

T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI



TAVLAMA SICAKLIĞININ P-NİO/N-TİO₂ HETEROEKLEM
DİYOTLARININ YAPISAL VE ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUSTAFA SUNKAR

TEZ DANIŞMANI
DOÇ.DR. RIFKI TERZOĞLU

BOLU, OCAK - 2023

KABUL VE ONAY SAYFASI

MUSTAFA SUNKAR tarafından hazırlanan “TAVLAMA SICAKLIĞININ
P-NİO/N-TİO₂ HETEROEKLEM DİYOTLARININ YAPISAL VE
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ” adlı tez çalışması jürimiz tarafından Elektrik-Elektronik
Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak oy birliğiyle kabul edilmiştir.

11/01/2023

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Doç.Dr. Rıfık TERZİOĞLU
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye
Dr. Öğr.Üyesi T. Enes GÜMÜŞ
Sakarya Üniversitesi

.....

Üye
Dr. Öğr. Üyesi Mithat ÖNDER
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. İbrahim KÜRTÜL
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

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

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

Teze ilişkin 03/02/2023 tarihinde Turnitin adlı intihal tespit programından enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı % 24 olarak tespit edilmiştir.

.....
MUSTAFA SUNKAR

ÖZET

**TAVLAMA SICAKLIĞININ P-NİO/N-TİO₂ HETEROEKLEM
DİYOTLARININ YAPISAL VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ
ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MUSTAFA SUNKAR
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK ANABİLİM DALI**

(TEZ DANIŞMANI: DOÇ.DR. RIFKI TERZİOĞLU)

**BOLU, OCAK - 2023
XI+ 38**

Bu tez çalışmasında p-NiO/n-TiO₂ heteroeklem diyot yapısının farklı tavlama sıcaklıkları altında üretilip, bu tavlama sıcaklık değerleri altında diyot yapısının yapısal ve elektriksel özelliklerinin değişip değişmediği incelenmesi amaçlanmıştır. Bu hedef doğrultusunda heteroeklem yapısı termal buharlaştırma ve E-Beam yöntemleri kullanılarak üretilmiş ve üretilen yapılara termal tavlama yöntemiyle 300°C, 420°C, 540°C sıcaklıklar uygulanmıştır. Sonrasında yapıların XRD spektrumu ölçümü, AFM ölçümü, I-V karakteristiği, idealite faktörü değeri ve tavlama sıcaklığına bağlı seri/şönt direnç karakteristikleri incelenmiştir. Çalışma yapılan bu ölçüm ve hesaplamaların yorumlanmasıyla sonuçlandırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Heteroeklem yapıları, p-NiO/n-TiO₂ diyotları, Yarıiletkenler, İnce filmler

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF ANNEALING TEMPERATURE ON THE STRUCTURAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF P-NiO/N- TiO₂ HETEROJUNCTION DIODES

MSC THESIS

MUSTAFA SUNKAR

BOLU ABANT IZZET BAYSAL UNIVERSITY

INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

ELECTRIC ELECTRONIC ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. RIFKI TERZIOGLU)

BOLU, JANUARY 2023

XI+38

In this thesis, it is aimed to produce the p-NiO/n-TiO₂ heterojunction diode structure under different annealing temperatures and to examine whether the structural and electrical properties of the diode structure change under these annealing temperatures. In line with this goal, the heterojunction structure was produced using thermal evaporation and E-Beam methods, and temperatures of 300°C, 420°C, 540°C were applied to the structures produced by thermal annealing method. Afterwards, XRD spectrum measurement, AFM measurement, I-V characteristic, ideality factor value and series/shunt resistance characteristics depending on annealing temperature were investigated. The study was concluded with the interpretation of these measurements and calculations.

KEYWORDS: Heterojunction structures, p-NiO/n-TiO₂ diodes, Semiconductors, Thin films

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL VE ONAY SAYFASI	iii
ETİK BEYAN.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
TABLO LİSTESİ	ix
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	x
TEŞEKKÜR	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. YARIİLETKENLER VE AKIM İLETİM MEKANİZMALARI	6
2.1 PN Eklemnin Enerji Band Diyagramları	6
2.2 Diyotların Akım İletim Mekanizmaları	7
2.2.1 PN Heteroeklemin I-V Karakteristiği.....	7
2.3 Metal Yarıiletken Kontaklar	11
2.3.1 Metal Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar.....	12
2.3.2 Metal Yarıiletken Omik Kontaklar.....	13
2.4 Akım İletim Teorileri.....	14
2.4.1 Termiyonik Emisyon (TE) Teorisi	14
2.4.2 Difüzyon Teorisi.....	15
2.4.3 Termiyonik Emisyon- Difüzyon Teorisi.....	15
2.4.4 T0 Etkili Akım İletimi	16
3. MATERYAL VE YÖNTEM	17
3.1 Titanyum Dioksit(TiO ₂).....	17
3.2 Nikel Oksit(NiO)	18
3.3 Termal Buharlaştırma	19
3.4 Elektron Demeti Buharlaştırma(E-BEAM)	20
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	22
5. ÖLÇÜMLER, ANALİZLER VE TARTIŞMA.....	24
5.1 NiO/TiO ₂ İnce Filmlerin Kristalografik Özellikleri ve SEM Görüntüsü	24
5.2 NiO/TiO ₂ İnce Filmlerin Yüzey Morfolojisi	26
5.3 NiO/TiO ₂ PN Heteroeklem Diyotlarının Elektriksel Özellikleri	28
6. SONUÇ	33
7. KAYNAKLAR.....	34

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	Yarıiletken yapıların enerji-bant diyagramı.....	6
Şekil 2.2	p – n heteroeklemin şematik gösterimi: (a) eklem oluşumundan önce p-ve n-tipi yarıiletkenlerin bant diyagramları (b) eklem oluşuktan sonra enerji bant diyagramı (termal denge halinde) [66].....	7
Şekil 2.3	PN heteroekleminde elektron ve boşluk aktarımıyla oluşan tükenim (deplasyon) bölge.	8
Şekil 2.4	İleri yönde polarlama[67]	10
Şekil 2.5	Ters yönde polarlama[67]	10
Şekil 2.6	PN heteroeklemin I-V karakteristiği.....	11
Şekil 2.7	Metal yarıiletken doğrultucu kontakın enerji bant seviyesi [68].	13
Şekil 2.8	Metal yarıiletken omik kontakın enerji bant seviyesi [68].	13
Şekil 3.1	TiO ₂ 'ye ait Rutil ve Anataz kristal yapıları[70]	17
Şekil 3.2	NiO kristal yapısı[71]	19
Şekil 3.3	Termal buharlaştırma sistemi gösterimi [72].....	20
Şekil 3.4	E-Beam buharlaştırma sistemi gösterimi [73].	21
Şekil 4.1	Tamamlanan diyot yapısı.....	23
Şekil 5.1	Çeşitli tavlama sıcaklıklarından önce ve sonra n-NiO/p-TiO ₂ filminin XRD ölçümleri	25
Şekil 5.2	Üretilen ince film heteroeklem yapının SEM görüntüsü.....	26
Şekil 5.3	NiO/TiO ₂ filmlerinin AFM görüntüsü a-) as- kaplamalı, b-) 300°C, c-) 420°C ve d-) 540°C tavllanmış numuneler için.	27
Şekil 5.4	Diyotların elektriksel akım-gerilim ve tavlama sıcaklığına bağlı seri/şönt direnç karakteristikleri (b).....	29
Şekil 5.5	NiO/TiO ₂ heteroeklem diyotları için ln(I)-V grafiği.....	31

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 5.1	NiO ve TiO ₂ filmlerinin bazı kristalografik parametreleri.....	24
Tablo 5.2	p-NiO/n-TiO ₂ PN diyotlarının hesaplanmış çeşitli elektriksel katsayıları	30



KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

A	: Diyot Yüzey Alanı
AFM	: Atomik Kuvvet Mikroskopisi
DA	: Doğru Akım
E-BEAM	: Elektron Demeti Buharlaştırma
I	: Diyot Akımı
I₀	: Ters polarlama Sızıntı Akımı
J	: Akım Yoğunluğu
J₀	: Doyma Akım Yoğunluğu
K	: Boltzman Sabiti
MY	: Metal-Yarıiletken
N	: İdealite Sabiti
NiO	: Nikel Oksit
R*	: Richardson Sabiti
SnO	: Kalay Oksit
T	: PN Birleşim Sıcaklığı
TE	: Termiyonik Emisyon
TiO₂	: Titanyum Dioksit
UV	: Ultraviyole
V_B	: Bariyer(Eşik) Gerilim
V_r	: Rekombinasyon Oranı
V_x	: Sürüklenme Hızı
ZnO	: Çinko Oksit
q	: Elektron Yük Değeri
qV_i	: Bant Bükülmesi
XRD	: X- Işını Kırınım Yöntemi
Φ	: İş Fonksiyonu
Φ_b	: Potansiyel Engel
Φ_m	: Metallerin İş Fonksiyonu
Φ_{sc}	: Yarıiletkenlerin İş Fonksiyonu

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca akademik anlamda beni yönlendiren ve her konuda desteğini esirgemeyen, tez çalışmalarımın her adımında bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli hocam ve danışmanım Doç. Dr. Rıfkı TERZİOĞLU'na teşekkürlerimi ve en içten saygılarımı sunarım.

Çalışmalarım sırasında desteklerini hiçbir şekilde esirgemeyen, her konuda yardımları olan ve her zaman yanımda olan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Muhsin Uğur DOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım boyunca tez malzemelerimin hazırlama süreci ve deneysel ölçümler sırasında ilgisini ve yardımlarını esirgemeyen, her türlü bilgisini benimle paylaşan, değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Şenol KAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak bu süreçte bana olan desteğini ve sevgisini her an kalbimde hissettiğim kıymetli hayat arkadaşım Tuba YILMAZ SUNKAR'a ve yuvamızın neşesi olan ve bize şans getiren kıymetli kızım Beyza SUNKAR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ölçüm ve karakterizasyon çalışmalarımında desteklerini eksik etmeyen BAİBÜ Nükleer Radyasyon Dedektörleri Uygulama ve Araştırma Merkezine ve üniversitemiz Fizik Bölümüne teşekkürlerimi sunarım.

1. GİRİŞ

Son yıllarda, yarı iletken metal oksitler, yüksek optik şeffaflığı, kontrol edilebilir iletkenlik gibi özellikleri nedeniyle sensörler, robotik ve fotovoltaiik uygulamalar için yaygın olarak kullanılmaktadır [1-3]. Metal-oksit-yarı iletkenlerin bu elektronik, optik ve kimyasal özellikleri; mikroyapıları, bileşimleri ve stokiyometrilere değiştirilerek farklı yapılar için kullanımları sağlanabilir [4,5]. Bununla birlikte, bu malzemelerin elektriksel iletkenliği, elektronik uygulamalar için çok önemlidir. Yarı iletken metal oksitler, yük taşıyıcılarına bağlı olarak n-tipi veya p-tipi olarak sınıflandırılmaktadır. Enerji bant yapısı ile iletkenliğin türü de belirli uygulamalardaki cihaz mimarisi için çok önemlidir.

Çeşitli oksit yarı iletkenler arasında özellikle çinko oksit (ZnO), titanyum oksit (TiO_2), nikel oksit (NiO) ve kalay oksit (SnO) malzeme bilimi ve uygulamalarında yaygın olarak kullanılır [6-8]. Bu metal oksitler kullanılarak Metal-yarıiletken-metal, Schottky diyotları gibi farklı cihaz yapıları üretilmiş ve karakterize edilmiştir [9]. PN heteroeklem diyotları, uygun tasarımları, hızlı tepkileri, akım iletimlerinin kontrol edilebilirlikleri ve yüksek hızlı geri dönüşleri nedeniyle sensör ve anahtarlama uygulamaları için diğer yapılara kıyasla öne çıkmaktadır [11]. Çalışmalar genellikle geleneksel Silikon alt katman üzerinde büyütülen oksit yarı iletkenlere odaklanmıştır. Bu karşın, iki farklı yarı iletken oksit yığını ve ara yüzleri arasındaki olası kusurların özellikleri, araştırmacılar için ileri teknoloji ürünü geliştirmek açısından önem taşımaktadır. Ayrıca, düşük maliyetli malzeme fiyatı, kolay kaplama teknikleri, esnek ve büyük hacimli üretim kapasitesi, yarı iletken oksidi geleneksel silikon bazlı teknoloji için iyi bir alternatif haline getirmektedir [12].

TiO_2 , düşük toksisite, kimyasal kararlılığı ve geniş ticari kullanılabilirliği gibi üstün özelliklere sahip en popüler ve çok çalışılmış malzemelerden biridir [13,14]. Ayrıca, TiO_2 geniş bant aralıklı bir yarı iletkenidir (~ 3.2 eV) ve oksijen boşluklarından dolayı n-tipi iletkenlik sergiler [15,16]. NiO ise alıcı safsızlıkları oluşturan Ni boşlukları nedeniyle p-tipi iletkenlik sergileyen bir diğer dikkat çekici malzemedir [15,17]. NiO ayrıca geniş bant aralıklı bir yarı iletkenidir (~ 3.4 eV) ve mükemmel elektrokimyasal kararlılığa sahiptir [17-19]. Hem TiO_2 hem de NiO malzemeleri benzer bant aralığı ve kafes sabitine sahiptir. Bu nedenle, PN

heteroeklem yapısını oluşturmak için mükemmel adaylardır [20,21]. NiO/TiO₂ heteroekleminin fotodetektör/foto katalitik özelliklerine odaklanan çalışmalar olsa [12,13,20,22-27] da NiO/TiO₂ heteroeklemini olası elektriksel özelliklerini; yapısal ve morfolojik değişimler arasındaki korelasyonlarla inceleyen sistematik bir araştırma mevcut değildir.

Daha önce yapılan çalışmaların bazılarını hem heteroeklem yapıları, hem de kullandığımız NiO ve TiO₂ malzemelerin kullanıldığı çalışmalar açısından inceleyip son 10 yıla göre aşağıdaki gibi verebiliriz:

Somvanshi ve ark. (2013), n-Si (100) alt tabaka üzerinde vakumla biriktirilmiş metalik Zn'nin basit termal oksidasyonu ile sentezlenen ZnO ince filmler üzerindeki Pd Schottky kontaklarının elektriksel ve UV algılama özelliklerini inceledi. Ukoba ve ark. (2018), metal oksit TiO₂/NiO heteroeklem güneş pillerini, spreylendirilme yöntemi kullanarak üretilen heteroeklemin optoelektronik özelliklerini belirledi.

Cavas ve ark. (2013), sol-jel döndürmeli kaplama yöntemi kullanılarak Soyut Çözümle işlenmiş tamamen oksit şeffaf NiO/TiO₂ p-n bağlantısı üretilen, NiO ve TiO₂ filmlerinin optik özelliklerini geçirgenlik ve soğurma spektrumları ile inceledi. NiO ve TiO₂ filmlerinin optik bant aralıklarını optik absorpsiyon yöntemi ile belirledi.

Zhang ve ark. (2014), CuO nanoyapılarının ilgili sentez mekanizmaları, karakterizasyon, temel özellikleri ve uygulamaları ile son sentetik yöntemlerin kapsamlı bir incelemesini sundu.

Mageshwari ve ark. (2016), grafi şeffaf elektrot kullanımı ile bir CuO-ITO heteroeklem diyotunun elektriksel özelliklerini araştırdı. Hetero yapının bariyer yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç gibi elektronik parametreleri I-V ölçümlerinden belirlenmiş olup olası akım taşıma mekanizması tartışıldı.

Parida ve ark. (2017), nanoyapılı NiO ve Si'dan oluşan heteroeklem fotodetektörlerin üretimini araştırarak, nano yapıları NiO/Si heteroeklem fotodetektörlerinin karanlık durumda net doğrultucu IV davranışı sergilediğini belirledi.

Dey (2018), yarı iletken metal oksit (SMO) gaz sensörlerini inceleyip gaz algılama için kullanılan SMO malzemelerinde katkı maddesi veya safsızlık

kaynaklı varyasyonlar hakkında bir araştırma yaptı. Bu araştırmaya göre katkı malzemesinin gaz algılama uygulamaları için metal oksitlerin mikro yapısını, morfolojisini, aktivasyon enerjisini, elektronik yapısını veya bant aralığını değiştirerek SMO'ların özelliklerini geliştirdiği sonucuna vardı.

Li ve ark. (2018), TiO_2 bazlı hidrojen sensörlerinin genel hidrojen gazı algılama mekanizmasını tanıtır, saf TiO_2 , metal destekli TiO_2 , organik- TiO_2 kompozitleri, karbon- TiO_2 kompozitleri, MO_x - TiO_2 kompozitleri ve etkili üst-alt elektrot konfigürasyonuna sahip yeni sensör konseptini içeren çeşitli TiO_2 malzemelerini inceledi.

Pansri ve ark. (2019) NiO ile katkılanmış TiO_2 heteroeklem fotodedektörleri iki aşamalı anotlama ile hazırladı. NiO partiküllerinin yüzey saçılması, voltaj arttıkça TiO_2 nanotüpleri üzerinde önemli ölçüde daha az NiO partikül kümelenmesini gözlemleyerek, değişen ikinci adım anotlama voltajıyla başarılı bir şekilde kontrol etti.

Nunes ve ark. (2019), ultraviyole (UV) sensörleri ve biyosensörler dahil olmak üzere gazdan nem sensörlerine kadar değişen nanoyapılı yarı iletken metal oksit sensörlerinin son gelişmelerini kapsamlı bir şekilde gözden geçirdi. Çinko oksit (ZnO), titanyum dioksit (TiO_2), tungsten trioksit (WO_3), bakır oksit (CuO ve Cu_2O), kalay oksit (SnO ve SnO_2) ve vanadyum oksit (VO_2 , V_2O_5) bazlı sensörleri sürekli filmler/ katmanları olarak açıkladı.

Oztel ve ark. (2019), yüzey platin (Pt) katkı konsantrasyonlarının ve çalışma sıcaklıklarının, $\text{Pt/SnO}_2/\text{Pt}$ metal-yarı iletken-metal (MSM) dirençli gaz sensörlerinin oksijen algılama özellikleri üzerindeki etkileri, yapısal ve kimyasal varyasyonlar dahil edilerek araştırdı.

Pansri ve ark. (2019) NiO ile katkılanmış TiO_2 heteroeklem fotodedektörleri iki aşamalı anotlama ile hazırladı. NiO partiküllerinin yüzey saçılması, voltaj arttıkça TiO_2 nanotüpleri üzerinde önemli ölçüde daha az NiO partikül kümelenmesini gözlemleyerek, değişen ikinci adım anotlama voltajıyla başarılı bir şekilde kontrol etti.

Kaya (2020) Pt/p-NiO/n-Si/Al ince film heteroeklem diyotlarının çeşitli termal tavlama sıcaklıklarından önce ve sonra yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel özelliklerindeki gelişmeleri detaylı olarak inceledi.

Vinoth ve Gopalakrishnan (2020), birbirine bağlı elektrot (IDE) sensörü üretip, karakterize etmiş ve amonyak algılama için başarıyla kullanabileceğini gösterdi. DC magnetron püskürtme ile üretilen IDE olarak gümüş (Ag) kullanılırken, RF magnetron püskürtme ile Ag püskürtmeli IDE üzerine üç farklı katkı (Cd, Mg ve Y) ZnO algılayıcı katman biriktirdi. Biriken algılama katmanı, tipik ZnO özelliklerini ortaya çıkaran X-ışını kırınımı (XRD), Fotoluminesans (PL) ve Hall etkisi ile karakterize edildi.

Pansri ve ark. (2020), NiO ile katılanmış TiO₂ heteroeklem fotodedektörleri iki aşamalı anotlama ile hazırlayıp, NiO partiküllerinin yüzey saçılmasını, uygulanan gerilim arttıkça TiO₂ nanotüpleri üzerinde önemli ölçüde daha az NiO partikül kümelenmesi gözlemleyerek, değişen anotlama voltajıyla başarılı bir şekilde kontrol etti.

Boutelala ve ark. (2020), Al/TiO₂/p-Si/Al heteroeklemini, p-Si tabaka üzerinde bir TiO₂ ince film oluşturularak ve Al metalini film üzerine buharlaştırılarak üretti. Raman ölçümüyle TiO₂ film bantlarının anataz ana fazı ile karakterize edildiğini gösterdiler. Al/TiO₂/p-Si diyotunun, mükemmel bir ışığa duyarlılığa ve yüksek ışık tepki özelliklerine sahip olduğunu ortaya çıkardı.

Koca ve ark. (2021), n-TiO₂/polifenilen (PPh)/p-Si heteroeklem yapısını, sırasıyla diazonyum modifikasyon yöntemi ve katodik elektrodepozisyon ile PPh film ve TiO₂ üst tabakasının p-Si substratlar üzerinde üretilen filmlerin XPS, UV-VIS dağınık yansıma ve STM analizleri yaptı.

Mouchou ve ark. (2021) p-tipi olarak NiO ve n-tipi olarak TiO₂ kullanarak fotovoltaiik uygulamalar için bir heteroeklemlı güneş cihazı geliştirdi.

Kaya (2022) döndürmeli kaplama yöntemi kullanılarak ilk defa TiO₂/CuCrO₂ p-n eklem UV fotodedektörler üreterek, üretilen malzemelerin morfolojik ve optik özelliklerini detaylı bir şekilde analiz etti. Buna ek olarak, CuCrO₂ film kalınlığının UV fotodedektör performansına etkileri de incelendi.

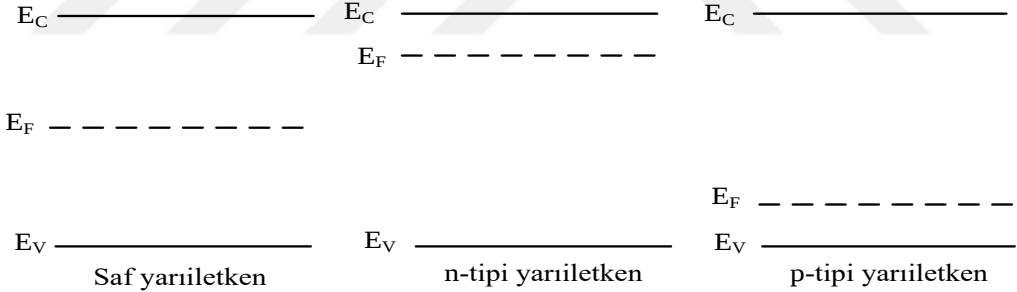
Bu alışmada, NiO/TiO₂ PN heteroekleminin üretimini ve karakterizasyonunu ayrıntılı olarak araştırılmıştır. NiO/TiO₂'nin mikroyapısı, morfolojisi ve elektriksel özellikleri üzerine üretim sonrası tavlama sıcaklığının etkileri sistematik olarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar literatür verileriyle karşılaştırılmıştır.



2. YARIİLETKENLER VE AKIM İLETİM MEKANİZMALARI

Atomların elektriği iletip iletmeme özellikleri üç durumda belirlenmiştir. Bunlar, iyi ileten iletkenler, iletmeyen yalıtkanlar ve atom yapısına dışarıdan müdahaleyle iletme geçen yarıiletken atomlardır. Yarıiletkenler doğada saf halde bulunabildikleri gibi farklı atomlarla bileşik halde de bulunabilirler. Silisyum, Germanyum ve Selenyum yarıiletken yapıları en çok kullanılan yapılardır. Kalay oksit, bakır oksit, galyum arsenik ise bileşik halinde üretilip yarıiletken olarak kullanılan yapılardır.

Teknolojide kullanılan bu yapılar oda şartlarında yalıtkan özellik sergilerken bunlara eklenen katkı malzemeleriyle elektriksel iletkenlikleri değiştirilerek elektronik devrelerde kullanımı mümkün hale getirilebilir. Silikon benzeri bir yarıiletkene periyodik cetvelin IIIA grubundan bir element katkılındığında değerlik bandı yukarı şekilde eğilim göstererek p-tipi bir yarıiletken haline getirilir. P-tipi yarıiletkende çoğunluk taşıyıcıları hole adı verilen boşluklardır.



Şekil 2.1 Yarıiletken yapıların enerji-bant diyagramı

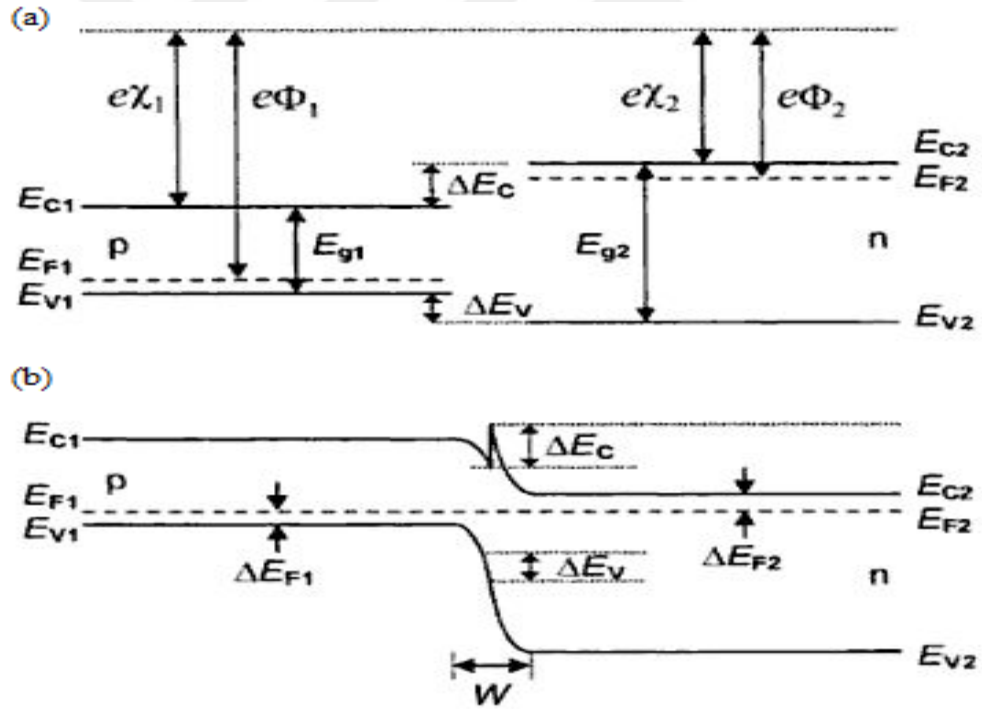
Yine Silikon benzeri bir yarıiletkene periyodik cetvelin VA Grubundan bir element katkılanırsa bu defa değerlik bandı aşağı doğru eğilim göstererek n-tipi bir yarıiletken haline gelmiş olacaktır. N-tipi yarıiletkenlerde yük taşıyıcıları elektronlardır.

Şekil 2.1'de görüldüğü üzere saf yarıiletken malzemenin fermi enerji düzeyi iletkenlik bandı ve valans bandının ortasında yer alırken n-tipi yarıiletkende iletkenlik bandına, p-tipi yarıiletkende ise valans bandına yaklaştığı görülmektedir.

2.1 PN Eklemin Enerji Band Diyagramları

PN eklemi, p-tipi ve n-tipi iki yarıiletkenin bağlantı oluşturarak elde edilen yapıdır. Aynı yarı iletken malzemenin p-tipi ve n-tipi varyasyonları kullanılarak oluşturulan PN bölgelerine homoecklem denirken, p-tipi ve n-tipi özellik gösteren farklı yarıiletkenlerin oluşturdukları PN bölgesine heteroecklem denilmektedir [66].

P-N heteroecklemi oluşturan p-tipi yarıiletkenin Fermi seviyesi valans bandına yakinken, n-tipi yarıiletkenlerde iletim bandının altında yer almaktadır (Şekil 2.2a). İki yarıiletken birbirlerine temas edip kendi aralarında yük geçişi sonunda fermi seviyeleri aynı konumda kararlı hale gelir. Bu, p-n eklemine karşılık olarak bandın bükülmesine neden olur (Şekil 2.2). Fermi seviyesi, p tipi yarıiletkenin valans bandına ve n-tipi yarıiletkenin iletim bandına yakın olarak konumlanmaktadır. p-tipi ve n-tipi yarıiletkenlerin iletim bantları arasındaki fark kadar potansiyel kurulum (V_{built}) oluşur (Şekil 2.2b).

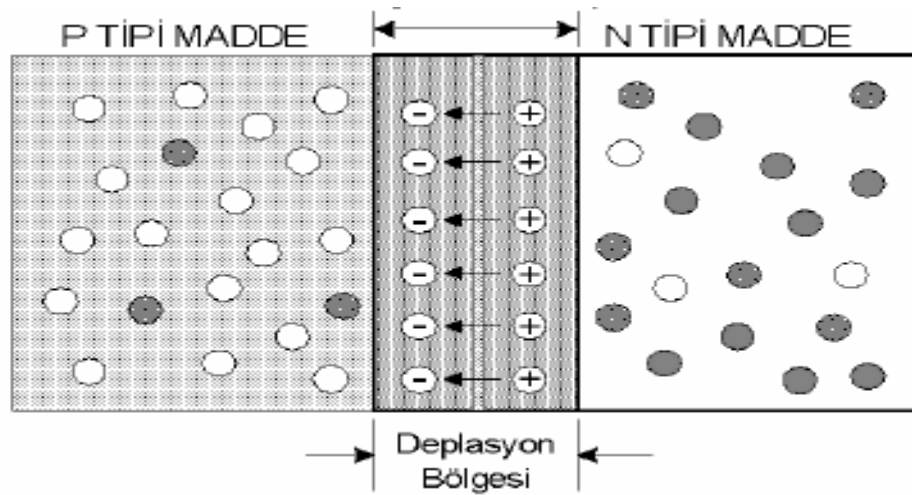


Şekil 2.2 p – n heteroecklemin şematik gösterimi: (a) eklem oluşumundan önce p- ve n-tipi yarıiletkenlerin bant diyagramları (b) eklem oluşuktan sonra enerji bant diyagramı (termal denge halinde) [66]

2.2 Diyotların Akım İletim Mekanizmaları

2.2.1 PN Heteroecklemin I-V Karakteristiği

Bir PN heteroeklemin n-tipi bölgesinde çok sayıda serbest elektron, p-tipi bölgesinde ise hole/boşluk bulunmaktadır. Uygulanan bir gerilim olmadığı zaman n bölgesindeki elektronlar rastgele bir şekilde her yöne hareket halindedirler. Eklem bölgesine yakın olan bazı elektronlar p bölgesine geçiş yapabilmektedirler. Buraya geçen elektronlar buradaki boşluklar ile birleşerek n bölgesinde bir pozitif yük bırakmış olur ve bu yüke ‘pozitif iyon’ adı verilir. Ayrıca p bölgesine geçen elektron bu bölgede negatif bir yük oluşturduğu için p bölgesinde oluşan bir ‘negatif iyon’ haline gelmiş olacaktır. Bu değişimler sonucunda çok sayıda pozitif ve negatif iyonlar PN heteroeklemin birleşme bölgesinde bir duvar oluşturur. Bu duvar oluşuktan sonra n bölgesindeki elektronların p bölgesine geçebilmesi için hem pozitif iyonların çekiminden hem negatif iyonların itmesinden kurtulması gerekir. Oluşan bu iyon tabakasıyla bu bölgede hareketli elektron ve boşluklar azalmış olacaktır. Bu nedenle bu bölgeye ‘tükenim (deplasyon) bölge’ adı verilir. PN eklemin azaltılmış bölgesinde oluşan iç elektriksel alan nedeniyle bir ‘bariyer (eşik) potansiyeli’ oluşur. Bu potansiyel V_B deplasyon bölgedeki elektrik alandan elektronların geçebilmesi için gerekli olan gerilim miktarıdır. Klasik diyot yapıları için üretilen malzeme Germanyumsa bu potansiyel fark 0.3V'tur, Silisyumsa potansiyel fark 0.7 V'tur. Bu değerlerin ortamın ısısına bağlı olarak değiştiği bilinmektedir. Şekil 2.3'te azaltılmış bölge gösterilmektedir.

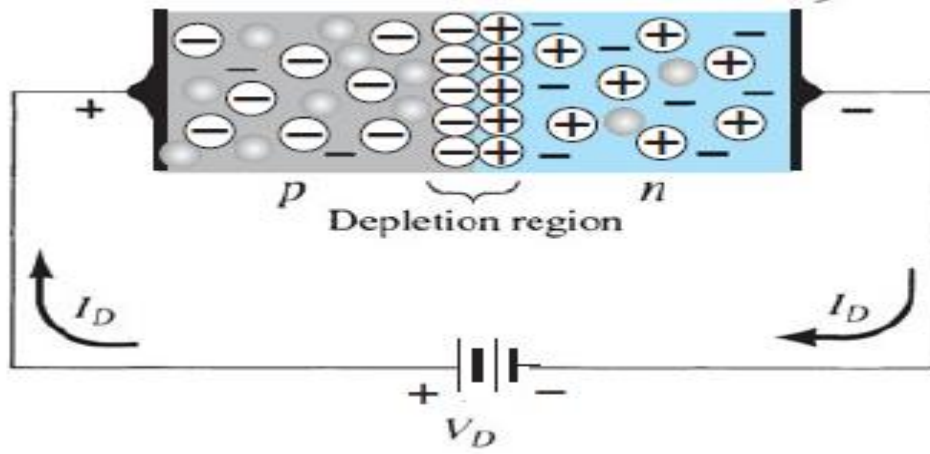


Şekil 2.3 PN heteroekleminde elektron ve boşluk aktarımıyla oluşan tükenim (deplasyon) bölge.

Elektronik devre elemanlarının doğru akım (DA) gerilim altında çalıştırılmasına polarlama denilmektedir. PN heteroeklemi ileri yönde (doğru)

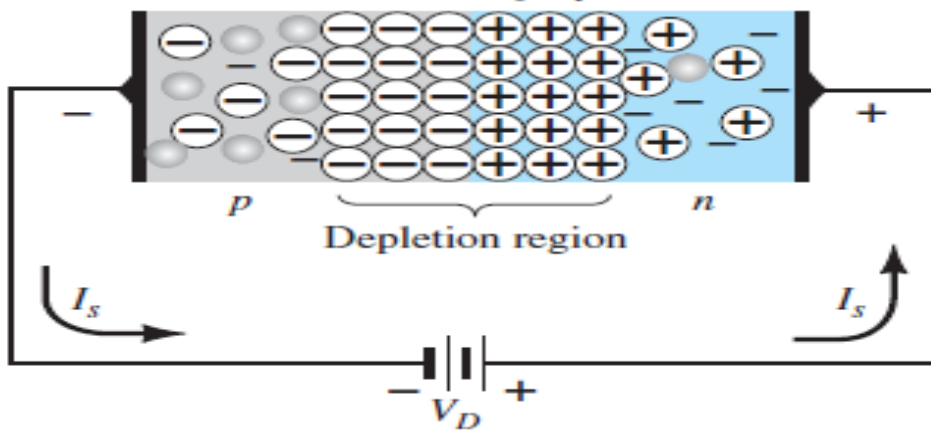
polarlama ve geri yönde (ters) polarlama yapılarak kullanılmaktadır. İleri yönde polarlama yapılarak diyot ilettime geçerken, ters yönde polarlama altında yalıtım halinde olacaktır. İleri polarlama altında çalıştırılabilmesi için diyodun anoduna gerilim kaynağının + kutbu, katoduna ise gerilim kaynağının - kutbu bağlanmalıdır.

İleri yönde uygulanan DA polarlama V_B bariyer (eşik) potansiyelini aştığı zaman, n bölgesindeki elektronların bir kısmı tükenim bölgesini geçerek p bölgesindeki boşluklar ile birleşir. Bu birleşmeden dolayı açığa çıkan enerji çoğunlukla ısı olarak kendini gösterir. Geriye kalan elektronlar ise yoluna devam eder. Elektronlar n bölgesini terk ederken DA gerilim kaynağının negatif ucundan daha fazla elektron akışı sağlanır. Böylece serbest elektronların akımı meydana gelir. Daha sonra bu elektronlar p bölgesindeki holelerle birleşip valans elektronu haline gelirler. Böylece DA gerilim kaynağının pozitif ucuna doğru holeden hole geçen valans elektronları gibi hareket ederler. Bu durumda aynı elektronların hareketi gibi holelerinde hareketi oluşmaktadır. Böylece p bölgesinde de akım oluşmuş olacaktır. PN diyotlar ileri yönde polarlamada iletim azınlık taşıyıcıları sayesinde gerçekleşmektedir. Diğer bir deyişle, ileriye dönük bir p-n diyot için akım, azınlık taşıyıcıların tükenme bölgesinin duvarlarından kontağa difüzyonu nedeniyle akar. p-n diyodu ileri polarlamalı olduğunda, n-tarafındaki elektronların bir kısmı ve p-tarafındaki holelerin bir kısmı, bölgedeki elektrik alanı yoluyla tükenme bölgesi boyunca sürüklenir. Tükenme bölgesinin diğer taraflarında, her biri bir azınlık taşıyıcısıdır, yani p-tarafında elektronlar azınlıktadır ve n-tarafında holeler azınlıktadır. Daha sonra her iki taraftaki çoğunluk taşıyıcıları ile birleşirler ve popülasyonları tükenme bölgesinden temas noktalarına doğru katlanarak azalır. Azınlık taşıyıcılarının bu difüzyon süreci, bir p-n diyotlarda akım oluşturmaktadır. Şekil 2.4'te ileri yönde polarlama gösterilmiştir.



Şekil 2.4 İleri yönde polarlama[67]

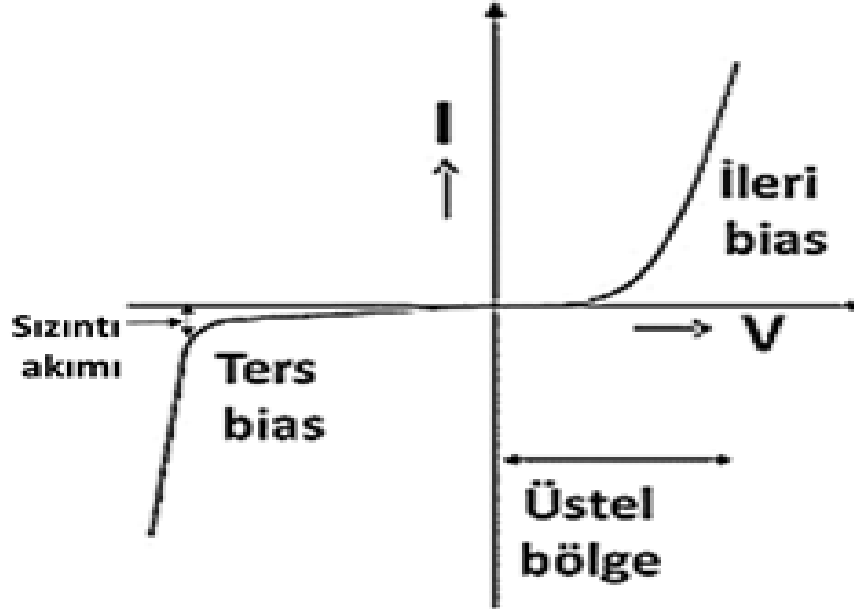
Ters yönde polarlama diyotun kesimde olduğu durumdur. DA gerilim kaynağının negatif ucu p bölgesindeki holeleri birleşme noktasından uzaklaştırır, böylece hem elektronlar hem holeler pn birleşme noktasından uzaklaşıp azaltılmış bölgeyi genişletir. PN heteroeklem üzerindeki potansiyel fark DA değere eşit oluncaya kadar bu durum sürer ve eşit olduğu anda çoğunluk taşıyıcıları akımı kesilir. Böylece zıt yükler arasında kalan azaltılmış bölge etkili bir yalıtkan olarak davranıp bir kapasite özelliği göstermeye başlar. Bu iç kapasiteye azaltılmış bölge kapasitesi denir. Burada elektron ve holelerin azaltılmış bölgeyi genişletmesi sırasında çok küçük bir akım oluşturur ve bu akıma sızıntı akımı denir. Şekil 2.5'te ters yönde polarlama gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Ters yönde polarlama[67]

Eğer ters yönde polarlama gerilimi çok arttırılırsa ters yönde bozulma meydana gelir. Bu durum serbest elektronların uygulanan DA gerilimden kaynaklı enerjiyle diğer atomlarla çarpışıp atomun valans elektronunu iletim bandına geçirmesine

sebeep olarak elektron sayısının katlanarak artmasına sebep olmasıyla oluşur. Bu hızlı artışa çığ etkisi denir ve bu etki sonucunda ters yönde bir akım oluşur. Şekil 2.6'da PN heteroeklemin I-V grafiği gösterilmiştir.



Şekil 2.6 PN heteroeklemin I-V karakteristiği

Diyotların akım eşitliğini aşağıdaki gibi gösterebiliriz:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

Burada:

I: Diyot akımını,

I_0 : Ters polarmada sızıntı akımını,

V: Diyot uçlarına uygulanan polarma gerilimini,

q: Elektron yük değerini,

T: pn birleşim sıcaklığını,

k: Boltzman sabitini,

n: idealite faktörü göstermektedir.

2.3 Metal Yarıiletken Kontaklar

Bir metal ve yarıiletken kontak haline getirildiğinde termal denge oluşup iki madde arasında Fermi enerjileri eşit düzeye gelinceye kadar yük değişimi olur. Bu

şekilde yapılan birleştirme işlemine metal-yarı iletken (MY) kontak denir. Bir metal ve bir yarıiletken birleştirilerek kontak haline getirildiğinde iki tip kontak oluşmaktadır. Bu iki kantağın birincisi metal yarıiletken doğrultucu kontak (Schottky kontak) lineer bir akım-gerilim karakteristiğine sahip olmayan olup, diğeri ise akım-gerilim karakteristiği lineer yapıda olan omik kontakır. Kontak yapısı oluşturulurken kullanılan metalin yüksek saflıkta olması ve yarıiletkeninde yüzey pürüzsüzlüğünün düşük olması ideal omik özellik için önemlidir.

2.3.1 Metal Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar

Metal yarıiletken kontakları incelerken iş fonksiyonu denilen bir tanımla karşılaşırız. Bu iş fonksiyonu (Φ), bir elektronu Fermi enerjisi seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan minimum enerji miktarıdır. Metal için bu iş fonksiyonu Φ_m ile gösterilirken, yarıiletken için Φ_{sc} gösterimi kullanılacaktır.

Kontak oluşumu sırasında Fermi enerjisi seviyeleri aynı oluncaya kadar yarıiletken bandından metale doğru elektron geçişi gerçekleşir. Bu geçiş tamamlandığında termodinamik denge sağlanmış olur. Yarıiletkenden metale giden elektronlar sonucu yarıiletkende pozitif yükler kalmış olur. Bu etkileşim sonucunda yarıiletken ve metal yüzeyler arasında sonsuz incelikte olduğu kabul edilen deplasyon bölgesi oluşur. Kontak oluşması ve Fermi enerjisi seviyelerinin eşitlenmesi ve deplasyon bölgesi oluşumunun ardından yarıiletken tarafındaki bant bükülmesi:

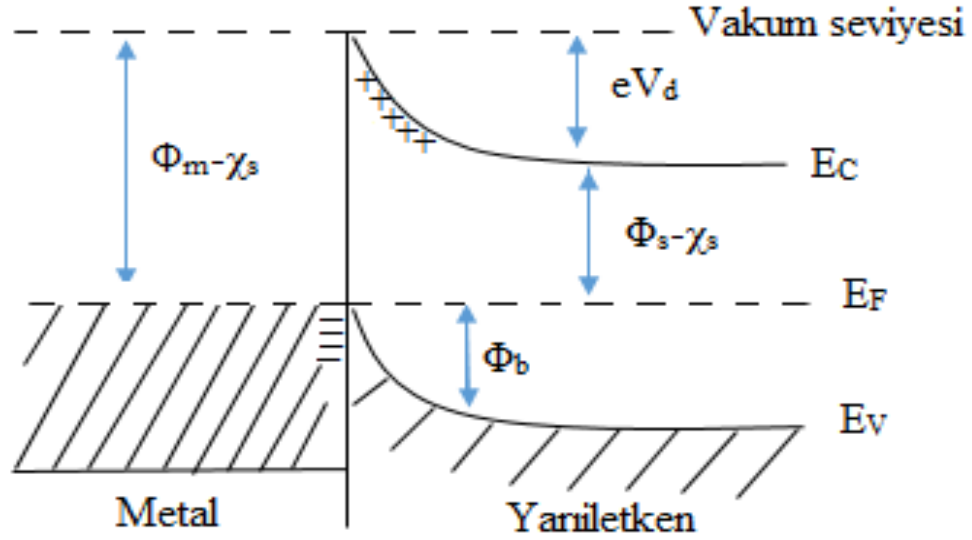
$$qV_i = q(\Phi_m - \Phi_{sc}) \quad (2.2)$$

ifadesine eşit olacaktır. Bu bant bükülmesi elektronların metale geçmesini engelleyen bir potansiyel engel oluşturur. Bu engel:

$$\Phi_b = (\Phi_m - \chi) = V_i + (E_c - E_f) \quad (2.3)$$

ifadesiyle verilen Φ_b potansiyel engelidir.

Şekil 2.7’de metal yarıiletken doğrultucu kantağın enerji bant seviyesi gösterilmiştir.

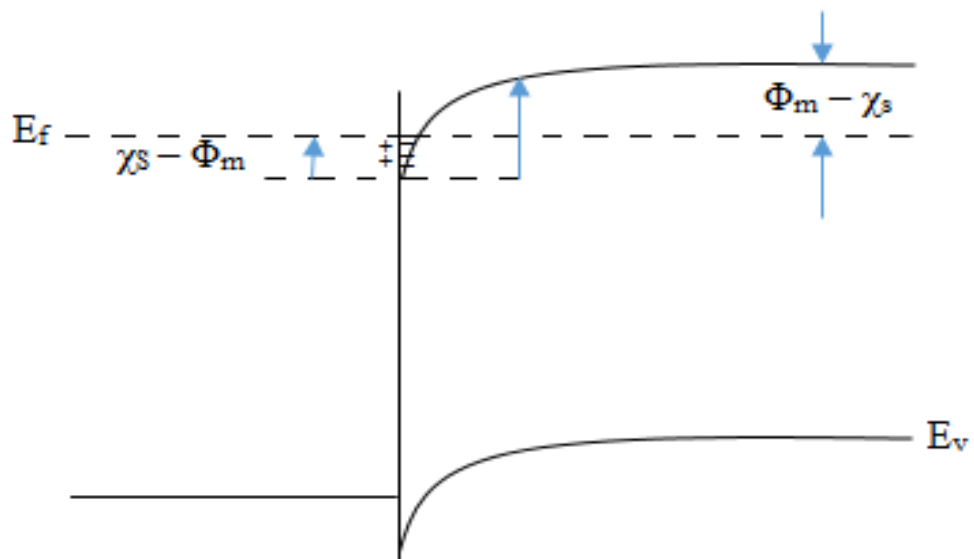


Şekil 2.7 Metal yarıiletken doğrultucu kontağın enerji bant seviyesi [68].

2.3.2 Metal Yarıiletken Omik Kontaklar

Omik kontak; ohm yasasına uyan ve doğrultucu etkisi olmayan, bunun yanında metal ile yarıiletken arasındaki direncin çok düşük olduğu yapıdır. Omik kontaklarda metal ile yarıiletken arasında herhangi bir potansiyel engeli yoktur, böylece metalden yarıiletkene veya tam tersi durumda yük taşıyıcıları hareket ederken herhangi bir engelle karşılaşmadıkları için potansiyel azalması olmadan birbirlerine doğru hareket ederler.

Şekil 2.8’de metal yarıiletken omik kontağın enerji bant seviyesi gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Metal yarıiletken omik kontağın enerji bant seviyesi [68].

2.4 Akım İletim Teorileri

Metal yarıiletken kontaklarda uygulanan gerilim neticesinde oluşan akım; gerilimin yönü, sıcaklık, yarıiletken tipi, kontaklar arasında kullanılacak tabaka, ara yüzey durumları gibi değişkenlerden etkilenecektir. Bu gerekçeyle kontaklardan geçen akımın tek bir teoriye bağlı olduğu söylenemez. Bunun yerine daha baskın olan teorinin önceliğe alındığı diğerlerinin ihmal edildiği durumlarla daha doğru sonuçlar elde edilecektir. Metal yarıiletken kontaklarda başlıca akım iletim teorileri aşağıdaki gibidir:

- Termiyonik Emisyon(TE) Teorisi
- Difüzyon Teorisi
- Termiyonik Emisyon-Difüzyon
- T_0 Etkili Akım İletimi

2.4.1 Termiyonik Emisyon (TE) Teorisi

Termiyonik emisyon teorisi çoğunluk taşıyıcılarının termal enerji değerinin metal yarıiletken kontakta oluşan potansiyel engel (Φ_B) değerinden yüksek olduğu hallerde kullanılır. Oluşan akım metalden yarıiletken ya da tam tersi duruma doğru da oluşabilir. Bu durum metal n-tipi yarıiletken kontaklarda elektronlarla, metal p-tipi yarıiletken kontaklarda ise holeler tarafından gerçekleştirilir.

Bu teoriye göre; potansiyel engeli kT/q dan çok daha büyüktür ($e\Phi_b \gg kT/q$), taşıyıcıların ortalama yolu deplasyon bölgesinden geniş olduğu için yarıiletken metale akan holelerin deplasyon bölgesindeki çarpışmaları ihmal edilebilir.

Doğru besleme gerilimi (V_a) kontağa uygulandığında elektronların yer değişmesi için aşmaları gereken potansiyel engel $\Phi_b - V_a$ 'ya eşit olur. Yarıiletken metale doğru gerçekleşen akı yoğunluğu $J_{s \rightarrow m}$, potansiye engeli geçebilecek yoğunlukta elektron konsantrasyonuna ve bunların hızına bağlıdır. Buna göre:

$$J_{s \rightarrow m} = e \int_{E_c}^{\infty} V_x dn \quad (2.4)$$

denklemlerle gösterilebilir. Burada E_c , metal içindeki termiyonik emisyonun gerçekleşmesi için gerekli olan en düşük enerjiyi gösterir. V_x ise taşıyıcıların sürüklenme hızını gösterir. Buradan termiyonik emisyon akımı:

$$J_{s \rightarrow m} = AR^*T^2 \exp \left[-\frac{q(\Phi_b - V_a)}{kT} \right] \quad (2.5)$$

burada R^* , Richardson sabiti ve değeri: $4\pi meqk^2/h^3 \cdot e$ eşittir. A ise diyet yüzey alanıdır.

Metal ve yarıiletken kontak haline geldiğinde termal denge sağlandığında iki madde arasındaki yük taşıyıcıları sayısı aynı olduğu için toplam akım sıfır olarak görülecektir. Bu durumda toplam akım ifadesi:

$$J = AR^*T^2 \exp \left[-\frac{q\Phi_b}{kT} \right] \left[\exp \left(\frac{qV_a}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.6)$$

ifadesiyle elde edilir.

2.4.2 Difüzyon Teorisi

Difüzyon teorisi Schottky tarafından düşük taşıyıcıya sahip yarıiletken ile yapılan kontakların akım iletim mekanizması olarak sunulmuş bir teodir [69]. Bu teonin varsayımları:

- Oda sıcaklığında potansiyel engel, kT/q enerjisinden oldukça büyüktür.
- $x=0$ ve $x=w$ noktalarında yük taşıyıcılarının yoğunluğu termal dengedekiyle aynıdır ve akım akışından etkilenmezler.
- Yük taşıyıcılarının deplasyon bölgesinde çarpışmaları ihmal edilmez.
- Yarıiletken katkı atom yoğunluğunun sabit olması gerekir.
- Metal yarıiletken kontaktaki akım sürüklenme ve difüzyon akımıyla sınırlıdır.

Bu şartlar sağlandığında oluşan akım sadece yoğunluk farkı ve bölgesel alana bağlı olacağı için metal n tipi yarıiletken kontaklarının akım ifadesi:

$$J_x = J_n = q \left[n(x)\mu E(x) + Dn \frac{dn}{dx} \right] \quad (2.7)$$

şeklinde elde edilir. Burada $n(x)$ elektron yoğunluğu, μ elektron mobilitesi, Dn elektron difüzyon sabiti ve $E(x)$ Schottky bölgesindeki elektrik akımıdır.

2.4.3 Termiyonik Emisyon- Difüzyon Teorisi

Bu teori Crowell in metal-yarıiletken arayüzey kenarında tanımlamış oldukları V_r rekombinasyon oranı üzerine kurulmuştur. Termiyonik emisyon-difüzyon teorisine göre metal-yarıiletken ara yüzeyinde bulunan elektronlar optik fononlar ile etkileşmeksizin potansiyel engel üzerinden geçme olasılığı ve ortalama iletim katsayısı değeri dikkate alındığında termiyonik emisyon teorisindeki Richardson sabiti (R^*), R^{**} olarak değişir. Dolayısıyla akım-gerilim denkleminin en genel hali:

$$J = J_o \left[\exp \left(\frac{eV}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (2.8)$$

ile verilir. Burada J_o doyma akım yoğunluğu, T sıcaklık ve n diyotun idealite faktörü olmak üzere;

$$J_o = -R^{**} T^2 \exp \left(-\frac{e\Phi_b}{kT} \right) \quad (2.9)$$

bu eşitlikte, R^{**} düzenlenmiş Richardson sabiti ve β engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlı değişim katsayısı olmak üzere:

$$R^{**} = R^* \left[\exp \left(\frac{\beta}{kT} \right) \right] \quad (2.10)$$

ile bulunur.

Termiyonik emisyon teorisine göre Schottky diyotlarda idealite faktörü 1'e eşittir ve ideal değerden sapmaları belirleyebilmek için n ile gösterilir. Böylece akım yoğunluk ifadesi:

$$J = J_o \exp \left(\frac{eV}{nkT} \right) \quad (2.11)$$

şeklinde son halini almış olur.

2.4.4 T_0 Etkili Akım İletimi

İdealite faktörü(n) üretilen heteroeklem diyotun kalitesi hakkında bilgi vermektedir. İdeal diyotlarda bir kabul edilen bu değer birden büyük olması halinde diyot ideal davranışından uzaklaşacaktır. İdeal davranıştan uzaklaşmasına ara yüzey durumları veya Schottky etkisi neden olmuyorsa n değeri sıcaklıktan etkilenmemektedir. Ancak idealite faktörünün birden büyük olmasına termiyonik alan emisyon veya rekombinasyon akımları neden oluyorsa n değeri sıcaklığa bağlı olacaktır. Bu durumda T_0 etkili akım aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$J = R^{**} T^2 \exp \left[-\frac{q\Phi_b}{k(T+T_0)} \right] \left\{ \exp \left[\frac{qV}{k(T+T_0)} \right] - 1 \right\} \quad (2.12)$$

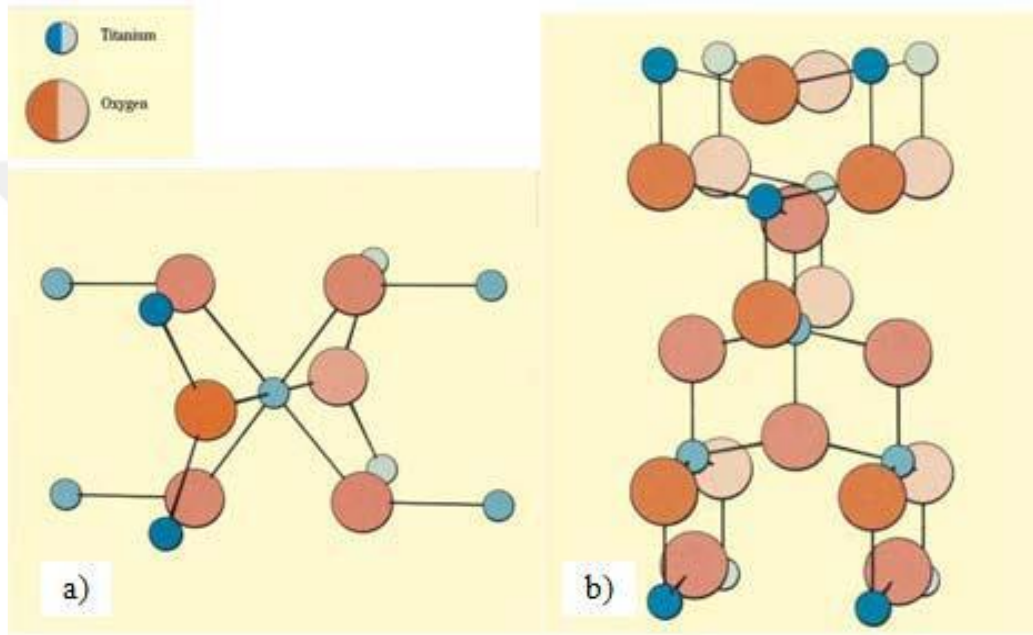
T_0 değeri uygulanan gerilim ve sıcaklıktan bağımsız bir sabittir. Yapılan çalışmalar idealite faktörünün deneysel olarak sıcaklıkla ilişkisi aşağıdaki şekilde elde edilmiştir:

$$n = 1 + \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (2.13)$$

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Titanyum Dioksit(TiO_2)

Titanya olarak da bilinen TiO_2 üç kristal fazı olan bir bileşiktir. Bunlar, anataz, brookit ve rutil'dir. Bunların içinden en kararlı termodinamik yapısı olan rutil'dir ve bu sayede bolca bulunmaktadır. Brookitin fazı geniş sıcaklık aralığındaki kararsız yapısı nedeniyle araştırmacılar tarafından ilgi görmemiştir. TiO_2 'ye ait Rutil ve Anataz kristal yapıları Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 TiO_2 'ye ait Rutil ve Anataz kristal yapıları[70]

İki yapı birbirinden farklı bazı önemli özellikleri bulunmaktadır. Rutil TiO_2 anatazdan daha yüksek kırılma indeksine sahiptir ve kimyasal kararlılığı daha iyidir. Titanyum dioksitin her fazındaki enerji seviyeleri farklıdır. Rutil için bu enerji aralığı 3 eV iken Anataz için 3.2 eV'tur. Anataz ve rutil yapının her ikisi de tetragonal, brookit ise ortorombik kristal yapıdadır. Anataz ve rutil yapı birim hücre başına sırasıyla 12 ve 6 atom içerir. İki yapının komşu atomlar arasındaki uzaklıkları farklıdır. Ti-Ti arasındaki mesafe, anataz yapıda rutil yapıdan daha kısa iken, Ti-O arasındaki uzaklık rutil yapıdan daha uzundur.

Titanyum dioksitin opak olması, kırılma indeksinin yüksek olması, fazla toz bırakmaması, toksik olmaması gibi özellikleri nedeniyle bazik kurşun karbonat, çinko oksit ve litopon (çinko sülfür-baryum sülfat karışımı) gibi bileşiklere göre daha çok kullanılmaktadır.

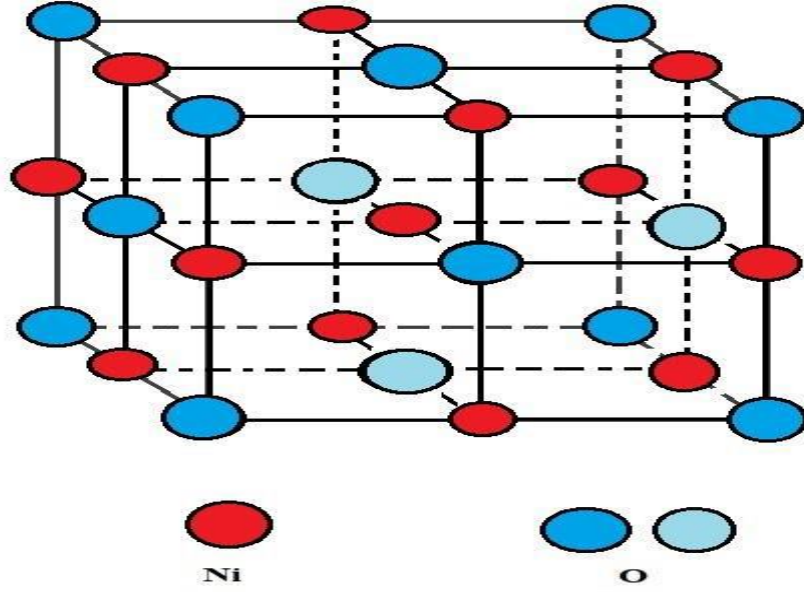
Son zamanlarda TiO_2 nanopartikülleri, kompozit yüzeylerde hücre yapışmasını geliştirerek biyo bozunur polimer matrisler için etkili dolgu maddesi olarak önerilmektedir. Çeşitli çalışmalarda TiO_2 nanopartiküllerinin dokuya ara yüzey bağlanması sağlayabilen biyoaktif bir malzeme olabileceği kanaatine varılmıştır[75]. TiO_2 'nin ince film halinde oluşturulmasına yönelik ilk çalışmalar 1987'de Matthews ve 1995'te Heller tarafından yapılmıştır [76].

3.2 Nikel Oksit(NiO)

Nikel (II) oksit, NiO formülüne sahip ve yarıiletken özellikteki NiO 'ın kaya tuzu olarak da bilindiği kimyasal bileşiktir. Bazik bir metal oksit olarak sınıflandırılır. NiO birçok farklı yöntem ile hazırlanabilmektedir. Bu yöntemlerin arasında en basit ve en başarılı hazırlama yöntemi ise açık yeşil bir toz veren hidroksit, nitrat ve karbonat gibi bir nikel (II) bileşiklerinin pirolizidir. NiO 420°C 'nin üzerinde ısıtıldığı zaman nikel tozu NiO verecek şekilde oksijenle reaksiyona girer.

NiO uygun maliyeti, yüksek kapasitans değeri, kolay elde edilmesi, kimyasal özellikleri nedeniyle tercih edilen metal oksitlerden biridir. NiO geniş doyum aralığına sahip bir p-tipi yarıiletken malzemedir. Band aralığı 3.6-4.0 eV aralığındadır. NiO 'nun kristal yapısı Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

NiO filmler; termistörler, optik anahtarlama cihazları, elektro kaplama, yakıt pili elektrotlarında, yüksek güçlü kapasitörler gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

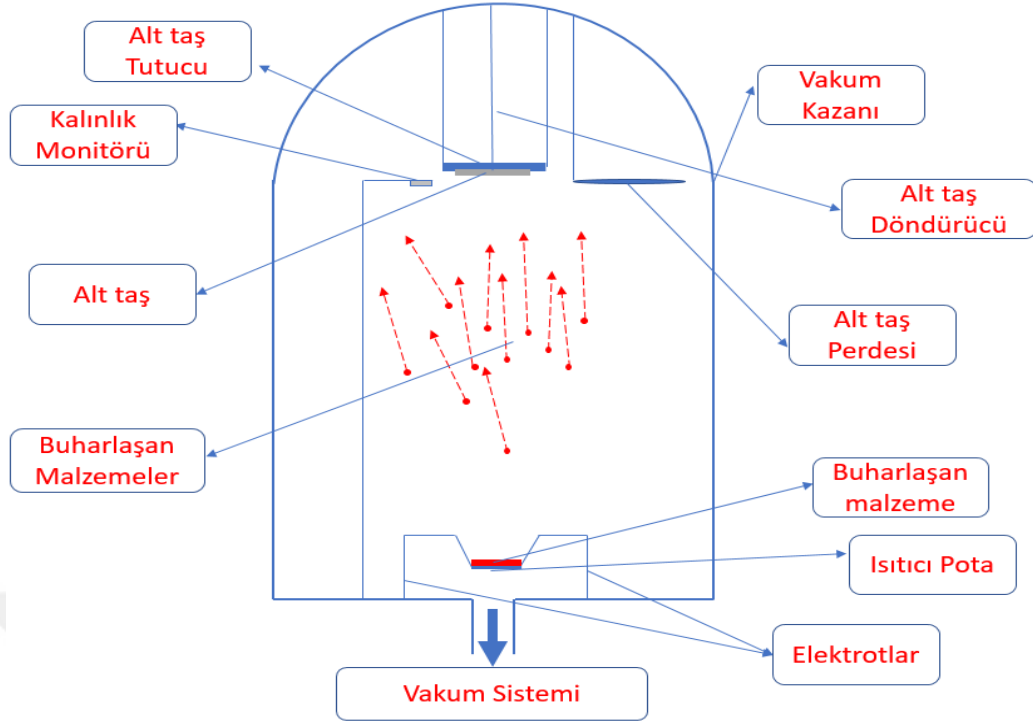


Şekil 3.2 NiO kristal yapısı[71]

3.3 Termal Buharlaştırma

Termal buharlaştırma sistemi temel olarak bir vakum kazanı, vakum sistemi (mekanik pompa, difüzyon pompası veya turbo moleküler pompa) alt-taş tutucu, yüksek akım güç kaynağı, termal buharlaştırma kaynağı (W, Mo, Ta, gibi), kalınlık ölçüm sistemi ve numune perdesi gibi kısımlardan oluşur. Kullanımı kolay ve ucuz bir yöntem olması, malzeme yüzeyine verdiği zararın az olması, yüksek saflık elde edilebilmesi gibi avantajları sayesinde bu yöntem çoğunlukla tercih edilmektedir.

Sistem, kaplanacak olan malzemeye uygun bir buharlaştırma kaynağı seçilip içerisine kaplama malzemesi yerleştirildikten sonra vakum kazanı kapatılarak önce içerideki hava vakum sistemi ile istenilen basınca kadar vakumlanır. Sistem basıncı istenilen seviyeye geldikten sonra güç kaynağı ile buharlaştırma kaynağı ısıtılmaya başlanır. Malzemenin buharlaşma sıcaklığına ulaşılan dek akım yavaş yavaş yükseltilir. Kaplama malzemesi buharlaşmaya başladığında kalınlık ölçüm sistemi malzeme biriktirme hızı ve toplam kalınlık ölçmeye başlar. Film kalınlığı istenilen değere ulaştığında güç kaynağından akım düşürülerek sıfırlanır. Böylece termal buharlaştırma ile ince film kaplanmış olur. Şekil 3.3. de termal buharlaştırma yapısı gösterilmiştir.



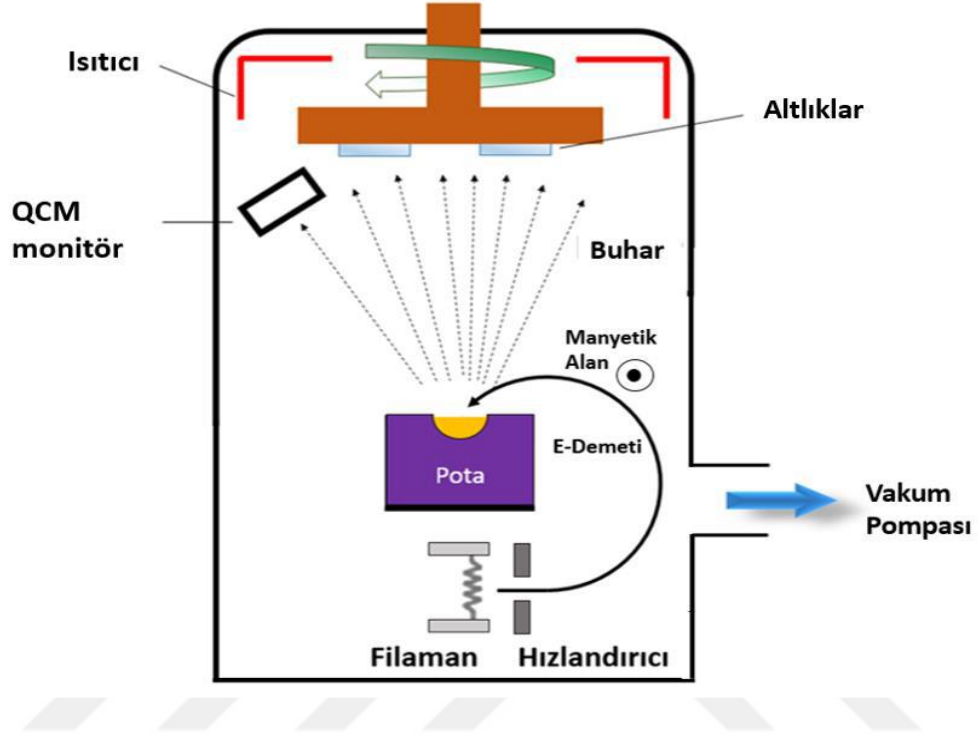
Şekil 3.3 Termal buharlaştırma sistemi gösterimi [72]

3.4 Elektron Demeti Buharlaştırma(E-BEAM)

E-Beam, yüksek erime noktasına sahip genellikle oksit formdaki malzemeleri, vakum altında elektronlar yardımıyla buharlaştırmak için kullanılan ince film kaplama yöntemidir. Bu yöntemle yüksek oranda kontrol edilebilme ve yüksek erime noktasına sahip metallerin kolayca buharlaştırılması sağlanmasıyla tercih edilmektedir. Bu yöntem alt katman malzeme üzerine ince filmler oluşturmak ve hedef malzemeleri doğrudan ısıtmak tekniğiyle kullanılır. 6000 °C'ye kadar ulaşılabilir ve neredeyse bütün yaygın malzemeler eritilebilir ve metal oksit, yarıiletken malzemeler katmanlar üzerine yüksek oranda biriktirilebilir. Bu yöntemde biriktirme hızı metaller için 1 $\mu\text{m/s}$ 'ye ulaşabilir [74]. Ancak bu hızlarda oluşan stres yüksek olacaktır. Bu sistemde malzeme, filaman kaynağında oluşturulan elektron demeti ile ısıılır, hızlandırılır ve sonra mıknatıs ve elektrostatik elektrik alan jeneratörü ile üretilen elektromanyetik alan ile malzemeye uygulanır. Elektron demeti ısıtma uygulamasında, fileman ısıtılmak için yüksek akıma maruz bırakılır. Bu ısıtılmayla filaman yüzeyinden elektron akışı yayılır. Bu elektronlar anotun ivmelenmesiyle hızlanıp manyetik merceğe yönlendirilir ve malzemeyi

eritmek üzere bambardıman etmeye odaklanır. Yüksek enerjili bambardıman malzemeyi buharlaştığı noktaya kadar ısıtır.

Şekil 3.4. de E-beam yapısı gösterilmiştir.

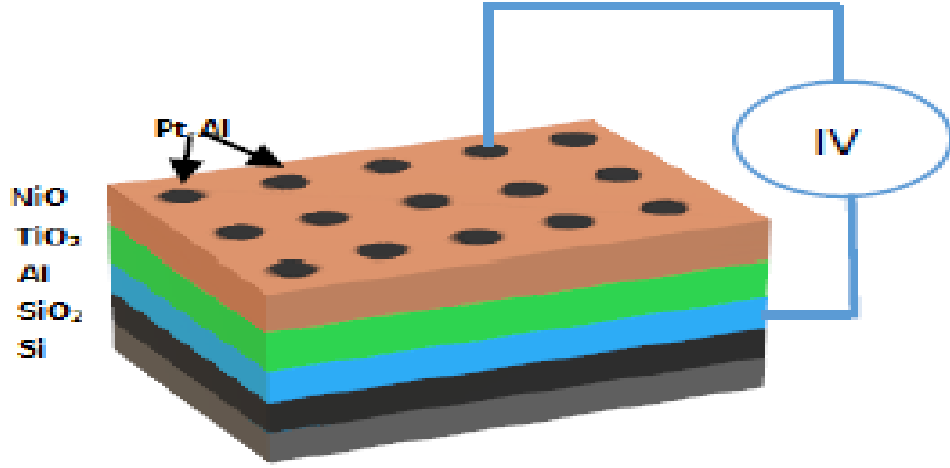


Şekil 3.4 E-Beam buharlaştırma sistemi gösterimi [73].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada alttaş malzemesi olarak tek tarafı parlatılmış Si malzeme kullanılmıştır. Si tabakası, standart Radio Corporation America temizleme işlemi izlenerek temizlendi. Daha sonra 1000°C'de ıslak oksidasyon prosesi ile koruyucu yalıtkan Silikon Dioksit tabakası kaplanmıştır. Daha sonra tüm SiO₂ yüzeyine termal buharlaştırma yöntemiyle Alüminyum (Al) eklendi. Al kaplamasında 99.95 % saflıkta 1-5 mm boyutlarında silindirik Al peletler kullanıldı. TiO₂ tabakası, Al yüzeyi üzerine elektron demet buharlaştırma (Vaksis E-beam evaporatör) sistemleri aracılığıyla büyütüldü. Film kaplama işlemi sırasında yüksek vakum alma işlemi gerçekleştirildi. Hedef malzeme olarak 1-5 mm boyutunda granüler 99.99 % saflıkta TiO₂ partikülleri kullanılmıştır. TiO₂ biriktirme işleminden sonra, PN heteroeklemi oluşturmak için ikinci yarı iletken NiO tabakası TiO₂ kaplı yüzey üzerine biriktirildi. Benzer şekilde 99.99 % saf ve 1-5 mm granüler NiO partikülleri p-tipi hedef materyal olarak kullanıldı. Daha sonra numune dört parçaya bölündü. Numunelerin bir parçası çökelmiş olarak ayrıldı. Diğerleri ayrı ayrı 300 °C, 420 °C ve 540 °C'de azot ortamında 120 dakika tavlansmıştır. Film yapısındaki değişiklikler X-ray Difraktometre (XRD) ile incelenirken, morfolojik evrimler Atomik Kuvvet Mikroskopisi (AFM, Nano-manyetik Enstrüman Ambient AFM) ile analiz edildi. Diyot yapısını tamamlamak için yapının NiO yüzeyine önce Alüminyum sonrasında ise çok ince bir Platinum (Pt) biriktirildi. Al-Pt kaplama işlemi termal buharlaştırma (termal evaporator) yöntemiyle gerçekleştirildi. Ön temas biriktirme sırasında, 1.0 mm çapında dairesel noktalara sahip bir gölge maskesi kullanıldı.

Tamamlanan heteroeklem diyot yapısı Şekil 4.1'de olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.1 Tamamlanan diyot yapısı

Omik tip kontak yapmak için n-tipi tabaka için kontak malzemesi olarak düşük iş fonksiyonlu Al, p-tipi tabaka için kontak malzemesi olarak yüksek iş fonksiyonlu Pt seçilmiştir [30]. Bu nedenle Pt-Al kaplaması termal buharlaştırma ile sadece ön yüze yapılmıştır. Heteroeklem diyotlarının akım-voltaj (I-V) ölçümleri Keithley 4200-SCS ile yapıldı. I-V ölçümleri ayrıntılı olarak analiz edildi ve mikroyapısal ve morfolojik evrimlerle olası korelasyonlar yorumlandı.

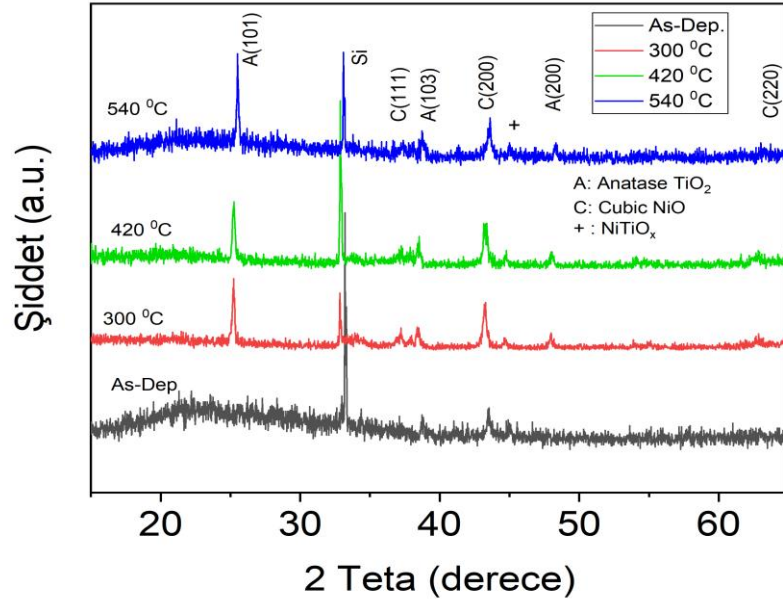
5. ÖLÇÜMLER, ANALİZLER VE TARTIŞMA

5.1 NiO/TiO₂ İnce Filmlerin Kristalografik Özellikleri ve SEM Görüntüsü

NiO/TiO₂ filmlerin kristal yapısı, faz tanımlaması ve ortalama tanecik boyutu XRD ölçümleri ile incelenmiştir. Elde edilen kristalografik kırınım düzlemleri, Şekil 5.1'de gösterilmiştir. XRD spektrumlarında gözlemlenen tepe noktaları, Uluslararası Kırınım Verileri Merkezi (ICDD) yazılımı kullanılarak tanımlanmıştır. Elde edilen pikler TiO₂'nin Anataz fazı (ICDD kart NO: 21-1272) ve NiO'nun kübik fazı (ICDD kart no: 71-1179) ile uyumludur. İndekslenen bu piklere bakıldığında, TiO₂ tabakasının tavlınmamış numuneler için neredeyse amorf bir formda olduğu görülmektedir. Yüksek sıcaklıkta tavlama sonrası kristal alanlar oluşmaya başlar ve (101) yönelimi TiO₂ için baskın hale gelir. Ayrıca, NiO fazının pik yoğunlukları, tavlınmamış numuneye kıyasla daha yüksek tavlama sıcaklıklarından sonra da artar. (200) oryantasyonu, NiO tabakasının kristalleşmesi için tercih edilen düzlemdir. Ayrıca, tavlama sıcaklığı arttıkça NiTiO_x'un kristalleşmiş fazı daha belirgin hale gelir. TiO₂ için (101) düzleminin ve NiO için (200) düzleminin en güçlü tepe noktalarının konumu ve genişleme değerleri, film yapısının tane boyutu değişimini değerlendirmek için kullanılmıştır. Tepe konumu Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1 NiO ve TiO₂ filmlerinin bazı kristalografik parametreleri

	Örnek	2 Teta (Derece)	FWHM (Derece)	Tanecik Boyutu (m)
TiO ₂	As	-	-	-
	300	25.33	0.193	4.22x 10 ⁻⁸
	420	25.26	0.205	3.97x 10 ⁻⁸
	540	25.49	0.134	6.07x 10 ⁻⁸
NiO	As	43.54	0.211	4.05x10 ⁻⁸
	300	43.32	0.300	2.85x10 ⁻⁸
	420	43.25	0.251	3.40x 10 ⁻⁸
	540	43.61	0.267	3.20x10 ⁻⁸



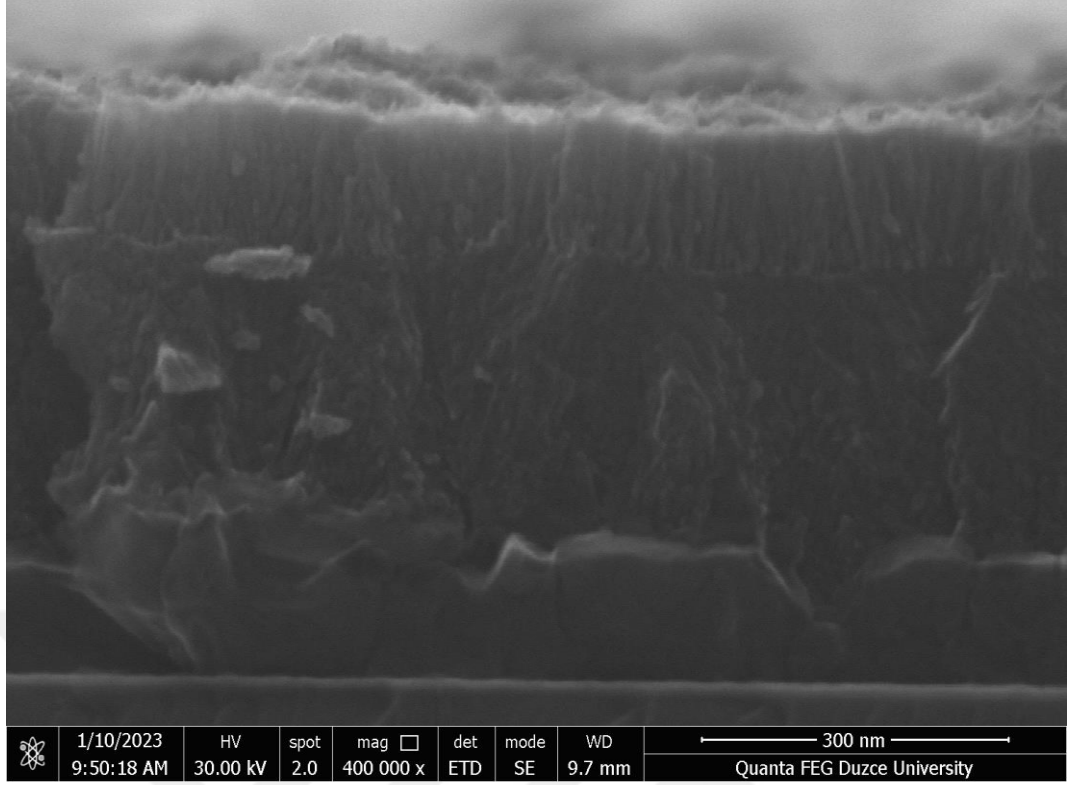
Şekil 5.1 Çeşitli tavlama sıcaklıklarından önce ve sonra n-NiO/p-TiO₂ filminin XRD ölçümleri

Ayrıca, pik genişleme değerleri kullanılarak, ortalama tanecik boyutu (P), Debye-Scherrer [31-33] denklemleri aracılığıyla hesaplandı, bu değer:

$$P = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos(\theta)} \quad (5.2)$$

burada β , TiO₂ için (101) düzleminin ve NiO için (200) düzleminin FWHM'sidir, λ ($= 1.54 \text{ \AA}$) dalga boyudur ve θ düzlemlerin tepe açılarıdır. Tane boyutu, muhtemelen küçük parçacıkların atomlar arası hareketinden kaynaklanan tavlama sıcaklığına bağlı olarak farklılıklar gösterir. Başka bir deyişle, yüksek tavlama sıcaklıklarında bireysel nanoyapılar yüksek termal enerji kazanır ve daha sonra daha büyük kümeler halinde birleşir [35]. Genel eğilim tanecik boyutunun tavlama sıcaklıkları ile artmasına karşın bazı sıcaklarda tanecik boyutunda küçülmeler gözükmemektedir. Bunun nedeni film yüzeylerinden genleşme çabasıdan oluşan stres değerleri olabilir.

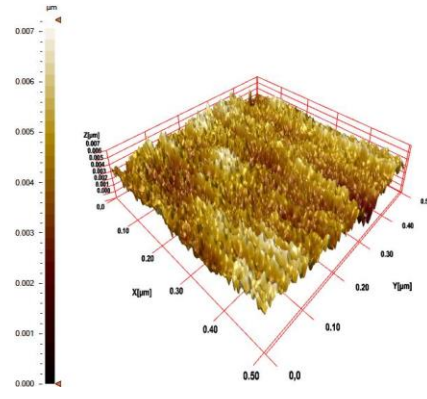
Oluşturulan katmanlı yapı SEM görüntüleme tekniğiyle incelenmiş ve katmanların oluşumu görülmüştür. Heteroeklem diyot yapısının SEM görüntüsü şekil 5.2'de verilmiştir.



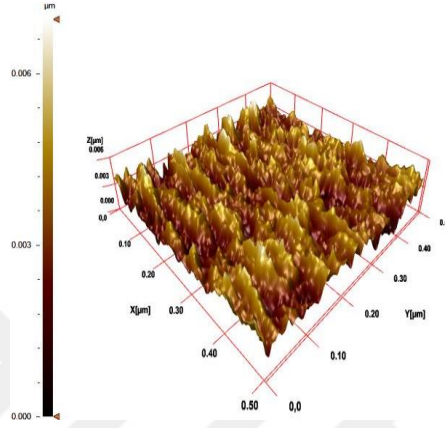
Şekil 5.2 Üretilen ince film heteroeklem yapının SEM görüntüsü

5.2 NiO/TiO₂ İnce Filmlerin Yüzey Morfolojisi

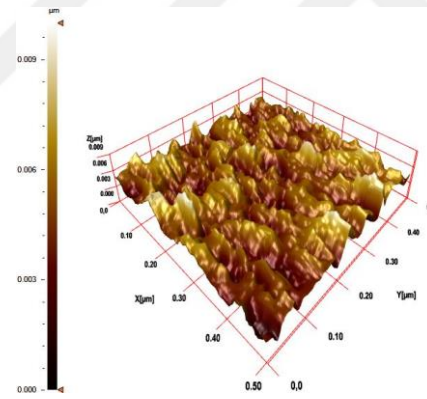
NiO/TiO₂ filmlerinin yüzey morfolojisi AFM ölçümleri ile incelenmiştir. Çeşitli tavlama sıcaklıklarından önce ve sonra ölçülen filmlerin AFM görüntüsü, Şekil 5.4.(a)-(d)'de gösterilmektedir.



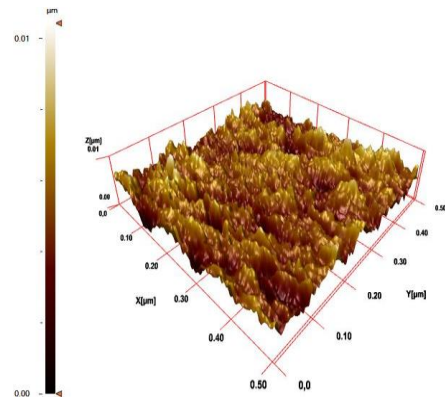
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.3 NiO/TiO₂ filmlerinin AFM görüntüsü a-) as- kaplamalı, b-) 300°C, c-) 420°C ve d-) 540°C tavllanmış numuneler için.

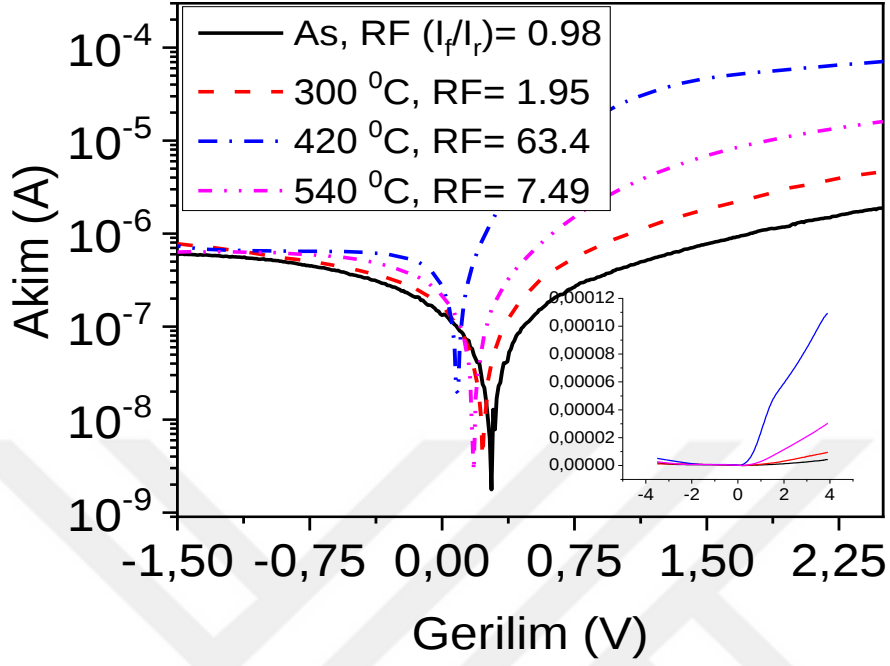
Yüzeylerinde germe/çekme kuvvetlerinin yüzey morfolojisini bozduğunu gösteren herhangi bir iğne deliği ve çatlak gözlemlenmemiştir [17]. Ancak filmlerin tavlama işleminden sonra yüzey morfolojisi değişmiştir. 420°C'ye kadar filmlerin yüzey topografyası düz veya sert dalgalıdır. Sıcaklık 420°C veya üzerine ulaştığında, AFM görüntüsünde nano-tane oluşumu açıkça görülmüştür. Yüzey morfolojisindeki bu değişim, NiO'in ve özellikle TiO₂'nin kristalleşme derecesindeki değişimlerle açıklanabilir. 420°C tavlama işleminin altında, TiO₂ tabakası neredeyse amoftur veya zayıf bir şekilde kristalleşmişti (bkz. Şekil 5.1'deki XRD). 420°C'de ve daha yüksek tavlama sıcaklığında TiO₂ nispeten iyi kristalleşmiştir ve NiO'in kristalleşme derecesindeki değişimlerle birlikte yüzey morfolojisi değişmiştir. AFM topografyası, özellikle 420°C ve 540°C tavlama işleminden sonra filmler için pürüzlü, homojen ve kompakt yüzeyi ortaya koymaktadır. Filmlerin RMS yüzey pürüzlülüğü, tavlamanmamış, 300°C, 420°C ve 540°C'de tavllanmış filmler için sırasıyla 4.8 nm, 5.2 nm, 5.9 nm ve 4.2 nm olarak elde edildi. RMS değerindeki artışın nedenleri, yüksek sıcaklıklarda NiO ve TiO₂ tabakasının kristalleşme ve tane dağılımındaki değişimlere de bağlanabilir. Elde edilen RMS değerleri, daha önce yayınlanmış NiO/TiO₂ katmanları [46] ile uyumludur ve bu çalışmada kalın biriktirilmiş NiO ve TiO₂ çift katmanları için de daha iyidir [6,47].

5.3 NiO/TiO₂ PN Heteroeklem Diyotlarının Elektriksel

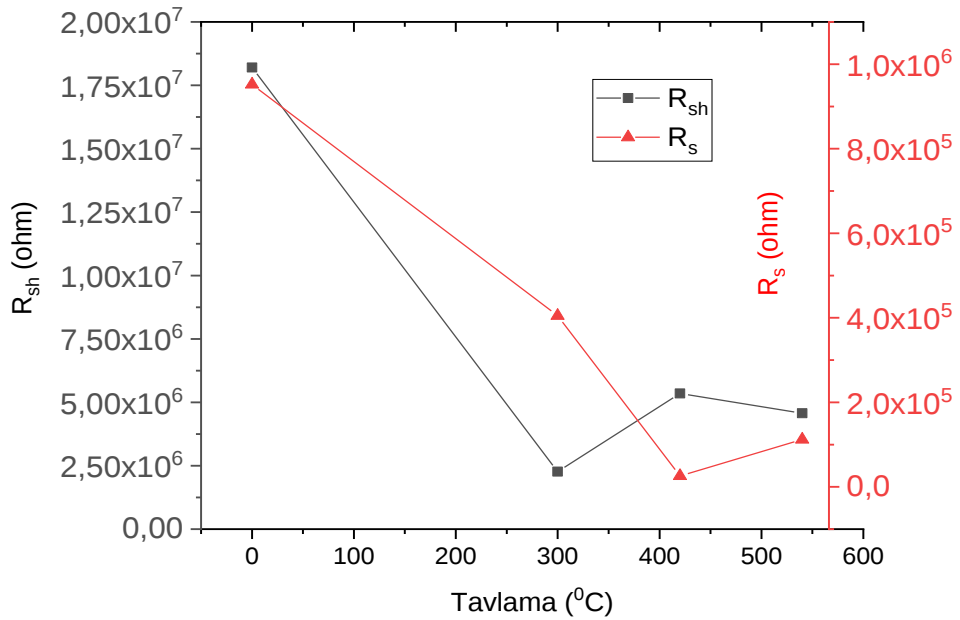
Özellikleri

Heteroeklem diyotların akım voltajı (I-V) özellikleri, Şekil 5.4 (a)'da gösterilmektedir. Tavlama işleminden sonra diyotların mevcut özellikleri önemli ölçüde değişti. Heteroeklem diyotun açma voltajı (V_{on}), birikmiş diyot için yaklaşık 0.30 Volt'tur. Tavlama işlemi sayesinde açma gerilimleri sıfır volta yaklaşır ve 420°C tavlama işleminden sonra neredeyse sabit kalır. Diyotlar için gözlenen yüksek açma gerilimleri, oksitin yüksek tuzak yoğunluğuna ve/veya taşıyıcıların diyot yapısında hapsediği ara yüzey safsızlıklarına bağlanabilir [48]. Ek olarak, heteroeklem diyotların doğrultma oranları (RF), aynı mutlak voltajda ileri (I_f) / ters (I_r) akım oranından ($RF = I_f/I_r$) hesaplanır. ± 1.25 V'de hesaplanan RF değerleri Tablo 5.2'de listelenmiştir. Tavlamanmamış ve 300 °C tavllanmış diyotlar neredeyse omik tipi davranış sergilemiştir, dolayısıyla bu iki diyot yapısı için çok zayıf

doğrultma özellikleri gözlemlendi. Tavlama sıcaklığı 420°C'ye ulaştığında RF 63.4'e kadar yükseldiği görülmüştür.



(a)



(b)

Şekil 5.4 Diyotların elektriksel akım-gerilim ve tavlama sıcaklığına bağlı seri/şönt direnç karakteristikleri (b)

Tablo 5.2 p-NiO/n-TiO₂ PN diyotlarının hesaplanmış çeşitli elektriksel katsayıları

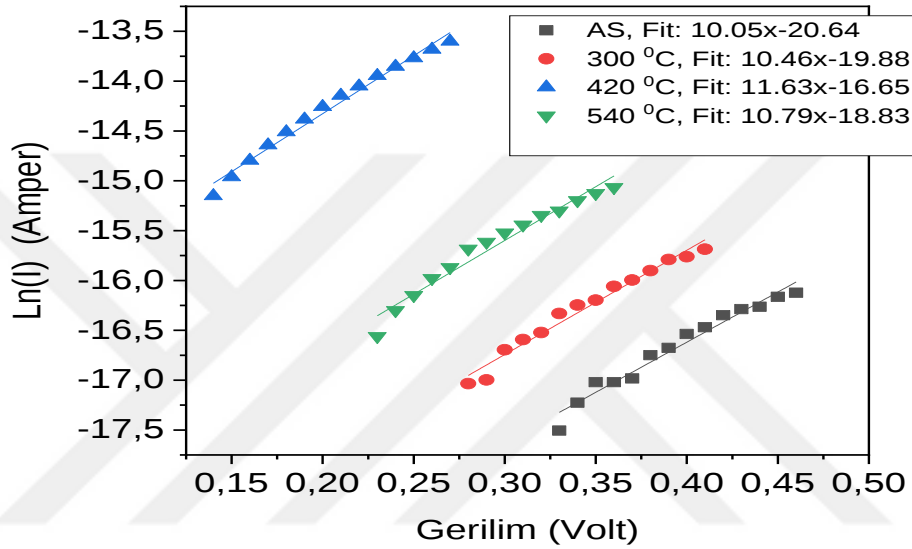
Örnek	I_f/I_r	R_s (k Ω)	R_{sh} (M Ω)	I_o (nA)	n	ϕ_b (eV)
As-dep	0.98	952	18.2	1.18	3.85	0.81
300	1.95	405	2.27	2.42	3.70	0.79
420	63.4	25.8	5.35	60.7	3.33	0.71
540	7.49	112	4.57	6.90	3.59	0.77

Araştırmacılar literatürde NiO/TiO₂ PN bağlantısı için $\pm 3V$ veya daha yüksek voltajlarda böyle iyi özelliklere ulaşmışlardır [6,22]. RF'deki gelişme NiO/TiO₂ bağlantısından kontaklara şarj enjeksiyonunun işlenmesi nedeniyle ara yüz tuzak yoğunluklarındaki azalma ile ilişkili olabilir [49]. Bunun yanı sıra, RF, I_f/I_r oranındaki I_f 'deki değişiklik nedeniyle voltaj değiştikçe değişir. Uygulanan voltaj kademeli olarak arttıkça RF'nin sürekli olarak artamayacağını not etmek gerekir. Gerilim bir sınıra ulaştığında (bu çalışmada 1.5 V'un üzerinde), seri direnç (R_s) parazitik etkilerinden [51] kaynaklanan ileri akımda [50] standart bükülme meydana gelir. Öte yandan, yüksek voltajlarda I_r 'deki ideal durumlardan olası sapma, temel olarak şönt direncinden (R_{sh}) kaynaklanıyordu.

R_s , diyot yarı iletkenlerinin toplu direncine ve metal-yarı iletken arasındaki ara yüze sıkı sıkıya bağlıdır, R_{sh} ise diyotların birleşimindeki kayıp akım ve yüzey kusurları ile ilişkilidir [48,52]. İdeal durumlarda diyot uygulamaları için düşük R_s değeri ve yüksek R_{sh} değerleri kabul edilmektedir. R_s ve R_{sh} değerleri, I-V eğrilerinin eğiminden hesaplandı. R_s ve R_{sh} değerleri Tablo 5.2'de tablolandırılmıştır ve dağılımları Şekil 5.3 (b)'de gösterilmektedir. Tavlama ile birlikte ilkine kıyasla R_s değerleri sert ve R_{sh} değerleri yavaş yavaş azalmıştır. R_{sh} değerindeki bu yavaş düşüş, her iki diyot malzemesinin sızıntı yolu görevi görebilecek kristalleşme ve tanecik oluşumundan kaynaklanıyor olabilir. 420°C tavlama işleminden sonra elde edilen R_s ve R_{sh} değerleri mikroelektronikte kullanılan diyotlarla kıyasla farklılık sergilemesine karşın kabul edilebilir düzeydedir [15,17,53].

Diyotların ileri akımı, Termiyonik emisyon (TE) modelindeki denklem ile simüle edilebilir [54,55]. I-V eğrileri üzerindeki R_s etkilerini ortadan kaldırmak için

alçak gerilim rejimleri seçilmiştir. Ayrıca akım karakteristiğine ters akım katkısını ortadan kaldırmak için akım eğrilerinin $V > V_{on} + 3kT/q$ koşulunda lineer kısmı kullanılmıştır [56-58]. Bu nedenle, doğru diyot parametrelerini hesaplamak için özel voltaj rejimleri seçilmelidir. Diyotların $\ln(I)$ -V karakteristikleri Şekil 5.4'de gösterilmektedir. V_{on} 'daki değişimler nedeniyle, akımın doğrusal kısmı farklı voltajlar sergiler. Şekil 5.4'de görülen Fit fonksiyonu verileri I_0 , n ve ϕ_b değerlerini hesaplamak için (2.8)-(2.11) denklemleri kullanıldı.



Şekil 5.5 NiO/TiO₂ heteroeklem diyotları için $\ln(I)$ -V grafiği

Diyotların I_0 değeri, ters voltaj rejimlerinde azınlık taşıyıcı akışı ile ilişkilidir. I_0 değerleri, tavlama sıcaklıklarındaki artışlarla yükselme eğilimindedir. Tane sınırlarının yük taşıyıcılar için yollar sağlayabildiği bilinmektedir. Taşıyıcılar bu yol üzerinden akabilir [59]. Yüksek sıcaklıkta tavlamadan sonra tane oluşumu, XRD ve AFM ölçümünde açıkça görülmüştür. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda, özellikle 540°C'de, bu çalışmada Ti ve Ni atomlarının ara yüzey difüzyonu da heteroeklem özelliklerini bozabilir [30]. Dolayısıyla, I_0 'daki düşüş, TiO₂ ve NiO katmanlarının ideal yerlerini terk ederek olası kristal kusurları oluşturmamasından kaynaklanabilir. Oluşan yeni kusurlar safsızlık saçılmalarına neden olarak I_0 değerinde azalmaya neden olabilir. Öte yandan idealite faktörü n , akım akışlarının saf TE modeline uyup uymadığını belirlemek için iyi bir göstergedir. Saf TE iletim modeli için n bir olmalıdır. Bununla birlikte, son teknoloji uygulamalarda kullanılan diyotlar için n 'nin birden ikiye kadar değişebileceği yaygın olarak

görülmektedir [54,60-62]. n değerleri için ikiden yüksek değerler, iletim mekanizmasına TE modeli yerine tünel açma veya uzay yükü gibi ek üretim/rekombinasyon merkezlerinin hakim olduğunu gösterir [51,63]. Tavlama sıcaklığı 420°C'ye kadar yükseldikçe, n değerleri 3.33'e kadar düşmektedir. Tavlanmamış numune için bu değer 3.85 olduğu düşünüldüğünde akım iletim mekanizmasında tavlama ile birlikte gelişim olduğu gözlemlenmektedir. Tavlama sıcaklığındaki daha fazla artış, n değerinde artışa neden olur. İdealite faktörünün yüksek değerinden büyük olasılıkla ara yüz kusurları ve engel yüksekliğinin homojen olmama durumları sorumlu olabilir [64,65]. Arayüz tabakasının aşırı oluşumu, kusur bölgelerinin sayısını üretebilir. Bu nedenle, 540°C tavlama işleminden sonra n değerlerindeki artış, NiTiO_x fazının aşırı oluşumuna bağlanabilir. Ayrıca, diyotların ϕ_b değeri tavlama sıcaklıklarına maruz kaldığında 0.81 eV'tan 0.71 eV'a düşmektedir. ϕ_b kesinlikle I_o 'ya bağlıdır. Dolayısıyla ϕ_b değerindeki düşüş, I_o 'daki değişimden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, ϕ_b değerleri, NiO/TiO₂ heteroeklemine odaklanan önceki çalışmalarda bildirilen değerlerle kıyaslanabilir düzeydedir [6,29].

6. SONUÇ

Bu yüksek lisans tezinde Al-Pt/p-NiO/n-TiO₂/ Al ince film tabanlı heteroeklem diyot yapısının termal tavlama yöntemiyle üretilmesi ve yapısal, morfolik ve elektriksel özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Heteroeklem diyot yapısı başarıyla üretilmiş ve farklı ölçüm çalışmaları yapılarak tavlama öncesi ve sonrasındaki sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre üretilen yapının sonraki çalışmalar için katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Tavlama ile birlikte NiO ve TiO₂ yapılarının kristalleşme oranlarının arttığı gözlemlenmiştir. Tanecik boyutlarındaki dalgalanmalar sıcaklık ile film üzerine oluşan yüksek stres değerlerinden olabilir. NiO ve özellikle TiO₂ tabakasının kristalleşmesi nedeniyle, NiO/TiO₂ filmlerinin yüzey pürüzlülüğü tavlama sıcaklığının artmasıyla değişmiştir. RMS değerleri 4.2 nm'den 5.9 nm'ye yükselir. Sıcaklıklar birlikte NiTiO_x'un kristal fazı da XRD spektrumlarında görülmüştür. Tavlama işlemi TiO ve NiO bağlarındaki kristal kusurları azalttığı düşüncesiyle R_s ve R_{sh} değerlerinin özellikle 420°C'ye kadar iyileştiği sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, NiTiO_x fazının oluşumu, R_s ve R_{sh}'de değişikliklere neden olabilir. Ayrıca, TiO₂ ve NiO tabakasının kristalleşmesi nedeniyle tavlama sıcaklıklarındaki artışla I₀ değerleri bir miktar artmaktadır. 540 °C tavlama işleminden sonra I₀'daki düşüş, özellikle NiTiO_x fazının oluşumuna ve/veya Ni ve Ti'nin olası ara yüzey difüzyonuna bağlanabilir. Benzer şekilde, idealite faktörü 540 °C tavlama işleminden sonra anormal bir şekilde 3.59'ya yükselir. 420°C tavlama işleminden sonra en iyi n değeri 3.33 olarak elde edilmiştir. Bu çalışmada en iyi değer olmasına karşın ideal sadece termoiyonik emisyon iletimi için yüksektir. Bu nedenle yapıda tuzak iletim mekanizmalarının varlığının da bulunduğu sonucuna varılmıştır. Öte yandan, I₀ üzerindeki değişimler nedeniyle tavlama sıcaklığının artmasıyla ϕ_b değeri 0.81 eV'tan 0.71 eV'a düşmektedir.

Bu mevcut sonuçlar, p-NiO/n-TiO₂ heteroeklem diyotunun yapısal, morfolojik ve elektriksel performansı arasında güçlü korelasyonlar olduğunu ve 420°C'nin diyot performansı için çalışma özelinde uygun tavlama sıcaklığı olduğunu göstermektedir.

7. KAYNAKLAR

(Bu tez çalışmasında Vancouver atıf sistemi kullanılmıştır.)

1. Ling C C, Guo T C, Lu W B, Xiong Y, Zhu L and Xue Q Z. Ultrahigh broadband photoresponse of SnO₂ nanoparticle thin film/SiO₂/p-Si heterojunction Nanoscale. 2017 **9** 8848-8857.
2. Mageshwari K, Han S and Park J. Fabrication and characterization of a CuO/ITO heterojunction with a graphene transparent electrode Semicond. Sci. Tech. 2016 **31** 055004.
3. Dey A. Semiconductor metal oxide gas sensors: A review Mater. Sci. Eng. B-Adv. 2018 **229** 206-217.
4. Nunes D, Pimentel A, Goncalves A, Pereira S, Branquinho R, Barquinha P, Fortunato E and Martins R. Metal oxide nanostructures for sensor applications Semicond. Sci. Tech. 2019 **34** 043001
5. Zhang Q B, Zhang K L, Xu D G, Yang G C, Huang H, Nie F D, Liu C M and Yang S H. CuO nanostructures: Synthesis, characterization, growth mechanisms, fundamental properties, and applications Prog. Mater. Sci. 2014 **60** 208-337
6. Cavas M, Gupta R K, Al-Ghamdi A A, Serbetci Z, Gafer Z H, El-Tantawy F and Yakuphanoglu F. Fabrication and electrical characterization of solution-processed all-oxide transparent NiO/TiO₂ p-n junction diode by sol-gel spin coating method J. Electroceram. 2013 **31** 260-264.
7. Li Z, Yao Z J, Haidry A A, Plecenik T, Xie L J, Sun L C and Fatima Q. Resistive-type hydrogen gas sensor based on TiO₂: A review Int. J. Hydrogen Energ. 2018 **43** 21114-21132.
8. Vinoth E and Gopalakrishnan N. Fabrication of interdigitated electrode (IDE) based ZnO sensors for room temperature ammonia detection J Alloy Compd 2020 **824** 153900.
9. Oztel S, Kaya S, Budak E and Yilmaz E. Influences of platinum doping concentrations and operation temperatures on oxygen sensitivity of Pt/SnO₂/Pt resistive gas sensors J. Mater. Sci.-Mater. El. 2019 **30** 14813-14821.
10. Somvanshi D, Pandey A and Jit S. Ultraviolet Detection Characteristics of Pd/n-ZnO Thin Film Schottky Photodiodes Grown on n-Si Substrates J. Nanoelectron. Optoe. 2013 **8** 349-354.
11. Tyagi M, Tomar M and Gupta V. Fabrication of an efficient GLAD-assisted p-NiO nanorod/n-ZnO thin film heterojunction UV photodiode J. Mater. Chem. C 2014 **2** 2387-2393.
12. Ukoba K O, Inambao F L and Eloka-Eboka A C. Fabrication of Affordable and Sustainable Solar Cells Using NiO/TiO₂ P-N Heterojunction Int. J. Photoenergy **2018** 6062390.
13. Pansri S, Supruangnet R, Nakajima H, Rattanasuporn S and Noothongkaew S. Band offset determination of p-NiO/n-TiO₂ heterojunctions for applications in high-performance UV photodetectors J. Mater. Sci. 2020 **55** 4332-4344.
14. Boutelala A, Bourfa F and Mahtali M. Effect of light on electrical and photoelectrical characteristics of Al/TiO₂/p-Si Schottky diode J. Mater. Sci.-Mater. El. 2020 **31** 11379-11389.
15. Thimsen E, Martinson A B F, Elam J W and Pellin M J. Energy Levels, Electronic Properties, and Rectification in Ultrathin p-NiO Films Synthesized by Atomic Layer Deposition J. Phys. Chem. C 2012 **116** 16830-16840.

16. Koca M, Kudas Z, Ekinici D and Aydogan S. Performance improvement of n-TiO₂/p-Si heterojunction by forming of n-TiO₂/polyphenylene/p-Si anisotype sandwich heterojunction *Mat. Sci. Semicon. Proc.* 2021 **121** 105436.
17. Kaya S. Nanostructure, optical and electrical properties of p-NiO/n-Si heterojunction diodes *Appl. Phys. A-Mater.* 2020 **126** 636.
18. Parida B, Kim S, Oh M, Jung S, Baek M, Ryou J H and Kim H. Nanostructured-NiO/Si heterojunction photodetector *Mat. Sci. Semicon. Proc.* 2017 **71** 29-34.
19. Molaei R, Bayati R and Narayan J. Crystallographic Characteristics and p-Type to n-Type Transition in Epitaxial NiO Thin Film *Cryst. Growth. Des.* 2013 **13** 5459-5465.
20. Zhang D Z, Liu C Y, Xu R L, Yin B, Chen Y, Zhang X D, Gao F L and Ruan S P. The effect of self-depleting in UV photodetector based on simultaneously fabricated TiO₂/NiO pn heterojunction and Ni/Au composite electrode *Nanotechnology* 2017 **28** 365505.
21. Kim J H, Zhu K, Yan Y F, Perkins C L and Frank A J. Microstructure and Pseudocapacitive Properties of Electrodes Constructed of Oriented NiO-TiO₂ Nanotube Arrays *Nano Lett.* 2010 **10** 4099-4104.
22. Shi S B, Gao Y Y and Xu J P. Influence of electrode materials (Ag, Au) on NiO/TiO₂ heterojunction UV photodetectors *Optik* 2020 **224** 165705.
23. Nguyen T T, Patel M, Kim S, Mir R A, Yi J, Dao V A and Kim J. Transparent photovoltaic cells and self-powered photodetectors by TiO₂/NiO heterojunction *J. Power Sources* 2021 **481** 228865.
24. Imran H, Abdolkader T M and Butt N Z. Carrier-Selective NiO/Si and TiO₂/Si Contacts for Silicon Heterojunction Solar Cells *IEEE T. Electron. Dev.* 2016 **63** 3584-3590.
25. Chakraborty M, Bera K K, Mandal M, Ghorai K, Sepay N, Das M R, Chowdhury S R, Gayen A and Bhattacharya S K. Visible light assisted photo-electrocatalytic oxidation of methanol using low Pt content NiO-rutile TiO₂ ternary heterojunction *Appl. Surf. Sci.* 2021 **541** 148450.
26. Wang H Q, Gong Q H, Huang H, Gao T T, Yuan Z W and Zhou G W. P-n heterostructured TiO₂/NiO double-shelled hollow spheres for the photocatalytic degradation of papermaking wastewater *Mater. Res. Bull.* 2018 **107** 397-406
27. Chen J, Wang M G, Han J and Guo R. TiO₂ nanosheet/NiO nanorod hierarchical nanostructures: p-n heterojunctions towards efficient photocatalysis *J. Colloid. Interf. Sci.* 2020 **562** 313-321.
28. Cui H P, Li J C and Yuan H L. Bending effect on the resistive switching behavior of a NiO/TiO₂ p-n heterojunction *Rsc. Adv.* 2018 **8** 19861-19867.
29. Ibupoto Z H, Abbasi M A, Liu X, AlSalhi M S and Willander M. The Synthesis of NiO/TiO₂ Heterostructures and Their Valence Band Offset Determination *J. Nanomater.* 2014 928658.
30. Tuan T T A, Kuo D H, Saragih A D and Li G Z. Electrical properties of RF-sputtered Zn-doped GaN films and p-Zn-GaN/n-Si hetero junction diode with low leakage current of 10(-9) A and a high rectification ratio above 10(5) *Mater. Sci. Eng. B-Adv.* 2017 **222** 18-25.
31. Kaya S, Yilmaz E, Karacali H, Cetinkaya A O and Aktag A. Samarium oxide thin films deposited by reactive sputtering: Effects of sputtering power and substrate temperature on microstructure, morphology and electrical properties *Mat. Sci. Semicon. Proc.* 2015 **33** 42-48.
32. Manikandan K, Dhanuskodi S, Thomas A R, Maheswari N, Muralidharan G and Sastikumar D. Size-strain distribution analysis of SnO₂ nanoparticles and their multifunctional applications as fiber optic gas sensors, supercapacitors and optical limiters *Rsc. Adv.* 2016

33. Soykan U, Ozturk Sen B, Cetin S, Yahsi U and Tav C. A detailed survey for determination of the grafted semifluorinated acrylic compound effect on thermal, microstructural, free volume, mechanical and morphological features of HDPE J. Fluor. Chem. 2020 **233** 109511.
34. Mishra R K and Sahay P. Synthesis, characterization and alcohol sensing property of Zn-doped SnO₂ nanoparticles Ceram. Int. 2012 **38** 2295-2304.
35. Abubakar S, Kaya S, Aktag A and Yilmaz E. Yttrium oxide nanostructured thin films deposited by radio frequency sputtering: the annealing optimizations and correlations between structural, morphological, optical and electrical properties J. Mater. Sci.-Mater. El. 2017 **28** 13920-13927.
36. Wang J, Cheng L J, Li H, Liu F and Liu S J. Structure and microwave dielectric properties of epitaxial 0.7CaTiO₃-0.3NdAlO₃ dielectric thin films deposited by pulsed laser deposition Ceram. Int. 2019 **45** 8700-8706.
37. Tamboli A H, Chaugule A A, Sheikh F A, Chung W J and Kim H. Synthesis and application of CeO₂-NiO loaded TiO₂ nanofiber as novel catalyst for hydrogen production from sodium borohydride hydrolysis Energy 2015 **89** 568-575.
38. Hague F Z, Nandanwar R and Singh P. Evaluating photodegradation properties of anatase and rutile TiO₂ nanoparticles for organic compounds Optik 2017 **128** 191-200.
39. Magee J W, Palomino R M and White M G. Infrared Spectroscopy Investigation of Fe-Promoted Rh Catalysts Supported on Titania and Ceria for CO Hydrogenation Catal. Lett. 2016 **146** 1771-1779.
40. Allaedini G, Aminayi P and Tasirin S M. Structural properties and optical characterization of flower-like Mg doped NiO Aip. Adv. 2015 **5** 077161.
41. El-Kemary M, Nagy N and El-Mehasseb I. Nickel oxide nanoparticles: Synthesis and spectral studies of interactions with glucose Mat. Sci. Semicon. Proc. 2013 **16** 1747-1752.
42. Noor S, Sajjad S, Leghari S A K and Long M C. Energy harvesting for electrochemical OER and solar photocatalysis via dual functional GO/TiO₂-NiO nanocomposite J. Clean. Prod. 2020 **277** 123280.
43. Biju V and Khadar M A. Fourier transform infrared spectroscopy study of nanostructured nickel oxide Spectrochim. Acta. A 2003 **59** 121-134.
44. Qiao H X, Wei Z Q, Yang H, Zhu L and Yan X Y. Preparation and Characterization of NiO Nanoparticles by Anodic Arc Plasma Method J. Nanomater. 2009.
45. Zeid E F A, Ibrahim I A, Ali A M and Mohamedd W A A. The effect of CdO content on the crystal structure, surface morphology, optical properties and photocatalytic efficiency of p-NiO/n-CdO nanocomposite Results Phys. 2019 **12** 562-570.
46. Kumar A, Sanger A, Kumar A and Chandra R. Fast response ammonia sensors based on TiO₂ and NiO nanostructured bilayer thin films Rsc. Adv. 2016 **6** 77636-77643.
47. Chen J Z, Chen T H, Lai L W, Li P Y, Liu H W, Hong Y Y and Liu D S. Preparation and Characterization of Surface Photocatalytic Activity with NiO/TiO₂ Nanocomposite Structure Mater. 2015 **8** 4273-4286.
48. Kaya S and Yilmaz E. Effects of interfacial layer on the electrical properties of n-ZnO/p-Si heterojunction diodes between 260 and 340 K J. Mater. Sci.-Mater. El. 2019 **30** 12170-12179.
49. Ruzgar S. Enhancement of the electrical performance of TiO₂/p-Si heterojunction diode by Gadolinium doping Appl. Phys. A-Mater. 2020 **126** 770.
50. Soyulu M, Al-Sehemi A G, Kalam A, Al-Ghamdi A A, Dere A and Yakuphanoglu F. Dopant-

- induced photoresponsivity in coumarin-dye-sensitized nanowire NiO/p-Si heterojunction Mat. Sci. Semicon. Proc. 2020 **106** 104784.
51. Gullu H H, Yildiz D E, Kocyigit A and Yildirim M. Electrical properties of Al/PCBM:ZnO/p-Si heterojunction for photodiode application J. Alloy. Compd. 2020 **827** 154279.
 52. Acharya S, Bangera K V and Shivakumar G K. Conduction Mechanism in n-CdSe/p-ZnTe Heterojunction J. Electron. Mater. 2016 **45** 3324-3331.
 53. Tataroglu A, Ahmedova C, Barim G, Al-Sehemi A G, Karabulut A, Al-Ghamdi A A, Farooq W A and Yakuphanoglu F. Electronic and optoelectronic properties of Al/coumarin doped Pr₂Se₃-Ti₂Se/p-Si devices J. Mater. Sci.-Mater. El. 2018 **29** 12561-12572.
 54. Kaya S. Evolutions on surface chemistry, microstructure, morphology and electrical characteristics of SnO₂/p-Si heterojunction under various annealing parameters J. Alloy. Compd. 2019 **778** 889-899.
 55. Bayrakli O, Terlemozoglu M, Gullu H H and Parlak M. Deposition of CZTSe thin films and illumination effects on the device properties of Ag/n-Si/p-CZTSe/In heterostructure J. Alloy. Compd. 2017 **709** 337-343.
 56. Gullu H H, Yildiz D E, Surucu O B, Terlemozoglu M and Parlak M. Temperature dependence of electrical properties in In/Cu₂ZnSnTe₄/Si/Ag diodes B. Mater. Sci. 2019 **42** 45.
 57. Sze S M and Kwok K N, Physics of Semiconductor Devices, John Wiley & Sons, 2007.
 58. Gullu H H. Investigation of electrical properties of In/ZnIn₂Te₄/n-Si/Ag diode B. Mater. Sci. 2019 **42** 89.
 59. Yan K, Yao W Q, Zhao Y Y, Yang L P, Cao J L and Zhu Y F. Oxygen vacancy induced structure change and interface reaction in HfO₂ films on native SiO₂/Si substrate Appl. Surf. Sci. 2016 **390** 260-265.
 60. Budde M, Splith D, Mazzolini P, Tahraoui A, Feldl J, Ramsteiner M, von Wenckstern H, Grundmann M and Bierwagen O. SnO/beta-Ga₂O₃ vertical pn heterojunction diodes Appl. Phys. Lett. 2020 **117** 252106.
 61. Lapa H E, Kokce A, Aldemir D A and Ozdemir A F. The response of high barrier Schottky diodes to light illumination J. Mater. Sci.-Mater. El 2021 **32** 4448–4456.
 62. Vieira D H, Ozorio M D, Nogueira G L, Fugikawa-Santos L and Alves N. UV-photocurrent response of zinc oxide based devices: Application to ZnO/PEDOT:PSS hydrid Schottky diodes Mat. Sci. Semicon. Proc. 2021 **121** 105339.
 63. Sinha R, Roy N and Mandal T K. Growth of Carbon Dot-Decorated ZnO Nanorods on a Graphite-Coated Paper Substrate to Fabricate a Flexible and Self-Powered Schottky Diode for UV Detection Acs. Appl. Mater. Inter. 2020 **12** 33428-33438.
 64. Chebil W, Gokarna A, Fouzri A, Hamdaoui N, Nomenyo K and Lerondel G. Study of the growth time effect on the structural, morphological and electrical characteristics of ZnO/p-Si heterojunction diodes grown by sol-gel assisted chemical bath deposition method J. Alloy. Compd. 2019 **771** 448-455.
 65. Canbay C A, Tataroglu A, Dere A, Al-Ghamdi A and Yakuphanoglu F. A new shape memory alloy film/p-Si solar light four quadrant detector for solar tracking applications J. Alloy. Compd. 2016 **688** 762-768.
 66. Yacobi B G. An introduction to basic principles Kluwer Academic Publishers. sayfa 228 2002.
 67. Boylestad L R, Nashelsky L. Electronic devices and circuit theory 11. edition sayfa 12 Pearson 2009.

68. Biber M. Au/-Cu/n-GaAs Schottky kontaklarında anodik oksidasyon işleminin karakteristik diyet parametreleri üzerindeki etkileri , Doktora tezi E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü. 2000.
69. Schottky W, Spenke E. Wiss. Veröff. Siemens- Werken. 1939.
70. Özder C. Titanyumdioksitin polivinil alkol(PVA) esaslı biyobozunur kompozit filmlerin UV- Yaşlanma üzerine etkisi. Yüksek lisans tezi. K.S.İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü. 2016.
71. Durmuş M. Nikel oksit yapıların büyütülmesi ve kapasitif davranışlarının incelenmesi. Yüksek lisans tezi. Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 2019.
72. Sarsıcı S. ZnO/Si heteroeklem diyetlerin yapısal, elektriksel ve optik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 2018.
73. Evecan D. Elektron demeti buharlaştırma yöntemi ile hazırlanmış Tungsten oksit ince filmler üzerine detaylı bir çalışma: elektrokromik cihaz üretimi ve karakterizasyonları. doktora tezi İ.T.Ü. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü. 2022.
74. Lin Y, Xin C. Advanced nano deposition methods. Germany: Wiley-VCH. 2016.
75. Lu, X., Lv, X., Sun, Z., Zheng, Y. Nanocomposites of Poly (L-lactide) and Surface-Grafted TiO₂ Nanoparticles: Synthesis and Characterization. European Polymer Journal, 2008 44: 2476–2481.
76. Şam, E. D. Ürgen, M. Tepehan, F. Z. Chemistry Reviews, TiO₂ Fotokatalistleri 77, 347-414... *İTÜ Dergisi*, 2007 Cilt:6, Sayı:5-6, 81-92