 = AA^* T^2 \exp(-q\Phi_B/kT) \quad (6. 3)$$

Burada, q elektrik yükünü, A diyot alanını, A^* Richardson sabitini, k Boltzman sabitini, T mutlak sıcaklığı ve Φ_B bariyer yüksekliğini göstermektedir [49]. n tipi ZnO için Richardson sabiti $32 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ 'dir. Bir diyotun idealite faktörü ve bariyer yüksekliği diyot karakteristiğini belirlemede önemli parametrelerdir. n idealite faktörü ve bariyer yüksekliği; sıcaklığa bağlı deneysel bir değişkendir [52]. İdealite faktörü ideal diyot

karakteristiğinden olan sapmayı belirler. Yarıiletken aygıtları için en önemli parametre idealite faktörüdür, çünkü idealite faktörü bu aygıtların elektriksel davranışlarını açıklar [26]. İdealite faktörü n , şekil 6.14' de gösterilen grafikteki düşük doğru beslem voltajı bölgesindeki eğimden,

$$n = \left(\frac{q}{kT} \right) \left(\frac{dV}{d(\ln I)} \right) \quad (6.4)$$

bağıntısı kullanılarak elde edildi. Bariyer yüksekliği;

$$\Phi_B = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (6.5)$$

eşitliğinde I_0 yerine yazılarak elde edildi. Oda sıcaklığında doyum akımı $I_0=3,3913 \times 10^{-12} \text{ A}$, idealite faktörü $n=6,46$ ve bariyer yüksekliği $\Phi_B= 1,0366 \text{ eV}$ bulundu[49,53].

İkinci bir yöntem olarak, üretilen ZnO/NiO pn eklem diyotunun elektronik parametrelerinin hesaplanmasında Norde metodu kullanıldı. Norde denklemleri,

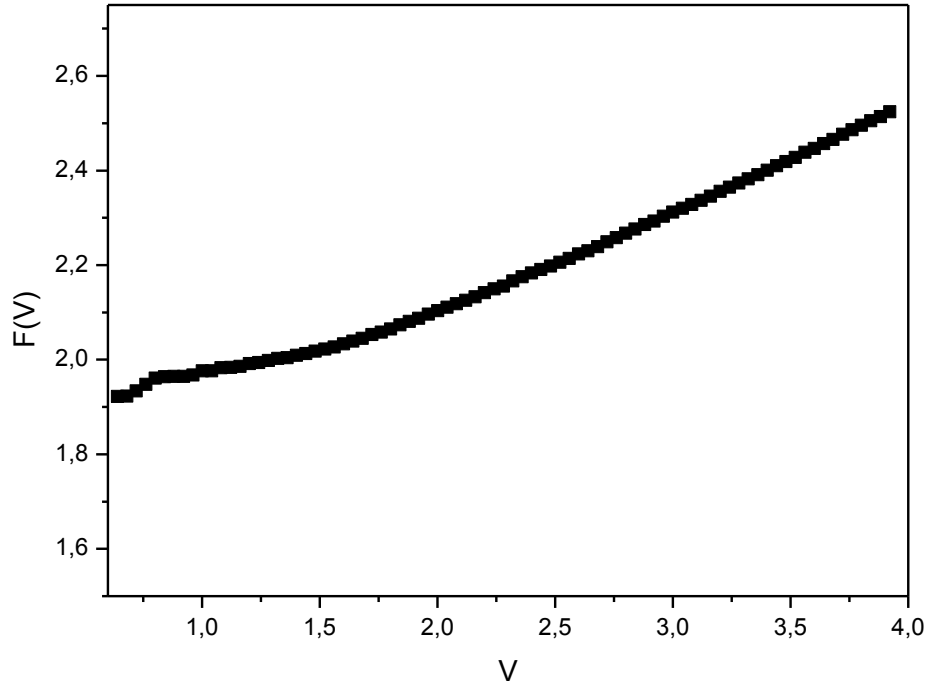
$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left[\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right] \quad (6.6)$$

$$\Phi_B = F(V_{\min}) + \frac{V_{\min}}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (6.7)$$

$$R_S = kT(\gamma - n)/qI_{\min} \quad (6.8)$$

şeklindedir [49].

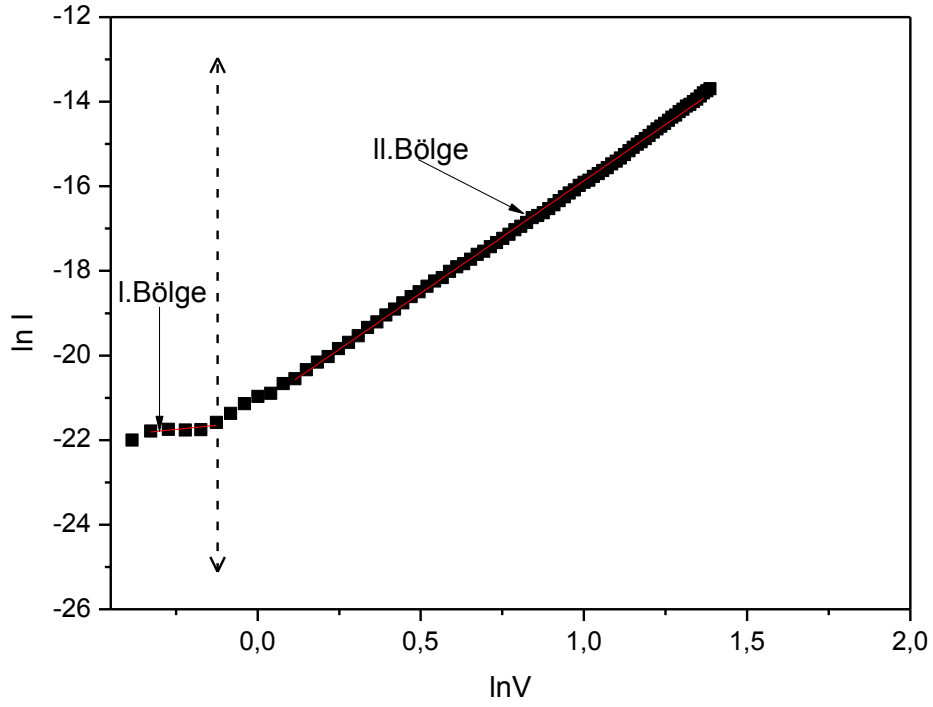
Denklem (6.6) eşitliğinden ($n < \gamma$ keyfi bir değer) $F(V)$ - V grafiği şekil 6.15' de verildi. Denklem 6.6, seri dirençten dolayı $dF(V)/dV=0$ şartından bir minimumdan $F(V_{\min})$ geçmektedir. Bu noktaya karşılık gelen voltaj ve akım noktalarının değerleri ve ayrıca I - V grafiğinin (Şekil 6.14) eğiminden n değeri kullanılarak, Denklem (6.7) ve Denklem (6.8) eşitliklerinden bariyer yüksekliği Φ_B ve seri direnç R_S değerleri elde edildi [49,53]. Bariyer yüksekliği $\Phi_B = 1,028 \text{ eV}$ ve seri direnç $R_S= 39.1 \text{ M}\Omega$ bulundu [49,53].



Şekil 6.15 Üretilen ZnO/NiO pn diyotunun F(V)-V grafiği

Tablo 6.3 ZnO/NiO pn eklem diyotunun oda sıcaklığında, farklı metotlar kullanılarak hesaplanan elektronik parametreleri

I-V			F(V)-V	
I_0 (A)($\times 10^{-12}$)	n	Φ_B(eV)	Φ_B(eV)	R_S (MΩ)
3,39	6,46	1,036	1,028	39,1



Şekil 6.16 Üretilen ZnO/NiO pn diyotunun lnI-lnV grafiği

Uzay yükü sınır akımı metodu yarıiletken ve yalıtkan materyallerin elektriksel özelliklerini açıklamak için kullanılır. ZnO/NiO pn diyotun uzay yükü iletim mekanizması 300 °K oda sıcaklığında incelendi. Şekil 6.16’ da lnI-lnV grafiğinde iki lineer bölge gözlemlendi ve bu iki lineer bölge $I = BV^m$ denklemi ile analiz edildi. Bu iletim mekanizmasında diyot akımı V^m ile doğru orantılı olarak değişir. [54]. lnI-lnV grafiğinde birinci ve ikinci bölgelerden alınan eğimlerden düşük voltajlardaki değerler için eğim $m_1 = 1,15$ ve yüksek voltajlardaki ikinci bölge için eğim $m_2 = 5,29$ olarak bulundu [54].

7. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, sol-jel yöntemiyle ZnO ve NiO ince filmleri üretildi ve ayrıca aynı yöntemle ZnO/NiO pn eklem diyotu hazırlanarak bunların elektronik parametreleri belirlendi. Üretilen filmlerin ve pn eklem diyotunun UV-VIS analizleri yapılarak geçirgenlik, soğurulma ve yasak enerji aralığı (Eg) grafikleri çizildi. Ayrıca bu ince filmlerin AFM ile yüzey morfolojisi belirlendi. Daha sonra hazırlanan pn eklem diyotunun elektronik karakterizasyonu farklı iki yöntemle araştırıldı.

Çalışmamızda sol-jel yöntemiyle pn eklem diyot üretmeden önce ZnO ve NiO ince filmleri hazırlandı. Bu filmler spin kaplama, daldırma ile kaplama ve püskürtme ile kaplama metotlarıyla üretildikten sonra ZnO ince film için en uygun metodun spin kaplama, NiO ince filmi için ise daldırma metodu olduğu görüldü.

Filmlerin 400-700 nm arasında bulunan görünür bölgedeki geçirgenlikleri ortalama %75' in üzerinde olduğu görüldü. Filmlerin 200-400 nm arasında bulunan UV bölgesinin geçirgenliği ise görünür bölgeye göre daha düşük olduğu belirlendi. Sol-Jel yöntemi ile hazırlanan ZnO ve NiO filmlerin transparan özellik taşıdığı belirlendi.

Elde ettiğimiz filmlerin geçirgenliği, taşıyıcı konsantrasyonu, yüzey morfolojisi, kullandığımız çözücü, iyonize safsızlık saçılmaları gibi faktörlere bağlıdır. Bu faktörlere bağlı olarak elde edilen filmlerin optik geçirgenlik değerlerinde dalgalanmalar gözlemlendi. Bu sonuç; hava ile ince filmler, ince filmler ile altlıklarının ara yüzeylerinde oluşan yansımalarından kaynaklanan optiksel girişimin sonucu olabileceği söylenilebilir[33]. Ayrıca optik geçirgenlik eğrileri incelendiğinde 400 nm dalga boyunun altında bulunan bölgelerde, daha yüksek enerjili elektromanyetik dalgalarındaki geçirgenlik değerlerinde ani bir düşme gözlemlendi. Bu sonuç hazırladığımız ZnO, NiO ince filmlerin ve pn eklem diyotun görünür bölgede iyi saydam malzemeler olduğunu gösterir.

Optik soğurulma eğrileri incelendiğinde ise 400 nm' den küçük dalga boyunun altında bulunan bölgelerde yani yüksek enerjili fotonların soğurulma değerlerinde ani bir yükselme belirlendi. Benzer sonuç Fortuna ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada da gözlemlendi. Fortuna ve arkadaşları bu sonucu yorumlarken 400 nm' nin doyum sınırı olduğunu ve soğurma katsayısındaki bu ani yükselişin doyumlar arasındaki elektronik geçişlerden kaynaklandığını belirtmiştir [55]. UV-VIS ölçümleri sonucu ZnO filminin bant

genişliği 3,198 eV bulundu. Elde edilen bu değerin literatüre uygun olduğu görüldü[46-48,56].

NiO yarıiletkeninin doyum aralığı yaklaşık 3.6-4.0 eV aralığına sahip olduğu bilinmektedir. Yapılan çalışmamızda ise NiO filmin doyum genişliği 3.85 eV olarak bulundu. Bulunan bu sunucun literatürdeki değerlerle uygun olduğu görüldü [49-51]. Bulduğumuz ZnO, NiO ince filmlerin doyum aralık değerlerinde sapmalar meydana geldiği görüldü. Bu sapmaların nedeni, sitokiyometredeki sapmalara bağlı olarak yapıdaki deformasyonda oluşan doyum sarkmalarından kaynaklanabileceği düşünülmektedir [58].

ZnO ve NiO filmlerin AFM görüntülerinden faydalanarak filmlerin yüzey özellikleri araştırıldı. ZnO ince filminin yüzey pürüzlülüğü 10.067 nm, NiO ince filminin yüzey pürüzlülüğü 3.705 nm olarak ölçüldü. Bununla beraber ZnO ince filmin fiber boyutu 0.770 μm , NiO ince filmin tanecik boyutu ise 0.137 μm olarak ölçüldü. Ayrıca, AFM görüntüleri incelendiğinde filmlerde yüzey yapısının ada tipi büyüme şeklinde olduğu söylenebilir. Hazırlanan filmlerin bazı bölgelerinde farklı yükseklik ve büyüklüklerde yığılmaların olduğu görüldü. Yüzeyde belirlenen beyaz bölgeler atomların büyümeyi tercih ettiği yerleri, koyu renkli bölgeler ise daha az film oluşumunun olduğu yerleri göstermektedir. Film oluşumu sırasında farklı bölgelerde meydana gelen yığılmanın nedeni; kullanılan camların yüzey özellikleri ve taban ile film arasındaki ısı farklılıklarının olabileceği düşünülmektedir [58].

Sol-jel yöntemiyle üretilen ZnO/NiO pn eklem diyotun elektriksel karakteristiklerinden doyum akımı, idealite faktörü ve bariyer yüksekliği gibi temel elektriksel parametreler geleneksel akım-gerilim ($\ln I-V$) ve Norde tarafından öne sürülen $F(V)-V$ grafiği yardımıyla da bariyer yüksekliği ve seri direnç değerleri hesaplandı. İdealite faktörü diyotun $\ln I-V$ grafiğinin lineer kısmının eğiminden 6,46, bariyer yüksekliği 1,036 eV olarak doyum akımının $3,39 \times 10^{-12}$ A olarak bulundu. $F(V)-V$ grafiği yardımıyla ise; bariyer yüksekliği 1,028 ve seri direnç ise 39,1 $\text{M}\Omega$ olarak bulundu. Geleneksel yöntemle ve Norde metoduyla elde edilen değerler karşılaştırıldı ve bu değerlerin uyumlu olduğu görüldü. Ayrıca uzay yükü sınır akımı metodu için $\ln I-\ln V$ grafiği çizildi. Bu grafikte iki lineer bölge belirlendi ve bu iki lineer bölge $I = BV^m$ denklemi ile analiz edildi. $\ln I-\ln V$ grafiğinde birinci ve ikinci bölgelerden alınan eğimlerden düşük

voltajlardaki değerler için birinci bölge için eğim $m_1 = 1,15$ ve yüksek voltajlardaki ikinci bölge için eğim $m_2 = 5,29$ olarak bulundu.

Bu elektronik parametrelerin sol jel yöntemi ile üretilen ZnO/NiO yapısının pn eklem karakteristiği sergilediği söylenilebilir. Fakat pn eklemelerinin en önemli parametresi olan idalite faktörü değeri ideallikten sapma göstermiştir. Bu sapmanın termoiyonik emisyon teorisiyle açıklanabileceği söylenilebilir. Ayrıca, idalite faktöründeki sapmaların nedeni diyotun arayüzey durum yoğunluğunun, yüzey tabaka kalınlığının, seri direncin(R_s) etkili olabileceği söylenilebilir[53]. Seri direncin $M\Omega$ mertebesinde çıkması, yarıiletken yüzeyinden tamamen temizlenemeyen doğal oksit tabakasına ve ara yüzeyde oluşan örgü kusurlarından, dolayısıyla diyottaki ara yüzey durumlarının varlığına bağlanabilir[52].

KAYNAKLAR

- [1] **Holt D. B., Yacobi B.G.**, Extended Defects In Semiconductors, Cambridge University Pres, (2007), p.1
- [2] **Sze S.M.**, Semiconductor Devices, John Wiley&Sons, New York, (2002), p. 18, 60, 112, 235 .
- [3] **Mutlu, T.**, 2010. Au/pGaAs_{1-x}P_x/n-GaAs Yapılı pn Eklem Diyotun Tavlanma Sıcaklıklarına Göre Elektriksel Karakterizasyonu, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri, Balıkesir
- [4] **Seeger K.**, Semiconductor Physic An Introduction, vol. 40, Springer, Germany, (1999), 2.
- [5] **Beiser A.**, Modern Fiziğin Kavramları, Öngüt G., Akyüz Ö., McGraw-Hill-Akademi ortak yayını, İstanbul, (1997) 334.
- [6] **Türköz M.S.**, Elektronik Devreleri I, cilt 1, Birsen Yayınevi Ltd.Şti., İstanbul, (1999), 5, 6, 57,59.
- [7] **Beicher S.**, Modern Fizik Fen ve Mühendislik için, Pr. Dr. Çolakoğlu K., 3.Cilt, Palme Yayıncılık Ankara, (1996) 1272.
- [8] **Streetman B.G.and Banerjee S.**, Solid State Electronic Devices, (1967) p. 67, 92, 211, 212, 214, 217, 218,.
- [9] **Anderson B. L., Anderson R. L.**, Fundamentals of Semiconductor Devices, Paulson C., The Mc Graw-Hill Companies, (2005) p.17,59.61
- [10] **Wilson J., Hawkes J. F: B.**, Optoelektronik, Okur İ., Değişim Yayınları, İkinci baskı, Adapazarı, (2000) 50, 53.
- [11] **Farnsworth, M. And Kline, C.H.** “Zinc Chemical, Zinc Development Association” First Edition, 1973
- [12] **Achuthan M.K., Bhat K.N.**, Fundamentals of Semiconductor Devices, The Mc Graw-Hill Companies, (2008)

- [13] **Özgür, Ü., Alivov, I., Liu, C., Teke, A.,** “ Comprehensive Review Of ZnO Materials and Devices Journal Of Applied Physics” , 98,pp-2-103, 2005.
- [14] **Bonell, D.,** “Physical Properties Of Ceramics”, MSE 566,1995.
- [15] **Harloff, J.,** “Physical Properties Of Ceramics, Zinc Oxide Varistors” Term Paper, MSE 566, 1995.
- [16] **Toplan, H.Ö.,** “Kimyasal Yöntemle Üretilen Düşük Voltaj Varistörlerinin Mikroyapısal ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi” SAÜ Fen Bilimleri Doktora Tezi, 1998.
- [17] **Look, D.C.”** Recent advances in ZnO materials and devices” Materials Science and Engineering B80 383-387, 2001.
- [18] **Büget U.,** PN Eklemi kristal diyot ve tranzistörler, 8, Meteksan Yayınları, Meteksan Matbaacılık ve Teknik sanayi Ticaret Limited Şirketi, (1983), 25, 39.
- [19] **Abukay D., Aral E., Işın A., Kılınçkaya M.S., Önengut G., Özel M.E., Ülkü D., Veziroğlu N., Zor M., Yörükoğulları E., Şenyel M., Modern Fizik., Zor M.,** Anadolu Üniversitesi, Etam A.Ş. Web-Ofset tesisleri, (1991) 123,124,128,133.
- [20] **Zhang Q., Sudarshan T. S.** “Forward characteristics of P+PN+ and P+NN+ diodes on 6H-SiC”, Solid-State Electronics, 45 (2001) 1559.
- [21] **Bhattacharya P.,** Semiconductor Optoelectronic Devices, Prentice-Hall, Inc. Simon & Schuster/AViacom Company Upper Saddle River, New Jersey 07458 (1997), p. 158, 165.
- [22] **Jin He, Ming Fang, Bo Li, Yu Cao,** “A new analytic approximation to general diode equation”, Solid-State Electronics, 50 (2006) 1371. 62
- [23] **Neamen D. A.,** Semiconductor Physics & Devices, Basic Principles, Isenberg S., Butcher K., The McGraw-Hill Companies, (1997) p.212, 214, 216, 266, 267, 268.
- [24] **Skromme B. J.,** “Junction and Barriers”, Encyclopedia of Materials:Science and Technolog, (2008), p.1.

- [25] **Yann Jiun Maa, Ibrahim M., Abdel-Motaleb**, “Analysis of the diode characteristics using the thermodynamic theories”, *Solid-State Electronics*, 46, (2002) 735.
- [26] **Kavaşoglu N., Kavaşoglu A. S., Oktik Ş.**, “A new method of diode ideality factor extraction from dark I–V curve” *Current Applied Physics*, 9, (2009) 833.
- [27] **Lee C. C., Chen W., V., Park J.**, “A new I–V model for light-emitting devices with a quantum well”, *Microelectronics Journal*, 37 (2006) 1335
- [28] **Hench, L.L.; West, J.K.**, *Chem. Rev.* 1990, 90, 35- 40
- [29] **Lev, O.**, *Analytical Chemistry*. 1995, 67(1), 22A- 30A.
- [30] **C. J. Brinker and G. W. Scherer**, *Sol- Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol- Gel Processing* (Academic Press, Inc.: New York, 1990).
- [31] **Brinker, C. J.; Scherer, G. W.**, *Non- Crystalline Solids*. 1985, 70, 301- 322.
- [32] **K. D. Keefer**, in: *Silicon Based Polymer Science: A Comprehensive Resource*; eds. J. M. Zeigler and F. W. G. Fearson, *ACS Advances in Chemistry Ser. No. 224*, (American Chemical Society: Washington, DC, 1990) pp. 227- 240.
- [33] **Bilgen. Y.**, 2008. *Sol-jel Yöntemiyle Üretilen Nano Kristal ZnO:Ga İnce Filmlerinin Optik ve Mikroyapısal Özelliklerinin İncelenmesi*, Gebze İleri teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze
- [34] **J. Livage; F. Babonneau; M. Charty; L. Coury**; “ Sol-Gel Synthesis and NMR Characterization of Ceramics”; *Ceram. Inter.*; 23(1997) 13-18.
- [35] **S.Sakka**; “ Sol-Gel Synthesis of Glasses: Present and Future”; *Am. Ceram. Soc. Bull*; 64[11] (1985) 1463-66.
- [36] **J. Livage; F. Beteille; C. Roux; M. Chatry; P. Davidson**; “ Sol-Gel Synthesis of Oxide Materials”; *Acta mater*; Vol. 46, No. 3 (1998) 743-750.
- [37] **J. Livage; M. Henry; C. Sanchez**; “ Sol-Gel Chemistry of Transition Metal Oxides”; *Prog. Solid. St. Chem.* ; Vol. 18 (1988) 259- 341.
- [38] **Uhlmann, D.R.**, G. Teowee; “ Sol-Gel Science and Technology: Current State and Future Prospects”; *J. Sol-Gel Sci. Technol.*; 13 (1998) 153-162 .
- [39] **Mehrdad K.**; “ Composite Sol-Gel Process for Photocatalytic Titanium Dioxide”; PhD Thesis; The University of British Columbia (2004).

- [40] From Internet Publication by Chemat Thechnology, Inc. (www.chemat.com); (2013).
- [41] **Korkmaz, E.**, 2011. ZnO ve CdO İkili Yarıiletken Bileşiklerin Sılar ve Sol-jel Teknikler İle Büyütülmesi Ve Yapısal Analizleri, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri, Erzurum
- [42] **Hasançebi, Ö.**, 2006. Sol-jel Yöntemiyle Hazırlanan Bakır Oksit İnce Filmlerin Elektiksel, Yapısal, Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri, Erzurum
- [43] **Sayılkan, F.**, 2007. Nano-TiO₂ Fotokatalizör Sentezi ve Fotokatalitik Aktivitesinin Belirlenmesi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri, Malatya
- [44] **Dagdelen, F., Serbetci, Z., Gupta, R.K., Yakuphanoglu, F.**, “ Preparation Of Nanostructured Bi-doped CdO Thin Films By Sol-gel Spin Coating Method”; Materials Letters 80 (2012) 127- 130.
- [45] **Oral, A.Y., Bahşi, Z.B., Başaran, E.**, “Sol-gel Fabrication of Lithium Doped Zinc Oxide Thin Films”, Key Engineering Materials Vol.264-268, p.415, (2004).
- [46] **Mansour, Sh.A., Yakuphanoglu, F.**, “ Electrical-Optical Properties Of Nanofiber ZnO Film Grown By Sol-Gel Method and Fabrication Of ZnO/ p-Si Heterojunction”, Solid State Sciences 14(2012) 121-126.
- [47] **Vettunperumal, R., Kalyanaraman, S., Thangavel, R.**, “Optical Constants and Near İnfrared Emission of Er Doped ZnO Sol-Gel Thin Films”, Journal Of Luminescence 158 (2015) 493-500.
- [48] **Ilıcan, S., Çağlar, Y., Çağlar, M.**, “ Preparation and Characterization Of ZnO Thin Films Deposited By Sol-Gel Spin Coating Method”, Journal Of Advanced Materials Vol.10, No.10, October 2008, p.2578-2583.
- [49] **Jlassi, M., Sta, I., Hajji, M., Ben Haoua, B., Ezzaouia, H.**, “Effect Of Annealing Atmosphere On The Electrical Properties Of Nickel Oxide/ Zinc Oxide pn Junction Grown By Sol-gel Technique”, Materials Science İn Semiconductor Processing 26 (2014) 395-403.
- [50] **Sta, I., Jlassi, M., Kandyla, M., Hajji, M., Koralli, P., Allagui, R., Kompitsas, M., Ezzaouia, H.**, “ Hydrogen Sensing By Sol-Gel Grown NiO and NiO:Li Thin Films”, Journal Of Alloys and Compounds (2014) 11-151.

- [51] Akaltun, Y., Çayır, T., “ Fabrication and Characterizaion Of NiO Thin Films By SILAR Method”, Journal Of Alloys and Compounds 625(2015) 144-148.
- [52] Dağdelen, F., Özer, M., “ Ag/n- Tipi Schottky Diyotunun Elektronik Parametrelerinin” Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (İncelemede).
- [53] Karataş, Ş., Altındal, Ş., “İdeal Olmayan Schottky Diyotlarının Temel Parametrelerinin Akım-Voltaj (I-V) Karakteristiklerinden Hesaplanması” KSU. Journal Of Science and Engineering 7(2)-2004.
- [54] Yakuphanoglu, F., Tugluoglu, N., Karadeniz, S., “Space Charge –Limited İn Ag/p-Si Schottky Diode”, Physica B 392 (2007) 188-191.
- [55] Fortunato, E., Assuncao, E., Goncalves, A., Marquesa, A., Aguasa, H., Pereira, E., Ferreira, I., Vilarinho, P., Martins, R., “High Quality Conductive Gallium-Doped Zinc Oxide Films Deposited At Room Temperature” Thin Solid Films 2004 s.443-447.
- [56] Reddy, K.T.R., Miles, R.W., “ Growth And Characterization Of Sprayed ZnO:Ga Thin Films” Journal Of Materials Science Letters 1998 s.279-281.
- [57] Pankove, J.I., Pankove, J.I., 1971. Optical Processes in Semiconductors, Princeton Press., New Jersey.
- [58] Gençyılmaz, O., Atay, F., Akyüz, i., “ ZnO Yarıileken Filmlerin Optik, Elektrik Ve Yüzey Özellikleri Üzerine Isıl Tavlama İşleminin Etkileri” Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 16-1(2012), 56-60.

ÖZGEÇMİŞ

Ayşe Merih AKYÜZLÜ

Kişisel Bilgiler:

Doğum Tarihi :1986
Doğum Yeri : Siirt
Uyruğu : T.C
Medeni Hali : Bekar

Eğitim Bilgileri:

İlköğretim : 1992-1997 Atatürk İlköğretim Okulu
Ortaöğretim : 1997-2000 Mehmet Akif Ersoy İlköğretim Okulu
Lise : 2000-2004 Siirt Lisesi (Yabancı Dil Ağırlıklı)
Lisans : 2007-2011 İnönü Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü(Malatya)