



**ZnO/Si HETEROEKLEM DİYOTLARIN YAPISAL,
ELEKTRİKSEL VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Serhat SARSICI



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ZnO/Si HETEROEKLEM DİYOTLARIN YAPISAL, ELEKTRİKSEL VE
OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Serhat SARSICI

Doç. Dr. Sertan Kemal AKAY
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI

BURSA 2018
Her hakkı saklıdır.

TEZ ONAYI

Serhat SARSICI tarafından hazırlanan “ZnO/Si HETEROEKLEM DİYOTLARIN YAPISAL, ELEKTRİKSEL VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Sertan Kemal AKAY

Başkan : Doç. Dr. Sertan Kemal AKAY
Uludağ Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Ahmet PEKSÖZ
Uludağ Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı

Üye : Doç. Dr. Songül AKBULUT ÖZEN
Bursa Teknik Ü. Doğa Bilimleri, Mimarlık ve
Mühendislik Fakültesi, Fizik ve
Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü

K. Akay

A. Peksoz

S. Akbulut Özen

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Ali Bayram

Prof. Dr. Ali BAYRAM
Enstitü Müdürü
16 / 01 / 2018

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,

- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,

- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,

- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,

- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

16 / 01 / 2018
Serhat SARSICI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ZnO/Si HETEROEKLEM DİYOTLARIN YAPISAL, ELEKTRİKSEL VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Serhat SARSICI

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Sertan Kemal AKAY

Bu tez çalışmasında, Radyo Frekans Magnetron saçırma tekniği kullanılarak (100) kristal yönelimli p-tipi Silisyum üzerine ZnO ince film büyütülerek ZnO/Si hetero eklem diyot elde edilmiştir. Üretilen hetero eklem diyotun morfolojik analizi X-Işını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanılarak incelenmiştir. XRD sonuçları ZnO ince filmin kübik nano kristal yapıda olduğunu göstermiştir. AFM ve SEM analiz sonuçları ile filmin yaklaşık olarak 2 nm yüzey pürüzlülük değeri ile tüm yüzeyi kaplayan düzgün bir dağılım gösterdiği tespit edilmiştir. ZnO ince filmin optik karakterizasyonu cam alt taş üzerine kaplanan ZnO ince filmde ölçülmüştür. ZnO'nun yasak band aralığı 3,34 eV olarak hesaplanmıştır. Üretilen diyotun akım-voltaj ve kapasitans-voltaj ölçümleri gerçekleştirilerek yapının elektriksel parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar literatür ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, üretilen yapının fotovoltajik karakteristiği aydınlık akım-voltaj ölçümleri ile belirlenmeye çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: ZnO, p-Si, hetero eklem, ince film, elektriksel özellikler

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF THE STRUCTURAL, ELECTRICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF ZnO/Si HETEROJUNCTION DIODES

Serhat SARSICI

Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physic

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Sertan Kemal AKAY

In this thesis, a ZnO/Si heterojunction diode was produced by using the Radio Frequency (RF) Magnetron sputtering technique to deposit ZnO thin film on the p-type (100) Silicon wafer. The morphological properties of the fabricated heterojunction diode were investigated by the X-ray Diffraction (XRD) technique, the Scanning Electron Microscopy (SEM) and the Atomic Force Microscopy (AFM). XRD results showed that ZnO thin film was cubic with a nano crystalline structure. AFM and SEM analysis results showed that the film had a uniform distribution covering the entire surface with a surface roughness value of approximately 2 nm. The optical characterization of the ZnO thin film was measured from the ZnO thin film deposited on the glass substrate. The optical band gap value of the ZnO thin film was calculated to be 3,34 eV. The current-voltage and capacitance-voltage measurements of the fabricated diode were carried out to determine the electrical parameters of the structure. The obtained results were compared with literature. In addition, photovoltaic characterization of the fabricated structure was determined by current-voltage measurements.

Key Words: ZnO, p-type Si, heterojunction, thin film, electrical properties

TEŞEKKÜR

Danışman hocam Uludağ Üniversitesi Fizik Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. Sertan Kemal AKAY'a lisans eğitimimden bu zamana kadar her desteğe ihtiyaç duyduğumda bilgi birikimi ve tecrübeleri ile beni yönlendirerek doğru kararlar vermemi sağladığı, zorlu lisansüstü eğitim hayatımda karşıma çıkan her engelle nasıl başa çıkacağımı öğrettiği ve nasihatleri ile hayat koşullarına karşı nasıl dimdik duracağım konusunda bana yardımcı olduğu için çok teşekkür ederim.

Uludağ Üniversitesi Fizik Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Ahmet PEKSÖZ'e Lisansüstü eğitimimde takıldığım yerlerde sorduğum her soruda bilgi birikimi, olumlu yaklaşımı ve farklı bakış açıları ile beni aydınlattığı ve öğrenmelerimi şekillendirdiği için teşekkür ederim.

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fizik Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Suat PAT'a laboratuvarının kapılarını vakit gözetmeden ardına kadar açtığı ve tüm deneyimlerini hiç tereddüt etmeden paylaştığı için teşekkür ederim.

Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Mehmet PARLAK'a deneysel ölçülerimiz sırasında laboratuvar imkanlarını sınırsız bir şekilde kullanmamıza imkân sağladığı için teşekkür ederim.

Doktora öğrencisi Hüseyin Kaan KAPLAN'a tüm çalışmalarımda, sanki kendi çalışmalarımıymış gibi hiç sıkılmadan ve desteğini hiç bırakmadan mükemmel bir çalışma arkadaşı olduğu için teşekkür ederim.

Kıymetli eşim Sezen Didem SARSICI'ya, bu süreçte her zaman yanımda olduğu için, her zor anımda bana moral kaynağı olduğu için ve bana destek olduğu için sonsuz teşekkür ederim.

Annem Yaşagül CERRAH SARSICI'ya, babam Fevzi SARSICI'ya, abim Mustafa SARSICI'ya ve kardeşim Mehmet Onur SARSICI'ya eğitim-öğretim hayatım boyunca bana her zaman güvendikleri ve bu yolda bana verdikleri desteklerini her zaman hissettirdikleri için teşekkür ederim.

Serhat SARSICI
16 / 01 / 2018

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL BİLGİLER	4
2.1. Elektriksel Özelliklerine Göre Malzemeler	4
2.1.1. İletkenler	4
2.1.2. Yalıtkanlar.....	5
2.1.3. Yarıiletkenler.....	5
2.1.3.1. Saf yarıiletkenler	5
2.1.3.2. Katkılı yarıiletkenler	7
2.2. PN Eklemleri	8
2.3. Hetero eklemler.....	11
2.4. Metal-Yarıiletken Kontaklar	12
2.5. Termiyonik Emisyon Teorisi	13
3. MATERYAL VE YÖNTEM	17
3.1. Kullanılan Materyaller	17
3.1.1. Silisyum	17
3.1.2. ZnO	18
3.2. Cihazın Üretim Aşamasında Kullanılan Yöntemler	18
3.2.1. Radyo Frekans Magnetron Saçtırma Yöntemi.....	18
3.2.2. Termal Buharlaştırma Yöntemi.....	21
3.3. Cihazın Üretimi.....	23
3.4. Ölçüm ve Analizler	26
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	27
4.1. Yapısal ve Morfolojik Analizler	27
4.2. Optik Analizler.....	30
4.3. Elektriksel Analizler.....	31
5. SONUÇ	39
KAYNAKLAR	40

ÖZGEÇMİŞ43



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
I	Akım şiddeti
V_o	Açık devre voltajı
N_A	Akseptör katkı yoğunluğu
Al	Alüminyum
ϵ_s	Alt-taş kırılma indisi
Å	Angström
Sb	Antimon
Cu	Bakır
ϕ_b	Bariyer yüksekliği
k	Boltzmann sabiti
m_h^*	Boşluk (hole) etkin kütlesi
Zn	Çinko
ZnO	Çinko Oksit
ZnS	Çinko Sülfür
λ	Dalga boyu
n	Diyot idealite faktörü
C	Diyot eklem kapasitansı
V_{bi}	Diyot yapı potansiyeli
N_D	Donor katkı yoğunluğu
η	Güç dönüşüm verimi
I_0	Doyma akımı
m_e^*	Elektron etkin kütlesi
eV	Eletronvolt
q	Elektron yükü
A	Etkin diyot alanı
ν	Fotonun frekansı
Cd	Kadmiyum
Se	Selenyum
I_{sc}	Kısa devre akımı
D	Kristal tane boyutu
Cr	Krom
S	Kükürt
μm	Mikrometre
mV	Milivolt
Mo	Molibden
T	Mutlak sıcaklık
nm	Nanometre
α	Optik soğurma katsayısı
h	Planck sabiti
O	Oksijen
A^*	Richardson sabiti
R_s	Seri direnç
T	Sıcaklık
V_{d0}	Sıfır besleme difüzyon potansiyeli

Si	Silisyum
Ta	Tantal
Te	Tellür
W	Tungsten
V	Besleme voltajı
β	Yarı maksimum tam genişliği
ϵ_{s2}	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
E_g	Yasak bant genişliği

Kısaltmalar

Açıklama

I-V	Akım – Voltaj
AC	Alternatif Akım
DI	De-İyonize
DC	Doğru Akım
HF	Hidrojen Florür
2B	İki Boyutlu
C-V	Kapasitans – Voltaj
NPA	Nano Gözenekli Sütun Yapı
nc-	Nano-Kristal
RF	Radyo Frekans
TB	Termal Buharlaştırma

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Periyodik tablonun 4A grubunda bulunan saf element yarıiletkenlerin kristal yapısının örnek gösterimi.....	7
Şekil 2.2.1.	4A grubu saf element yarıiletkene 5A grubu element katkı yapılarak elektron konsantrasyonunun artırılması.....	8
Şekil 2.2.2.	4A grubu saf element yarıiletkene 3A grubu element katkı yapılarak boşluk konsantrasyonunun artırılması.....	8
Şekil 2.3.	n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerin (a) eklem oluşmadan önce (b) eklem oluşuktan sonra enerji band diyagramları.....	9
Şekil 2.4.	p-n eklem için enerji band diyagramları: (soldaki) voltaj uygulanmamış, (ortadaki) doğru beslenmiş ve (sağdaki) ters beslenmiş.....	11
Şekil 3.1.	Radyo Frekans Magnetron saçtırma yönteminin genel şematik gösterimi.....	19
Şekil 3.2.	Radyo Frekans Magnetron saçtırma yöntemi ile gerçekleşen üretimin şematik gösterimi.....	21
Şekil 3.3.	Termal buharlaştırma sisteminin vakum kazanının şematik gösterimi.....	22
Şekil 3.4.	Ön ve arka kontak oluşturulurken kullanılan Vaksis PVD Handy 2 termal buharlaştırma sisteminin görüntüsü.....	24
Şekil 3.5.	ZnO ince filmin p-Si altaş üzerine büyütülmesinde kullanılan RF Magnetron saçtırma cihazının görüntüsü: (a) vakum kazanı (b) RF güç kaynağı.....	25
Şekil 4.1.	p-Si altaş üzerine büyütülmüş ZnO ince filmin XRD grafiği. Ek grafik (55-65)° aralığının detaylı grafiğidir.....	27
Şekil 4.2.	p-Si altaş üzerine RF Magnetron saçtırma ile büyütülmüş ZnO ince filmin SEM görüntüsü.....	28
Şekil 4.3.	p-Si altaş üzerine RF Magnetron saçtırma ile büyütülmüş ZnO ince filmin; a) 3-B AFM görüntüsü, b) AFM faz görüntüsü.....	29
Şekil 4.4.	Cam üzerine büyütülmüş ZnO ince filmin; a) dalga boyu – soğurma spektrumu, b) “ $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ ” grafiği.....	30

Şekil 4.5.	ZnO/p-Si hetero eklem diyotun oda sıcaklığında karanlık ve ışık altındaki akım – gerilim (I-V) grafiği.....	32
Şekil 4.6.	ZnO/p-Si hetero eklem diyotun oda sıcaklığında karanlık ve ışık altındaki yarı logaritmik akım – gerilim(lnI-V) grafiği.....	33
Şekil 4.7.	Oda sıcaklığında karanlık I-V ölçümünden elde edilen deneysel $dV/d(\ln I) - I$ ve $H(I) - I$ eğrileri.....	34
Şekil 4.8.	Al/ZnO/p-Si/Al hetero eklem diyotun oda sıcaklığında ters beslemede frekansa bağlı $1/C^2 - V$ grafiği.....	36



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Bazı saf element ve bileşik yarıiletkenler.....	6
Çizelge 2.2. Kontak davranışının iş fonksiyonlarına ve yarıiletkenin cinsine göre değişimi.....	13
Çizelge 3.1. Kristal Si'nin bazı özellikleri.....	17
Çizelge 3.2. ZnO'in bazı özellikleri.....	18
Çizelge 4.1. Al/ZnO/p-Si/Al hetero eklem diyotun oda sıcaklığındaki elektriksel parametreleri ve ilgili literatür verileri.....	35
Çizelge 4.2. Oda sıcaklığında frekansa bağlı C-V analizinden elde edilen cihaz parametreleri.....	37
Çizelge 4.3. Fotovoltaik cihaz parametrelerinin literatür verileri ile karşılaştırmalı listesi.....	38

1. GİRİŞ

Enerjiye ihtiyacın arttığı zamanımızda, yenilenemez enerji kaynaklarının tükenme endişesi ve doğaya verdiği zararın sonuçları her geçen gün aynı oranda artmaktadır. Gelişen teknoloji ve insan nüfusunun hızla arttığı, güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları, dünyanın ve özellikle bilim insanlarının dikkatini çekmektedir. Güneş enerjisi sistemleri ve elektronik devre elemanları üzerine çeşitli çalışmalar sonucunda bazı ürünler ortaya koyulsa da, maliyetinin fazla olması, enerji üretiminin bir evin ihtiyacını dahi karşılayamaması, güneş enerjisinden yüksek oranlarda faydalanılamaması ve elektronik devre elemanlarının yetersiz kalması gibi problemler ile karşı karşıyayız. Dolayısı ile bu problemlerin çözümü için bilim insanları birçok malzeme üzerinde çalışma gerçekleştiriyorlar. Gerçekleştirilen çalışmalar üretilen numunelerin özelliklerini belirlemede ve bu özelliklerin literatüre eklemesi ile hızlı elektronik devre elemanlarının üretilmesinde kullanılmaktadır. Çinko oksit bu aşama da sahneye çıkmaktadır. ZnO'in bazı özellikleri aşağıdaki gibidir. 1) Görünür bölgede yüksek geçirgenliğe sahip olması ve hatta çeşitli katkılamalar ile bu geçirgenliğin artırılabilmesi, 2) fononlar tarafından hemen iyonlaştırılan, enerji taşıyabilen fakat yük taşıyamayan eksitonların bağlanma enerjisinin daha yüksek olmasından dolayı enerji üretimi arttırması, 3) geniş ve direkt band aralığına sahip olması, 4) yüksek erime sıcaklığı ve yüksek kırılma voltajına sahip olması, 5) elektro manyetik radyasyona dayanıklı, kolay aşındırılabilir olması, 6) örgü sabitinin yüksek boyutlarda olmasının sonucu olarak kristal yapı uyumu göstermesi, 7) ısısal genleşme sorununun olmaması, diğer yarıiletkenlere göre kolay anlaşılabilir ve basit bir yapıya sahip olması, 8) ucuz olması ve zehirli etkilerinin olmamasıdır.

Çinko oksit, sensörler, spintronik aygıtlar, lüminesans uygulamaları, gaz algılama, biyomedikal optik, savunma sanayi, uzay araştırmaları ve nükleer santraller gibi birçok alanlarda da umut vadeden ve tercih edilen metal oksit yarıiletkenidir.

Romero ve ark. (2004), kimyasal sprey piroliz yöntemini kullanılarak ürettikleri n-ZnO/c-Si hetero eklemesinin elektriksel ve yapı özelliklerini incelemişlerdir. Hetero eklemesinin ara yüzeyinde veya yakınında kusurlar nedeniyle karmaşık bir davranış sergilediği sonucuna varmışlardır.

Keskenler ve ark. (2012), sol-jel döndürme tekniği ile oluşturdukları Ag/n-ZnO/p-Si/Al hetero eklem diyotun elektriksel, morfolojik ve optik özelliklerini incelemişlerdir. Hetero eklem diyotun iyi bir doğrultucu özellik gösterdiğini belirtmişlerdir. Üretilen yapının idealite faktörünü 2,03 ve engel yüksekliğini 0,71 eV olarak hesaplamışlardır.

Pietruszka ve ark. (2013), atomik katman depolama yöntemi kullanarak oluşturdukları ZnO/Si hetero eklem elektrik ve fotovoltaik özelliklerini incelemişlerdir. Ön ve arka kontak için alüminyum metalini tercih etmişler. ZnO ince filmler 600 nm'den 1600 nm'ye kadar farklı kalınlıklarda büyütülmüştür. En iyi sonuçlar 800 nm kalınlığında elde edilmiş ve güneş pili uygulamalarında önemli bir ölçüt olan verimliliği % 6 olarak belirlemişlerdir.

Samavati ve ark. (2015), farklı kalınlıklara sahip çinko oksit ince filmleri SiO₂ alt taş üzerine büyütmüşlerdir. XRD analizi ile tüm ince filmlerin altıgen kristal yapıya sahip olduğunu gözlemişlerdir. Ayrıca, UV spektroskopisi ile tüm filmlerin görünür bölgede % 80' den fazla optik geçirgenliğe sahip olduğunu ölçmüşlerdir. Yapılan analizlerde, 270 nm kalınlığa sahip yapının, % 95'e yakın geçirgenlik ve daha iyi fotoluminesans emisyonuna sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Böylelikle ayarlanabilir kalınlıklar ile çinko oksitin hetero yapılara temel oluşturabileceğini ileri sürmüşlerdir.

Bian ve ark. (2016), Radyo Frekans Magnetron saçırma yöntemi ile farklı konsantrasyonlara sahip Zr katkılı çinko oksit filmler üretmişlerdir. Konsantrasyon farkına bağlı olarak kristal yapının, ince filmin optik ve elektriksel özelliklerine etkisini incelemişlerdir. % 0,51 konsantrasyona sahip Zr katkılı ince filmlerde çok düşük direnç, daha yüksek foto duyarlılık ve daha homojen kristal yapı elde edildiğini gözlemlemişlerdir.

Muthukrishnan ve ark. (2016), sol-jel daldırma kaplama yöntemi ile hazırlanan çinko oksit ince filmlerin aseton algılama özellikleri incelemişlerdir. Üretilen yapıların, kristal özelliklerini XRD ve yüzey özelliklerini FESEM ile incelemişlerdir.

Oliveira ve ark. (2016), elektro depozisyon yöntemi ile iletken ve esnek bir yüzeye çinko oksit ince film biriktirilmişlerdir. Biriktirme işlemini değişen sıcaklığın (T), uygulanan biriktirme potansiyelinin (V), elektrolit çinko nitrat konsantrasyonunun (c) ve morfolojik parametrelerin etkisini takip ederek gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalar

sonucunda, maksimum film kalınlığının $\sim 5 \mu\text{m}$, $T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, $c = 0,1 \text{ M}$ ve $V = -1,5 \text{ V}$ da elde edilebileceğini göstermişlerdir.

Bu tez çalışmasında Radyo Frekans Magnetron yöntemi kullanılarak ZnO/Si hetero eklem yapı üretilmiştir. ZnO ince film yapının yüzey karakterizasyonu XRD, SEM ve AFM cihazları yardımıyla incelenmiştir. Akım-voltaj ve kapasitans-voltaj ölçümleri ile yapının elektriksel parametreleri belirlenmiştir.



2. KURAMSAL BİLGİLER

2.1. Elektriksel Özelliklerine Göre Malzemeler

Elektriksel iletim özellikleri açısından incelenen her malzemenin enerji band yapısı bir diğerinin enerji band yapısına göre farklılık gösterir. Birkaç atom bir araya geldiğinde enerjilerine göre daha yüksek veya daha düşük enerji seviyelerine ayrılarak doldurulacak orbitalleri oluştururlar ve bu orbitaller de elektronlar tarafından işgal edilir. İster element isterse bileşik olsun onları oluşturan atom sayısı arttıkça orbitallerin sayısı da gittikçe artacaktır. Bu artışın sonucunda orbitaller arasındaki etkileşim de artar ve keskin iki band şeklini alır. Bu bandların daha az işgal edilmiş durumu olan iletkenlik bandı (E_i), daha fazla işgal edilmiş durumu olan ise değerlik bandıdır (E_d). Malzemeler bu oluşan iki bandın arasındaki mesafenin değerine göre iletken, yalıtkan veya yarıiletken olarak adlandırılırlar (Sze 1981).

2.1.1. İletkenler

Herhangi bir atomun en dış yörüngesinde 1, 2 veya 3 tane elektron var ise bu elektronları atomun çekirdeğinden koparmak son yörüngesi daha dolu olan atomlara göre daha kolaydır. Örneğin bakır atomunun en dış yörüngesinde 1 tane elektron vardır ve çekirdek ile arasındaki bağ zayıf olduğundan bu elektron kolayca serbest hale gelebilir.

Bir iletkene gerilim uygulandığında, bu iletken elektrik akımını kolaylıkla iletir. Başka bir deyişle iletkenin uçlarına bir pilin artı (+) ve eksi (-) uçları gelecek şekilde bağlandığında, iletkenliği sağlayan yük taşıyıcıları olan elektronlar pilin eksi (-) ucundan çıkıp pilin artı (+) ucuna hareket etmeye başlarlar ve iletkenler için bu hareketin çok daha kolay olduğu olay elektrik akımının iletilmesidir.

2.1.2. Yalıtkanlar

En dış yörüngesindeki serbest elektron miktarı altıdan fazla olan maddelerin elektronları atom çekirdeğine sıkı sıkıya bağlı olduğundan elektrik akımını iletmezler. Bu malzemeler yalıtkan grubuna girerler. Buna rağmen her yalıtkan, belirli şartlar altında bir miktarda da olsa iletkenlik gösterir. Fakat bu iletkenliğin gerçekleşebilmesi için yüksek bir gerilime ihtiyaç vardır.

2.1.3. Yarıiletkenler

İletken ve yalıtkan arasında bir iletkenliğe sahip olan yarıiletkenlerin, yalıtkan ve iletkenlere göre elektriksel iletkenlik davranışı farklıdır. Mutlak sıfırda yalıtkan gibi davranan yarıiletkenlerin bu sıcaklık değerinde değerlik bandları tamamen doludur ve iletkenlerin aksine değerlik bandında serbest elektron bulunmaz. Ancak ısı, ışık, manyetik etki ile veya gerilim uygulanarak değerlik bandındaki elektronların bir kısmını serbest hale getirilebilir ve yarıiletkene iletkenlik özelliği kazandırabilir. Yarıiletken üzerindeki bu etki kaldırıldığında elektronlar tekrar eski haline döneceğinden, yarıiletkenin iletkenlik özelliği de ortadan kalkmış olacaktır (Hu 2009). Başka bir ifade ile de yarıiletkenler, mutlak sıfırdan farklı bir sıcaklık değerinde iletkenlik özelliği gösterirken, mutlak sıfırda iletkenlik özelliği göstermezler. Kristal yapı özelliğine de sahip olan yarıiletkenler elektronik devre elemanları olarak kullanılmalarından dolayı büyük bir öneme sahiptirler. Ayrıca yarıiletkenler katkı yapılarak veya bileşik halinde farklı iletkenlik özellikleri gösterdiklerinden dolayı çeşitli şekillerde kullanılmaktadırlar. Yarıiletkenleri saf, katkılı ve bileşik yarıiletkenler olarak inceleyebiliriz.

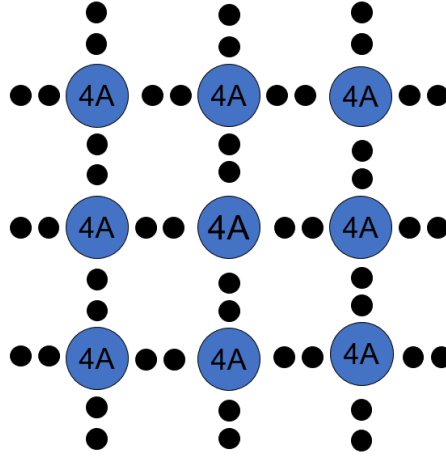
2.1.3.1. Saf yarıiletkenler

Saf yarıiletkenler element ve bileşik halinde bulunabilirler. Yarıiletkenlerde iletkenliği elektron ve boşluklar sağlar. Saf element yarıiletkenler de iletkenliği sağlayan elektron ve boşlukların sayısı birbirine eşittir. Ancak saf bileşik yarıiletkenlerde bu durum

değişebilmektedir. Bazı saf bileşik yarıiletkenlerde iletkenliğe katkıda bulunan çoğunlukla elektronlarken, bazılarında ise boşluklardır (Hu 2009). Elektrik ve elektronik uygulamalarda önemli bir yere sahip olan saf element ve bileşik yarıiletkenlerin bazıları Çizelge 2.1’de verilmiştir. Saf yarıiletkenler periyodik tablonun 4A grubunda yer alırlar ve son yörüngelerinde 4 değerlik elektronu bulunur. Bu yarıiletken atomunun son yörüngesindeki 4 değerlik elektronu, aynı cins başka bir atomunun 4 değerlik elektronuyla kovalent bağ yapar. Bu şekilde kristal yapıda yani yarıiletkende boşta hiçbir elektron kalmaz. Fakat çeşitli etkilerle değerlik bandındaki elektronlar iletkenlik bandına geçtiklerinde arkalarında negatif yük eksikliği olarak da adlandırılan boşluklar bırakmaktadır. Bu şekilde iletkenliğe elektronlar ve boşluklar aynı oranda katkı sağlamış olurlar. Saf element yarıiletkenlerin yapısı Şekil 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Bazı saf element ve bileşik yarıiletkenler (Sze 1981).

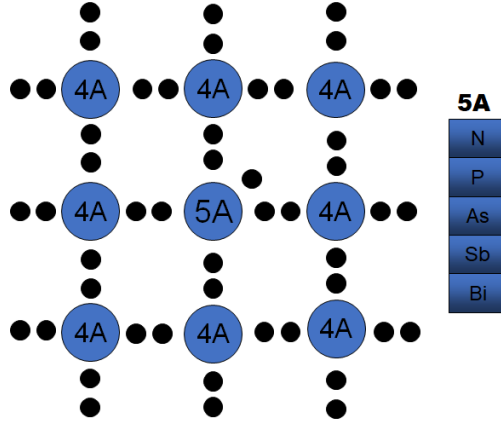
IV Elementleri	IV-VI Bileşikleri	III-V Bileşikleri	II-VI Bileşikleri	IV-VI Bileşikleri
Si	SiC	AlAs	CdS	PbS
Ge		AlSb	CdSe	PbTe
		BN	CdTe	
		GaAs	ZnS	
		GaP	ZnO	
		GaSb	ZnSe	
		InAs	ZnTe	
		InP		
		InSb		



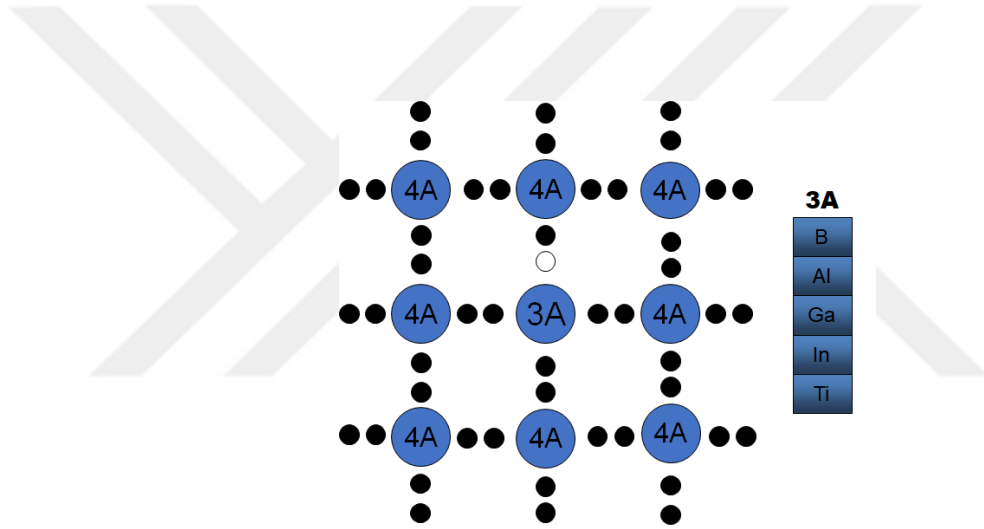
Şekil 2.1. Periyodik tablonun 4A grubunda bulunan saf yarıiletkenlerin kristal yapısının örnek gösterimi.

2.1.3.2. Katkılı yarıiletkenler

Saf yarıiletkenlere periyodik tablodaki bazı elementler katkı yapılarak elektron veya boşluk konsantrasyonu değiştirilebilmektedir. Bu şekilde elektron konsantrasyonunun artırılması ile boşlukların azınlık yük taşıyıcı olduğu, n-tipi yarıiletken elde edilirken benzer şekilde boşluk konsantrasyonunun artırılması ile elektronların azınlık yük taşıyıcı olduğu p-tipi yarıiletken elde edilmektedir (Sze 1981). Bu durum Silisyum veya Germanyum atomlarının katkı yapılan elementler ile yer değişmesi ile gerçekleşir. Eğer katkı yapılan atomun değerlik elektron sayısı 5 ise elektron konsantrasyonu artar iken, katkı yapılan atomun değerlik elektron sayısı 3 ise boşluk konsantrasyonu artmaktadır. 5A grubundaki element atomu 4A grubundaki element atomu ile yer değişince bir tane elektron serbest hale geçerek atomun etrafında dolanmaya ve bu şekilde bir etki durumunda iletkenliğe katkıda bulunmaktadır. Benzer şekilde 3A grubundaki element atomu 4A grubundaki element atomu ile yer değişince 1 tane elektron eksikliği oluşur. 3A ve 5A grubu elementleri ile oluşturulmuş katkılı yarıiletkenlerin şematik gösterimi Şekil 2.2.1. ve Şekil 2.2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2.1. 4A grubu saf element yarıiletkenine 5A grubu element katkı yapılarak elektron konsantrasyonunun artırılması.

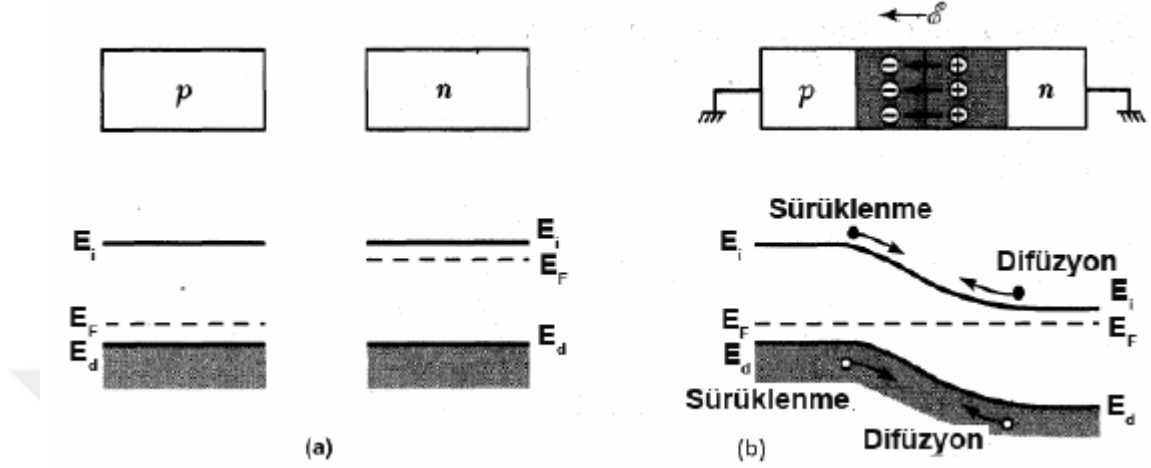


Şekil 2.2.2. 4A grubu saf element yarıiletkenine 3A grubu element katkı yapılarak boşluk konsantrasyonunun artırılması.

2.2. PN Eklemi

Çoğunluk yük taşıyıcısının boşluklar olduğu bir yarıiletken ile çoğunluk yük taşıyıcısının elektronlar olduğu yarıiletken birbiri ile kontak yapıldığında p-n eklem yapısı oluşur. Beslemenin kutuplarına bağlı olarak p-n eklem doğru beslenmesi durumunda voltajın artmasının sonucu olarak akım da eksponansiyel olarak artmaktadır. Benzer şekilde ters yönde voltaj değerinin artırılmasının sonucu olarak belli bir noktadan sonra akım aniden artmaktadır. Akımın birdenbire arttığı bu durum kırılma

noktasıdır. Modern elektronik uygulamalarında, p-n eklem önemli rol taşımaktadır. Elektronik devrelerinde daha çok anahtar ve doğrultucu olarak kullanılmaktadır (Sze 1981).



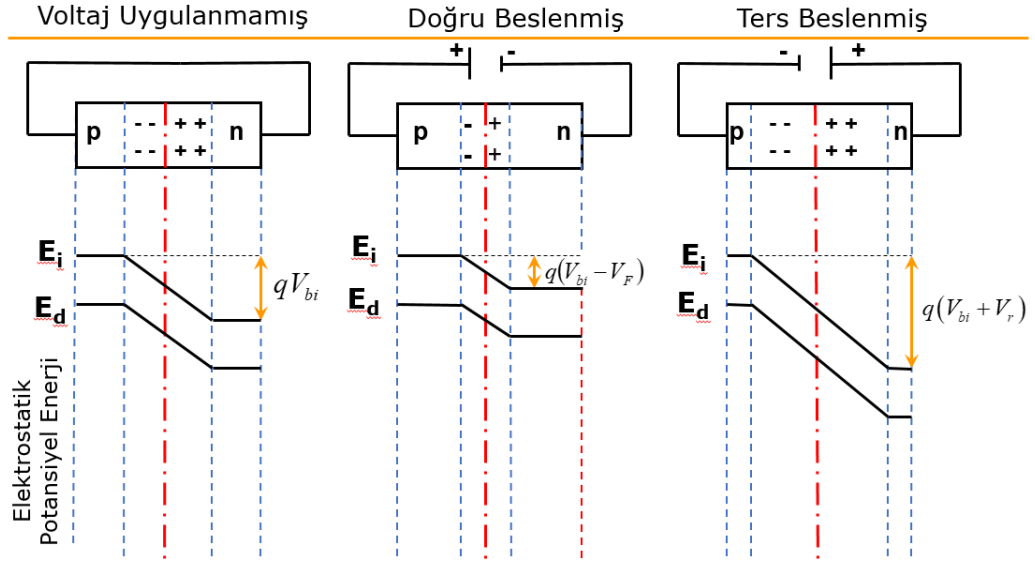
Şekil 2.3. n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerin (a) eklem oluşmadan önce (b) eklem oluşuktan sonra enerji band diyagramları (Sze 1981)

Şekil 2.3a'da n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerin eklem oluşturmadan önce enerji band diyagramları verilmiştir. n-tipi yarıiletkenden elektron konsantrasyonunun fazla olmasından dolayı Fermi seviyesi iletkenlik bandına daha yakinken, p-tipi yarıiletkende boşluk konsantrasyonunun fazla olmasından dolayı da Fermi seviyesi değerlik bandına daha yakındır. Şekil 2.3b'de ise çoğunluk taşıyıcıları farklı olan bu iki yarıiletkenin bir eklem oluşturmak için bir araya geldiği durumu göstermektedir. Bu durumda taşıyıcı yoğunluğu farkından oluşan difüzyon akımı oluşur. Başka bir ifade ile boşlukların fazla olduğu p-tipi yarıiletkenden boşluklar n-tipi yarıiletkene geçerken, benzer şekilde elektronların fazla olduğu n-tipi yarıiletkenden, p-tipi yarıiletkene de elektronlar geçmektedir. Elektronlar n bölgesinden ayrılırken arkalarında pozitif yüklü iyonlar ve boşluklar da p bölgesinden ayrılırken arkalarında negatif yüklü iyonlar bırakırlar ve bu şekilde yük bölgesi oluşur (Sze 1981). Difüzyon akımına zıt yönde olan elektrik alan, difüzyonun sona ermesi ile birlikte yük bölgesinin oluştuğu n-tipi yarıiletkenin tarafında p-tipi yarıiletkenin tarafına doğru bir elektrik alan oluşur. Bu esnada oluşan elektrik alan ile n-tipi bölgeden p-tipi bölgesine doğru boşluklar sürüklenirken, p-tipi bölgeden n-tipi

bölgeye de elektronlar sürüklenir. Elektrik alandan kaynaklanan bu durum sürüklenme akımı olarak bilinir ve sonuç olarak denge haline ulaşıldığında sürüklenme ve difüzyon akımlarının toplamının sıfır olması gerekir.

Eklemden uygulanan voltajın polarizasyonuna bağlı olarak yük bölgesinin durumu değişmektedir. Bu değişiklik denge halinde olması gereken difüzyon ve sürüklenme akımlarının birbirleri arasında net akımın sıfır olması durumunu etkileyecektir. p-tipi yarıiletken uygulanan voltajın pozitif ucuna bağlanması ile gerçekleşen doğru besleme, yük bölgesinde oluşan elektrostatik potansiyeli, uygulanan voltaj kadar azaltacaktır. Bu da elektrik alan değerini azaltacağından sürüklenme akımı difüzyon akımına kıyasla azalacaktır. Bu durumun sonucu olarak p-tipi bölgede bulunan çoğunluk taşıyıcılar yani boşluklar n-tipi bölgeye difüzyon ile geçmeye başlar ve benzer şekilde n-tipi bölgedeki çoğunluk taşıyıcı olan elektronlarda p-tipi bölgeye difüzyon ile geçmeye başlar (Sze 1981).

Farklı bir besleme durumu olarak p-tipi yarıiletkenin tarafına, voltajın negatif kutbu uygulanır ise bu duruma ters besleme durumu denir. Ters beslenen eklem yük bölgesinde elektrostatik potansiyel artar ve elektrik alanın şiddeti güçlenir. Bu durum ise eklem genişliğinin uygulanan voltaj değeri kadar genişlemesi ile sonuçlanır. Doğru besleme durumunun aksine, difüzyon akımı azalırken sürüklenme akımı artar ve az bir net akım gözlenir. Şekil 2.4’de bir p-n eklem voltaj uygulanmamış, doğru beslenmiş ve ters beslenmiş durumlarındaki enerji band diyagramları verilmiştir.



Şekil 2.4. p-n eklem için enerji band diyagramları: (soldaki) voltaj uygulanmamış, (ortadaki) doğru beslenmiş ve (sağdaki) ters beslenmiş.

2.3. Hetero eklemeler

Si ve ZnO veya Si ve ZnS gibi farklı iki yarıiletkenin birleşmesi ile oluşan eklemeler hetero eklem olarak bilinir. Hetero eklemeler iki farklı başlık altında incelenir. Bunlar anizotip hetero eklem ve izotip hetero eklemidir. Anizotip hetero eklemeler farklı tip yarıiletkenler olmaları ile birlikte çoğunluk yük taşıyıcıları da farklı olan yarıiletkenlerdir ve bu şekilde oluşan hetero eklemeler, p-n eklem yapısına benzerdir ve p-n veya n-p yapıdadır. İzotip hetero eklemeler ise anizotip hetero eklemelerin aksine çoğunluk yük taşıyıcıları aynı olan yarıiletkenlerin bir araya gelmesi ile oluşur. İzotip hetero eklemeler p-p veya n-n yapıdadır (Kaplan 2017).

Anizotip hetero eklemeler, azınlık yük taşıyıcı diyotlardır. İzotip hetero eklemeler ise anizotip hetero eklem diyotların aksine çoğunluk yük taşıyıcı diyotlardır. Schottky diyotlarda olduğu gibi azınlık yük taşıyıcılarından oluşan yük geçişi ihmal edilir. Başka bir ifade ile elektrik akımına katkıları ihmal edilebilir (Milnes ve Feucht 1972)

2.4. Metal-Yarıiletken Kontaklar

Bir metal ve bir yarıiletken kontak haline getirildiğinde termal dengenin bir sonucu olarak metal ve yarıiletkenin Fermi enerji seviyeleri eşitleninceye kadar yani aynı seviyeye gelinceye kadar yük alışverişi gerçekleşir. Bu şekilde metal ve yarıiletkenin aralarında herhangi bir yapı olmayacak şekilde birleştirilmesine metal-yarıiletken (MS) kontak adı verilir. MS kontaklar, bazen yüzey-engel-diyot olarak adlandırılırlar da genel olarak Schottky-engel diyot olarak bilinirler. Ayrıca kontak oluşturulurken kullanılacak metal gerektiği kadar yüksek saflıkta ve yarıiletkenin de yüzeyleri yeterince temiz olursa oluşturulan kontak ideal bir kontak olacaktır (Kwok 1995).

Metal-yarıiletken kontakların davranışlarını incelerken karşımıza iş fonksiyonu diye bir tanım çıkmaktadır. İş fonksiyonu (Φ), bir elektronu Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli minimum enerji miktarıdır. Yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi elektron veya boşluk katkısına göre değiştiği için iş fonksiyonu da değişmektedir. Vakum seviyesi elektronun metalden veya yarıiletkenden ayrılması ya da metalin veya yarıiletkenin dışındaki bir elektronun enerjisi gibi düşünülebilir. Fermi enerji seviyesi ise iletkenlik ve değerlik bandında bulunan taşıyıcıların konsantrasyonuna bağlı olarak değişen ve mutlak sıfırın altındaki şartlarda elektronların işgal ettiği en üst enerji düzeyi olan, daha yüksek sıcaklıklarda Fermi enerjisi durumunun işgal edilme olasılığı yüzde elliye düştüğü enerji olarak tanımlanır. Metal ve yarıiletkenlerin iş fonksiyonlarını birbirlerine göre incelediğimizde iki farklı davranış gözlemlenir. Bunlardan biri Schottky kontak ya da doğrultucu kontak olarak adlandırılan ve doğrultma özelliği olan kontaklardır diğeri ise omik kontak olarak adlandırılan ve doğrultma özelliği olmayan kontaklardır (Kwok 1995).

Omik kontaklarda metal ile yarıiletken arasında herhangi bir potansiyel engeli oluşmaz ve böylelikle metalden yarıiletkene veya yarıiletkenden metale yük taşıyıcıları hareket ederken hiçbir engelle karşılaşmadıkları için potansiyel azalması olmadan kolaylıkla birbirlerine doğru hareket ederler ve bu hareketleri uygulanan dış gerilimin doğru veya ters olmasından bağımsızdır.

Schottky kontaklar ise taşıyıcılarının hareketinin bir yönde diğerine göre daha fazla olduğu kontaklardır. Bu kontaklarda metal ile yarıiletken arasında potansiyel engeli

oluşur ve uygulanan gerilimin bir kısmı buraya harcanır. Akım ise doğru beslem altında çok iyi iletilir, fakat ters besleme altında yok denilecek kadar az iletilir. Φ_M metalin, Φ_S yarıiletkenin iş fonksiyonlarına ve yarıiletkenin cinsine bağlı olarak kontağın davranışı değişmektedir ve bu değişim Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Kontak davranışının iş fonksiyonlarına ve yarıiletkenin cinsine göre değişimi.

Kontak Türü	İş Fonksiyonlarının Durumu	Yarıiletkenin Cinsi
Doğrultucu	$\Phi_M > \Phi_S$	n-tipi
	$\Phi_M < \Phi_S$	p-tipi
Omik	$\Phi_M < \Phi_S$	n-tipi
	$\Phi_M > \Phi_S$	p-tipi

2.5. Termioyonik Emisyon Teorisi

Azınlık yük taşıyıcıların iletimi sağladığı p-n eklemlerin farklı olarak metal-yarıiletken kontaklarda akım iletimi, çoğunluk yük taşıyıcılar ile gerçekleşir.

Birçok akım-iletim teorisi olmak ile birlikte, bir doğrultucu yani Schottky kontak için, Si veya GaAs gibi mobilitesi yüksek olan yarıiletkenlerin akım-iletim mekanizmasını termioyonik emisyon teorisi en iyi açıklamaktadır.

Yeterli enerjiye sahip olan taşıyıcıların sıcak bir yüzeyden salınması, termioyonik emisyon demektir. Doğrultucu kontaklar için termioyonik emisyon tanımı; yeterli termal enerjiye sahip olan taşıyıcıların potansiyel engel üzerinden metalden yarıiletkene veya yarıiletkenden metale geçmesi termioyonik emisyon olayı olarak adlandırılır. Bethe (Rhoderick ve Williams 1988, Sze ve Kwok 2007) tarafından ortaya koyulan termioyonik emisyon modelinde, termioyonik emisyon metal/p-tipi yarıiletken kontaklarda boşluklar tarafından sağlanırken metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda elektronlar tarafından sağlanır. Termioyonik emisyon modelinde potansiyel engel yüksekliği ($q\Phi_B$), kT/q enerji değerinden çok büyüktür ve akım sadece engel

yüksekliğine bağlıdır ve dolayısı ile potansiyel engel eğiliminin biçimi önemsizdir. Doğrultma bölgesinde taşıyıcılar çarpışma yapmamaktadır. Buna bağlı olarak taşıyıcıların ortalama serbest yolları doğrultucu kontak bölgesinin kalınlığından daha büyüktür. Bu varsayımları yapan Bethe, potansiyel engelini geçmek için yeteri kadar enerjiye sahip, yarıiletkenden metale doğru akan elektronların akım yoğunluğu, elektronların konsantrasyonu $J_{s \rightarrow m}$ ve bunların hızı ile ifade edilir. $n(E)$, durum yoğunluğu enerji dağılım fonksiyonu olmak üzere (Kwok 1995);

$$n(E) = 4\pi \left(\frac{2m^*}{h^2} \right)^{3/2} \sqrt{E - E_i} \exp \left[\frac{-(E - E_F)}{kT} \right] \quad (2.1)$$

ile verilir. Burada; $E - E_i$ iletkenlik bandının üzerindeki enerjiler olup;

$$E - E_i = \frac{1}{2} m^* (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) \quad (2.2)$$

elektronun hız bileşenlerine ve etkin kütesine bağlı olarak verilir.

İletkenlik bandında bulunan elektronlardan sadece belli bir kinetik enerjiye sahip olanlar potansiyel engelini aşarak metale geçebilirler. Bu durumda yarıiletkenden metale geçecek olan elektroların akım yoğunluğu

$$J_{s \rightarrow m} = \int_{\frac{1}{2}m^*v_x^2}^{\infty} qv_x n(E) dE \quad (2.3)$$

Burada elektronun sadece x eksenin boyunca bileşeninin alınmasının sebebi sadece v_x bileşeninin akım ile aynı doğrultuda olmasıdır (Kwok 1995).

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi m^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left(\frac{-q\Phi_B}{kT} \right) \exp \left(\frac{qV_f}{kT} \right) \quad (2.4)$$

Denklem (2.3) yarıiletkenden metale doğru olan akım yoğunluğu $J_{s \rightarrow m}$ ifadesinin integrali alınırsa, metal/n-tipi kontaklarda yarıiletkenden metale geçen elektronlar için akım denklemi;

$$J_{s \rightarrow m} = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV_f}{kT}\right) \quad (2.5)$$

olarak bulunur. Denklem (2.4) m^* yük taşıyıcısının etkin kütlesi, h Planck sabiti, k Boltzmann sabiti ve etkin kütlenin bir fonksiyonu olan A^* Richardson sabiti:

$$A^* = \frac{4\pi m^* k^2}{h^3} \quad (2.6)$$

Metal tarafında engel yüksekliği aynı kalmasından dolayı metalden yarıiletkene doğru zıt yöndeki akım engel yüksekliği ile belirlenir.

$$J_{m \rightarrow s} = -A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \quad (2.7)$$

olarak elde edilir. Yarıiletkenden metale ve metalden yarıiletkene doğru olan toplam akım yoğunluğu, Denklem (2.5) ve Denklem (2.7) denklemlerinin toplanması ile

$$J_n = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_f}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.8)$$

olarak elde edilir.

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \quad (2.9)$$

Denklem (2.9) J_0 ile gösterilen doyum akım yoğunluğu $A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right)$ terimidir.

$$J_n = J_0 \left[\exp\left(\frac{qV_f}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.10)$$

şeklinde yazılabilir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kullanılan Materyaller

Çalışmada alt taş olarak (100) yöneliminde p-tipi silisyum alt taş kullanılmıştır. Hetero eklem n-tipi yarıiletkeni olarak %99.9999 saflıkta granül şeklinde ZnO kullanılmıştır. Hetero eklem yapmayı oluşturmak için ön ve arka kontak olarak alüminyum metali, p-tipi Si'nin mat yüzeyine ve p-tipi Si'nin diğer yüzeyine biriktirilen ZnO ince filmin üzerine oluşturuldu.

3.1.1. Silisyum

Elektrik ve elektronik sanayilerinde büyük ilgi gören silisyum, doğada oksijenden sonra en bol bulunan elementtir. Si, periyodik tablonun IV A grubunda bulunan dört değerlik elektronu olan bir ametaldir. Si hemen hemen bütün kayalarda, kum, kil ve topraklarda ya silisyum dioksit (SiO_2) ya da oksijen, alüminyum, magnezyum, kalsiyum, demir, sodyum, potasyum gibi başka elementlerle oluşturduğu silikatlar halinde bulunur. Günümüzde bu kadar çok tercih edilen malzemelerden biri olmasının sebebi ise doğada serbest halde bulunmamasına rağmen çeşitli yöntemlerle saf yarıiletken veya element yarıiletken çeşitleri olarak elde edilebilmesidir. Kristal Silisyumun bazı özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kristal Si'nin bazı özellikleri.

Yasak bant aralığı (E_g)	1.12 eV
Dielektrik sabiti	$11.9 \epsilon_0$
Kristal yapı	Kübik
Örgü sabitleri	$a=b=c=5.430$
Mobilite	$480 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ (300K)
İş fonksiyonu	4.60-4.85 eV

3.1.2. ZnO

İkili bileşik yarıiletkenlerden biriside, periyodik tablonun II-VI grup elementleri kendi aralarında oluşturdukları yarıiletkenlerdir. ZnO'ü oluşturan, çinko (Zn) II. grup elementi ve oksijen (O) ise VI. grup elementidir. ZnO doğal halde n-tipi yarıiletken özelliği gösteren bir bileşik yarıiletkenidir.

ZnO çeşitli özelliklerinden dolayı birçok çalışma alanında tercih edilmektedir. Bu özelliklerinden bazıları Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. ZnO'ün bazı özellikleri.

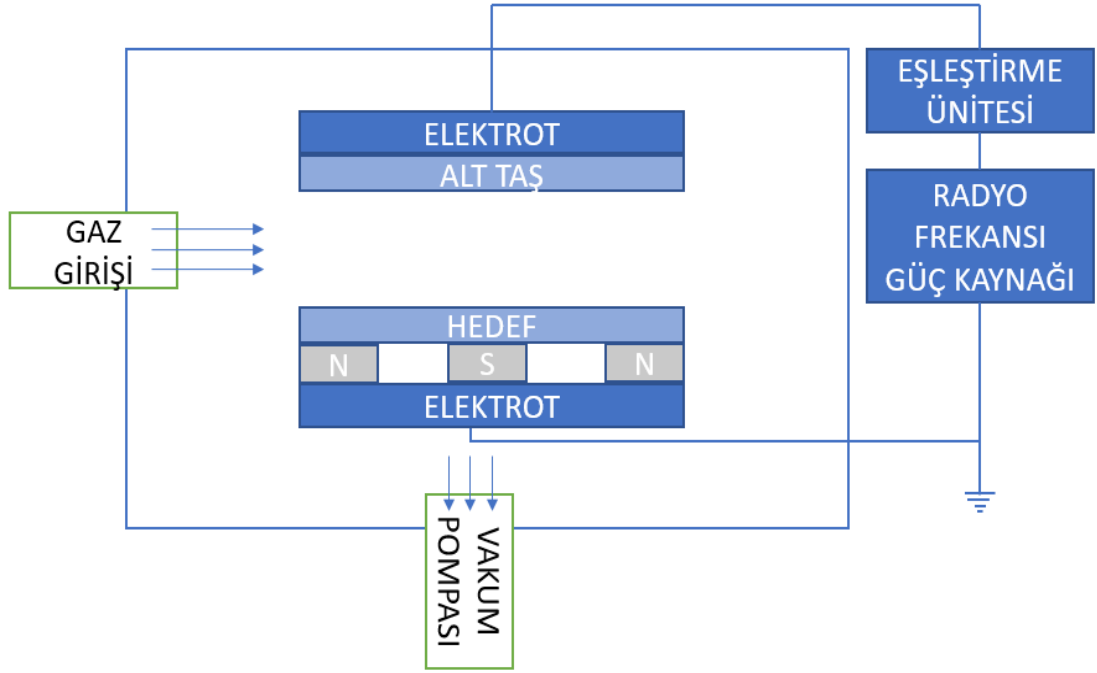
Yasak bant aralığı (E_g)	(3,1-3,4) eV
Dielektrik sabiti	$8,5\epsilon_0$
Kristal yapı	Vürtzit, kübik
Örgü sabitleri	$a = 3,24\text{Å}$, $c = 5,13\text{Å}$, $c/a = 1,60$
Mobilite	$5 - 50 \text{ cm}^2/Vs$ (300K)
Kırılma indisi	2,008-2,029
Erime sıcaklığı	1975 °C
Yoğunluk	$5,606 \text{ g/cm}^3$

3.2. Cihazın Üretim Aşamasında Kullanılan Yöntemler

3.2.1. Radyo Frekans Magnetron Saçırma Yöntemi

Radyo Frekans Magnetron saçırma yöntemi ile element ve bileşik yarıiletkenler, ferroelektrik bileşikler, oksitler ve ateşe dayanıklı camlar ve plastikler depolanabildiğinden yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Radyo Frekans Magnetron saçtırma yöntemi olarak kullanılan sistem; Radyo Frekans güç kaynağı, eşleştirme ünitesi, vakum odası ve vakum pompasından oluşur. Radyo Frekans Magnetron saçtırma sisteminin şematik gösterimi şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Radyo Frekans Magnetron saçtırma yönteminin genel şematik gösterimi.

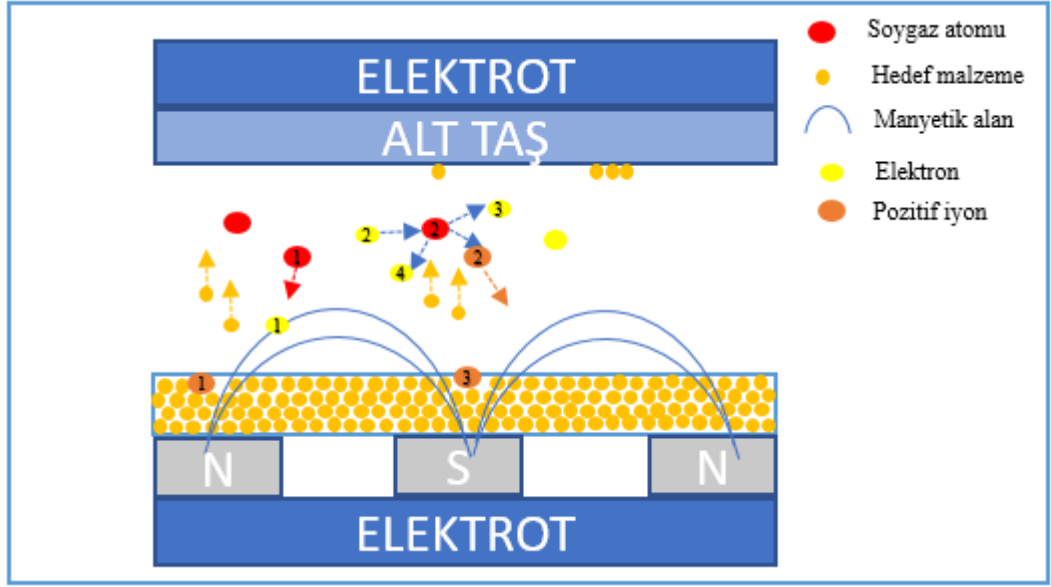
Vakum pompası; vakum odasının basınç değerlerini düşük tutmak amacıyla kullanılır. Düşük bir basınç değeri önemlidir. Çünkü basınç değeri ne kadar düşük olursa vakum içerisinde o kadar az yabancı atom var demektir ve bu durumun sonucu olarak da istenilmeyen gazlardan yüksek oranda temizlenmiş vakum odasında iyonize olmuş parçacıkların ortalama serbest yolunu arttırmış oluruz. Ortalama serbest yolunun artması sonucu ise iyonize olmuş atomlar daha az çarpışma yapacağından enerjilerini koruyarak istenilen çarpışmaları daha yüksek enerji ile gerçekleştireceklerdir. Böylelikle de gerçekleştirmek istediğimiz üretimin saflığı ve kalitesi arttırılabilir.

Vakum odası; negatif ve pozitif yüklü elektrotlar, mıknatıs, üzerine kaplanacak alt taşın ve kaplanacak olan hedef malzemenin konulduğu yerden oluşur. Elektrotlar elektrik alanının oluşması ve pozitif iyonların alt taş üzerine yönlendirilmesi ve hızlandırılması açısından öneme sahiptir. Ayrıca bir diğer öneme sahip olduğu nokta ise, hedef ile alt

taş elektrotlar arasına alternatif bir voltaj uygulanması ile voltaja bağlı olarak elektrotların hareketinin dönüşüme uğramasıdır. Negatif yüklü elektrotu anot ve pozitif yüklü elektrotu katot gibi düşünürsek, uygulanan alternatif voltaj anot-katot veya katot-anot dönüşümü sağlar bu da hedefin iyonlar tarafından bombardıman edilmesini yarım periyot aralığında gerçekleşmesine sebep olur. Sonuç olarak, yarım periyot aralığında yük birikmesi meydana gelirken diğer yarım periyot aralığında herhangi bir yük birikmesi meydana gelmez. Ayrıca mıknatıs ile oluşturulan manyetik alan sayesinde elektronların serbest hareket etmeleri engellenmiş ve dairesel bir yörüngede ilerlemeleri sağlanmış olur. Elektronların yolları uzadığından hareketleri sırasında daha çok çarpışma yaparak hedef üzerine bombardıman yapan iyon konsantrasyonunu arttırmaları. Dolayısıyla hedeften atom koparma işlemi hızlanır ve alt taş üzerine biriktirme işlemi de hızlandırılmış olur. Ayrıca çarpışmaların artmasının bir diğer sonucu da daha düşük basınç değerlerinde plazmanın oluşturulabilmesine imkân vermesidir.

Radyo Frekans güç kaynağı ve eşleştirme ünitesi; Radyo Frekans Magnetron saçtırma yönteminde frekans değeri 13.56 MHz'dir ve güç kaynağı ile elektromanyetik dalgalar oluşturulur. Oluşturulan bu dalgalar eşleştirme ünitesi sayesinde vakum odasına pompalanan soygazın plazmasının oluşturulmasında kullanılır. Bunun sonucu olarak da hal değiştirmiş soygaz atomları iyonize hale geçer ve hedefe yönleneren bombardıman ederler. Bombardıman sonucunda hedeften atomlar saçılarak alt taşla doğru ilerler.

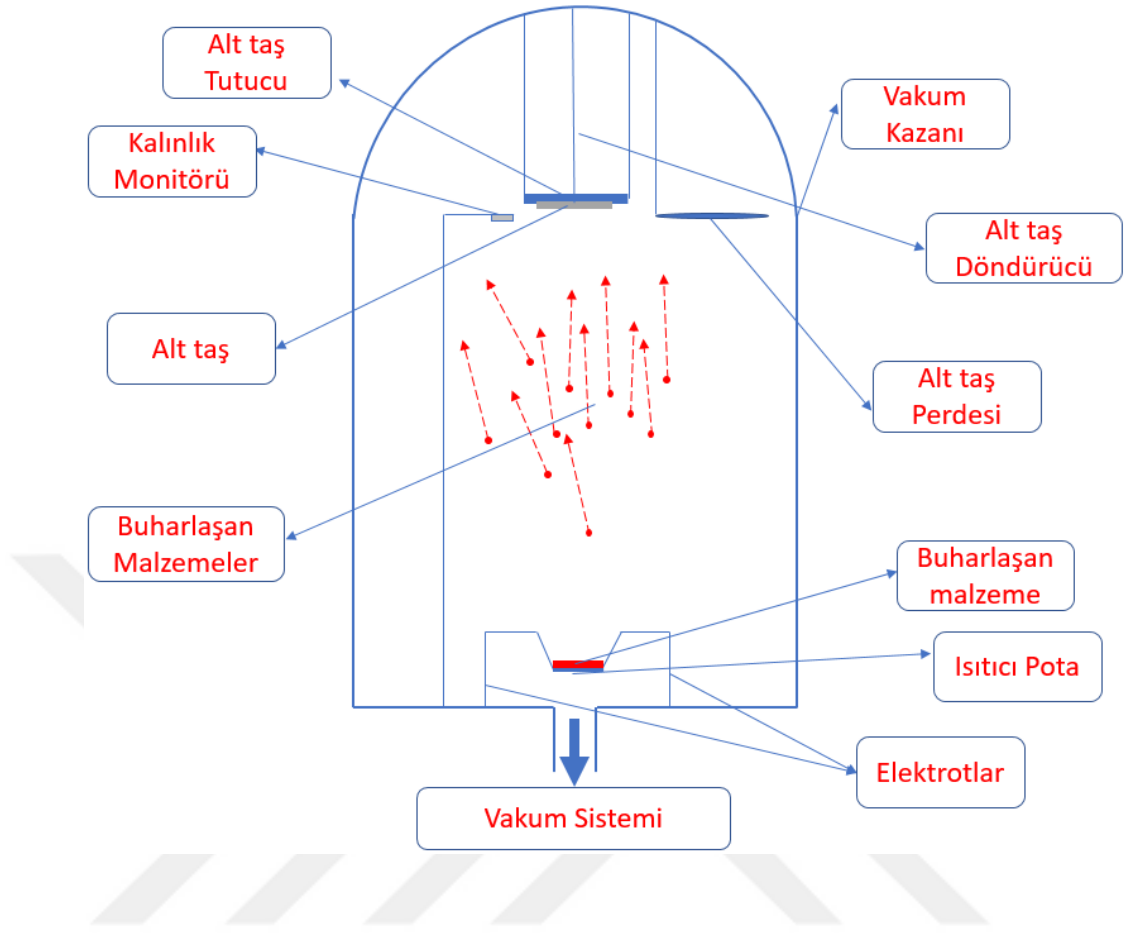
Bu sistemde, vakum kazanına alt taş ve kaplanacak malzeme konulduktan sonra kapatılır ve sistem istenilen vakum değerine gelene kadar vakumlanır ve sonrasında tepkimeye girme eğilimi olmayan soygaz atomları sisteme bırakılır. Radyo Frekans güç kaynağından uygulanan gerilim ile soygaz atomlarının plazması oluşur. Plazmada pozitif iyonlar ve serbest elektronlar oluşur. Manyetik alan elektronların alt taş üzerine yönelmesini engellerken, elektrotlar arasında oluşturulan elektrik alan ise pozitif iyonların, kaplanacak hedef malzemeye yönlendirilip hızlandırmak ve çarptırmak için kullanılır. Hedef malzemedan kopan atomlar yoğunlaşarak bu şekilde alt taş üzerine birikmeye başlar. Bu anlatım şekil 3.2'de çizimler ile desteklenmeye çalışılmıştır.



Şekil 3.2. Radyo Frekans Magnetron saçtırma yöntemi ile gerçekleştirilen üretimin şematik gösterimi.

3.2.2. Termal Buharlaştırma Yöntemi

Kullanımının çok basit ve ucuz olması, kaplanan yüzeye daha az zarar vermesi, yüksek saflıklarda üretim yapılabilmesi ve kaplanacak malzeme açısından da pek fazla sınırlaması olmadığından dolayı termal buharlaştırma yöntemi yaygın olarak tercih edilen yöntemler arasındadır. Termal buharlaştırma sistemi; vakum kazanı, yüksek akım güç kaynağı, vakumlama sistemi ve kontrol mekanizması gibi ana kısımlardan oluşmaktadır.



Şekil 3.3. Termal buharlaştırma sisteminin vakum kazanının şematik gösterimi.

Vakum kazanı; malzemenin ısıtılması için kullanılan yüksek erime sıcaklığına sahip potadan, üzerine kaplama yapılacak olan alt taşı yerleştirdiğimiz alt taş tutucusundan, kalınlık ölçümünü gerçekleştiren kristal monitörden, kaplamanın daha homojen olmasına olanak sağlayan alt taş döndürücüden, kalınlık ölçümünün daha güvenilir olmasını sağlayan ve istediğimiz kalınlık değerinde alt taş üzerine kaplamayı durdurabilecek alt taş perdesinden oluşmaktadır.

Vakumlama sistemi; düşük vakum değerlerine çabucak ulaşmayı sağlayan mekanik pompadan, yüksek vakum değerlerine ulaşmayı sağlayan difüzyon pompasından ve bazen de turbo moleküler pompadan oluşmaktadır. Ayrıca vakumlama sisteminde kırma vanaları sayesinde pompalar arasında ve vakum kazanı arasında bağlantılar açılıp kapatılabilmektedir.

Yüksek akım güç kaynağı, buharlaştırılıp kaplanacak malzemenin içine konulduğu potanın iki ucunda bulunan elektrotlara uygulanan voltaj ile malzemenin buharlaştırılmasını sağlamaktadır.

Kontrol mekanizması; şalterler, termal güç kontrolü ve bilgisayardan oluşmaktadır. Bu mekanizma elektrik bağlantısını kontrol etmektedir. Termal güç kontrolü malzemeye uygulanacak voltajı ayarlamayı ve kaplama hızını kontrol etmeyi sağlamaktadır.

3.3. Cihazın Üretimi

4 inçlik ve bir yüzeyi mat olan p-tipi silisyum plakaları kullanılacak sisteme uygun boyutlara getirmek amacıyla sivri uçlu bir pens yardımı ile kesildi. Bu pens kullanılırken silisyum plakanın kristal yönelimine dikkat edildi. Silisyum parçaların boyutu yaklaşık olarak mikroskop lamı boyutundaydı. Sisteme yerleştirilmek üzere ayarlanan silisyum parçalar, sisteme yerleştirilmeden hemen önce HF çözeltisi ile temizlenerek oksit tabakadan ve yüzeydeki kirliliklerden arındırıldı ve en elverişli homojen duruma getirildi. Temizleme işlemi uygulanırken hacim olarak seyreltilmiş 10% HF çözeltisinde 2 dakika bekletildi ve ardından HF çözeltisinden çıkartılan numuneler son aşama olarak de iyonize ultra saf su kullanılarak durulandı ve silisyum numunenin oksit tabakadan arındırılıp arındırılmadığı anlaşılacak için suyun silisyum üzerindeki davranışı gözlemlendi. İlk olarak silisyum parçanın mat yüzeyine termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak arka kontak oluşturuldu. Arka kontak oluşturulurken kullanılan sistem Vaksis PVD Handy 2 termal buharlaştırma sistemidir. Sistemin görüntüsü Şekil 3.4'da verilmektedir. Arka kontak oluşturulurken kullanılan alüminyum metalinin ve mat ve parlak yüzeyine kontak oluşturulacak olan silisyumun iş fonksiyonları karşılaştırıldı ve literatür incelendikten sonra Al metali kontak için uygun görüldü. Sistemin vakum kazanına numune konulduktan sonra, vakum kazanı 10^{-5} Torr vakum değerine getirildi. Termal güç kontrolü yardımıyla akım değeri 50 W termal güç olduğunda 0.2 nm. s^{-1} kaplama hızı ile silisyumun mat yüzeyi üzerine alüminyum metali kaplanmaya başladı. Bu işlem yaklaşık olarak dört dakika sürdü ve 100 nm kalınlığında bir alüminyum arka kontak oluşturuldu.

Silisyum numunenin parlak yüzeyine hetero eklemi oluşturmak amacıyla Radyo Frekans Magnetron saçırma yöntemi kullanıldı. Kullanılan sisteminin görüntüsü Şekil 3.5'de verilmiştir. ZnO malzeme p-tipi silisyum alt taş ve cam üzerine 8×10^{-4} Torr vakum kazanı basınç değerinde, 50 W RF gücü kullanılarak kaplandı. Kaplama gerçekleşirken vakum içinde yüksek saflıkta argon soygaz atomu kullanıldı ve bu şekilde 60 dakika kaplama gerçekleşti. ZnO ince film bu yöntem kullanılarak 200 nm kalınlığında, p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülmüş oldu. Bu işlem ile birlikte ZnO/p-Si/Al yapısı oluşturulmuş oldu ve son olarak hetero eklem cihazın üretimini tamamlamak için tekrar Vaksis PVD Handy 2 termal buharlaştırma sistemi kullanıldı. Ön kontak oluşturulmak için bir kez daha kullandığımız termal buharlaştırma sistemi kaplamaya geçilmeden önce maske kullanılarak 2 mm çapında nokta kontaklar oluşturuldu. Al/ZnO/p-Si/Al hetero eklem cihazın üretimi gerçekleştirilmiş oldu.



Şekil 3.4. Ön ve arka kontak oluşturulurken kullanılan Vaksis PVD Handy 2 termal buharlaştırma sisteminin görüntüsü (Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü İnce Film Karakterizasyon Laboratuvarı).



(a)



(b)

Şekil 3.5. ZnO ince filmin p-Si alttaş üzerine büyütülmesinde kullanılan RF Magnetron saçırma cihazının görüntüsü: (a) vakum kazanı (b) RF güç kaynağı (Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Plazma Fiziği Laboratuvarı).

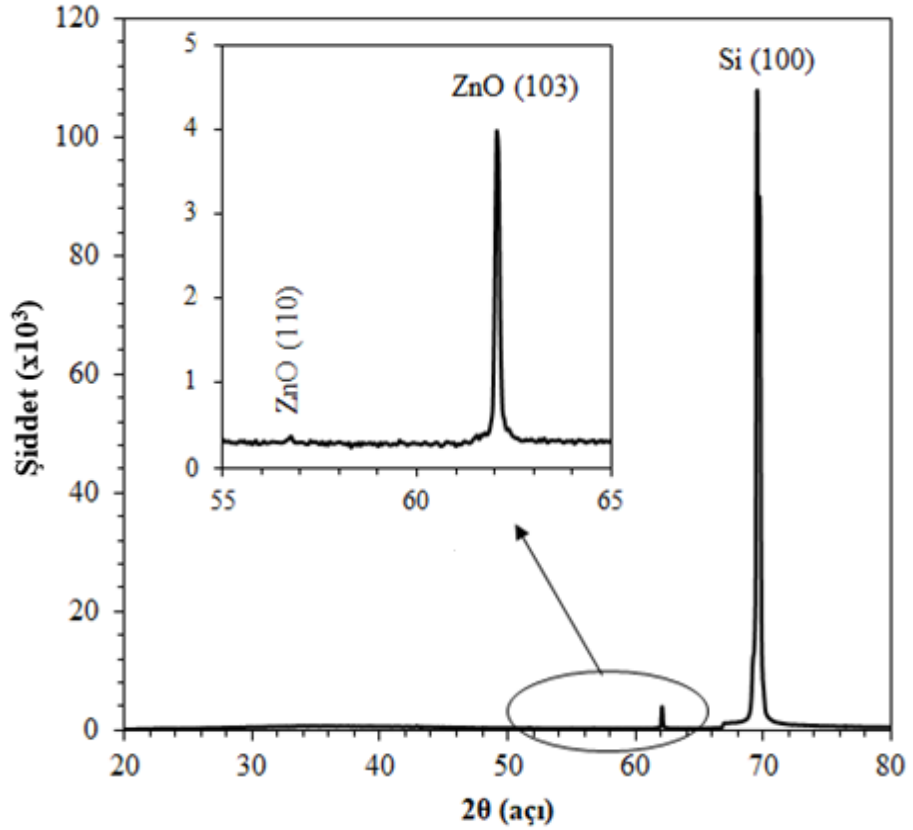
3.4. Ölçüm ve Analizler

ZnO/Si hetero eklem cihazın optik, yapısal ve morfolojik ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. Üretilen cihazın optik özellikleri Shimadzu UV-2600 Spektrofotometre, morfolojik özellikleri Atomik Kuvvet Mikroskobu (NanoMagnetics Instruments) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (Carl Zeiss EVO 40) ile ölçülmüştür. Kristal yapı özelliklerinin incelenmesi ise X-ışını kırınımı cihazı (Bruker D 8 Advanced) ile gerçekleştirildi. ZnO/Si cihazın aydınlık ve karanlık koşullarda akım-voltaj karakteristikleri Keithley 2440 5A sourcemeter ve Oriel 1000W güneş gözesi simülatörü ile incelendi ve diğer elektriksel karakteristiği olan kapasitans-voltaj özellikleri ise Hewlett Packard 4192 An LF ile gerçekleştirildi.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Yapısal ve Morfolojik Analizler

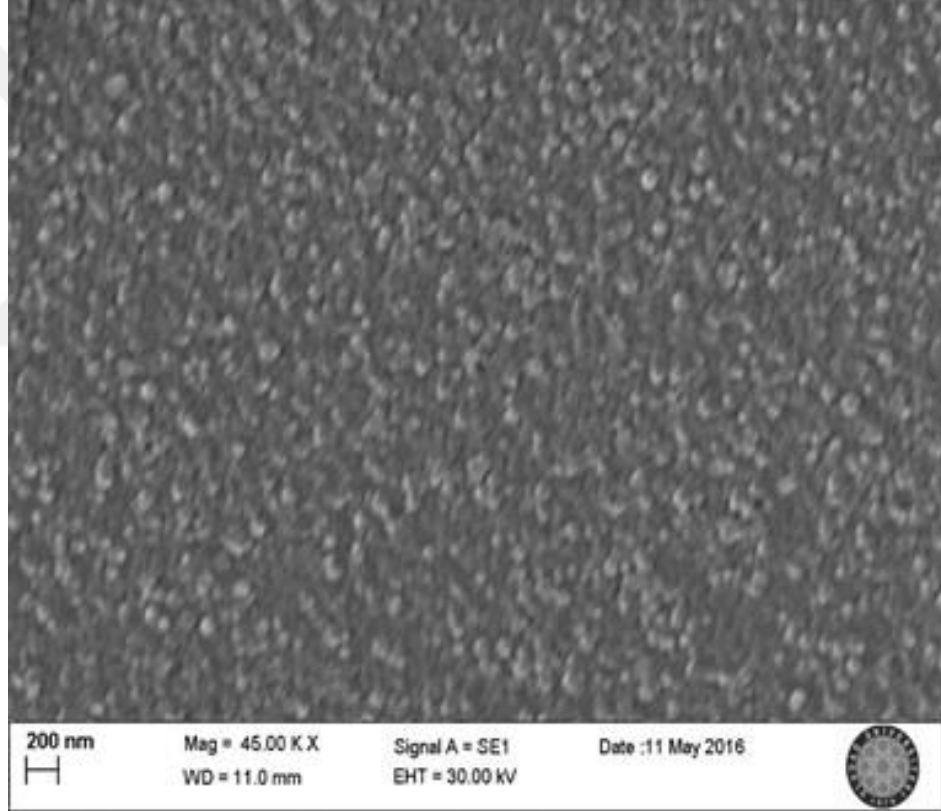
Radyo Frekans Magnetron saçırma tekniği kullanılarak p-tipi Si alt taşlar üzerine büyütülen ZnO ince filme ait X-ışını kırınımı modeli Şekil 4.1’de görülmektedir. X-ışını kırınımı grafiğinde görülmekte olan 70° ’ye karşılık gelen pik Si alt taşa aittir. Şekil 4.1’deki ek grafik $55-65^\circ$ arasını daha ayrıntılı olarak göstermektedir ve bu grafikten ZnO ince filme ait 57° ve 62° ye karşılık gelen biri dominant iki pik gözlenmiştir. Ayrıca ZnO’ın, hekzagonal sıkı paket vürtzit yapıda büyüdüğü, XRD sonuçlarından görülmüştür. 62° ’ye karşılık gelen baskın (103) düzlemini temsil eden ZnO’ a ait pik ve Denklem 4.1 ile verilen Debye-Scherrer denklemi (Cullity 1987) kullanılarak kristalin tane boyutu yaklaşık 8 nm olarak hesaplanmıştır.



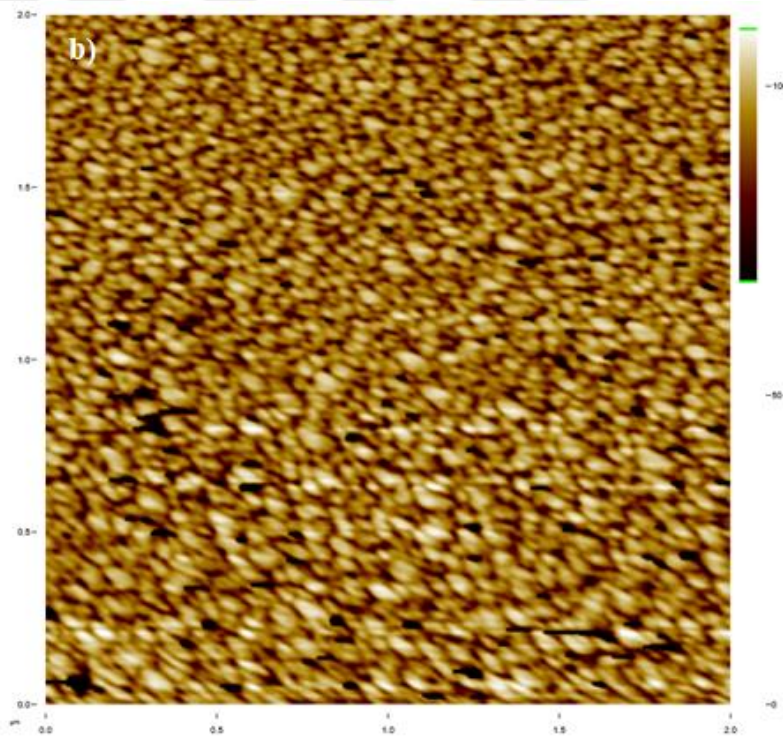
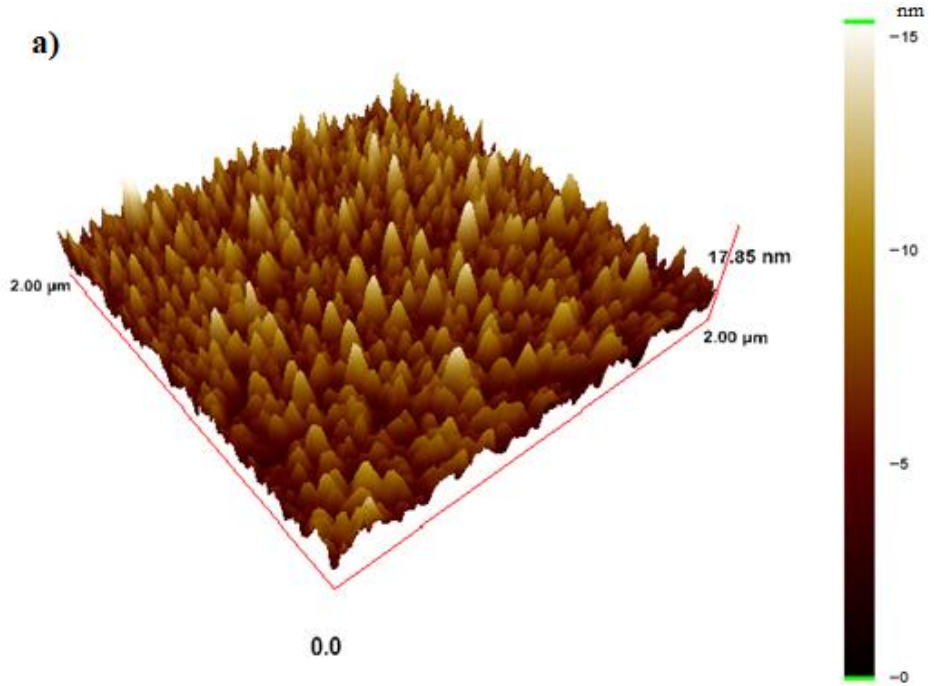
Şekil 4.1. p-Si alt taş üzerine büyütülmüş ZnO ince filmin XRD grafiği. Ek grafik ($55-65^\circ$ aralığının detaylı grafiğidir

$$D = \frac{0,94\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (4.1)$$

Burada; λ , kullanılan x-ışınının dalga boyu; β ise 2θ derecede yarı maksimum tam genişlik ve θ , Bragg açısıdır. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 ile p-tipi Si alt taş üzerine büyütülmüş ZnO ince filmin sırasıyla SEM ve AFM görüntülerini vermektedir. SEM ve AFM resimlerinden açıkça görülmektedir ki, ZnO ince filmin nano-kristal tanecikleri oldukça homojen dağılmıştır ve yüzey yaklaşık 2 nm kadar küçük bir ortalama pürüzlülük değerine sahiptir. Ayrıca bu analizlerden parçacık boyutu yaklaşık 20 nm olarak belirlenmiştir.



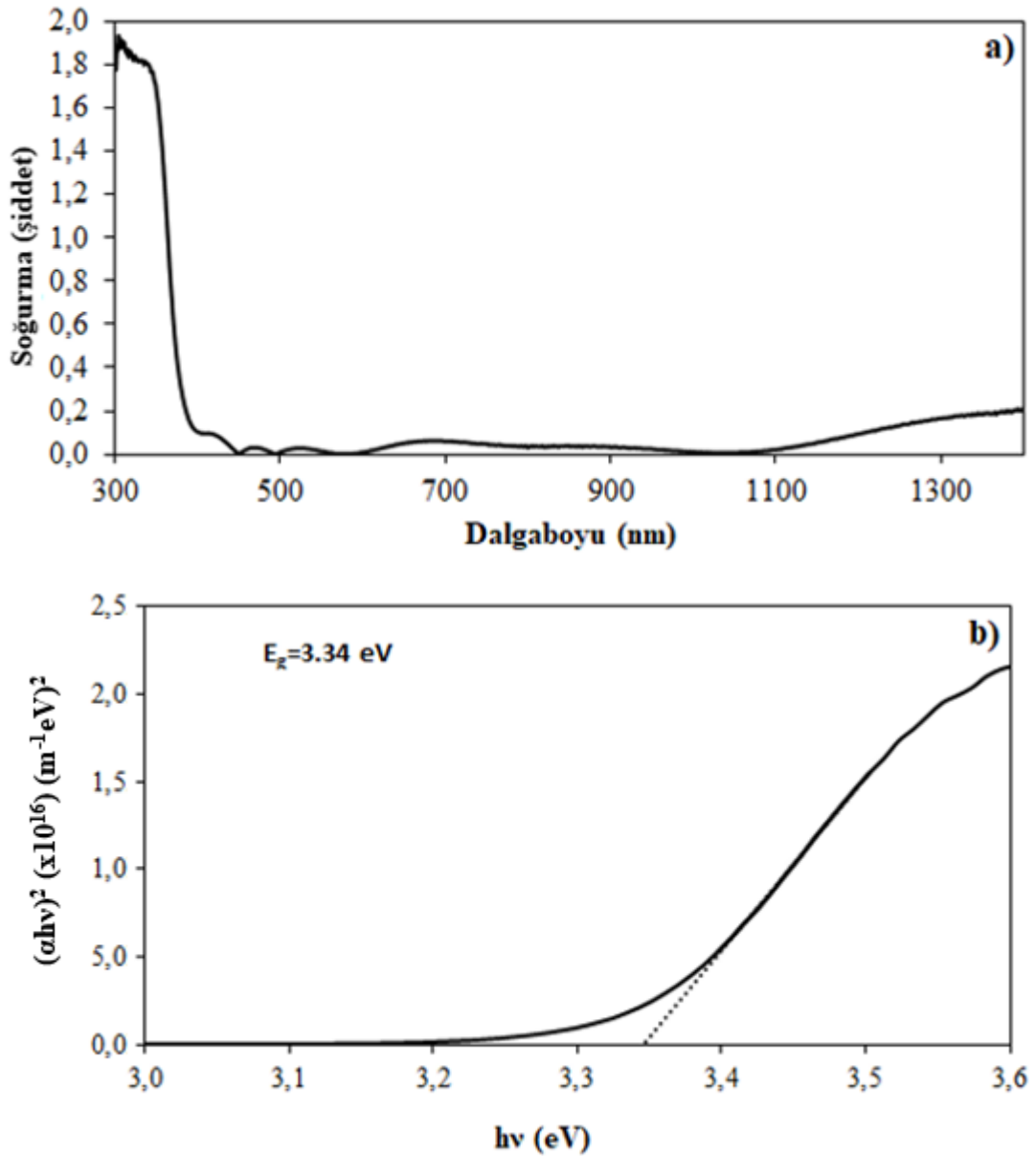
Şekil 4.2. p-Si alt taş üzerine RF Magnetron saçırma ile büyütülmüş ZnO ince filmin SEM görüntüsü.



Şekil 4.3. p-Si alt taş üzerine RF Magnetron saçırma ile büyütülmüş ZnO ince filmin;
a) 3-B AFM görüntüsü, b) AFM 2B görüntüsü.

4.2. Optik Analizler

Cam üzerine büyütülmüş olan ZnO ince filmin dalga boyu – soğurma spektrumu Shimadzu UV-2600 Spektrofotometre kullanılarak ölçülmüştür. Dalga boyu – soğurma spektrumu ve “ $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ ” grafikleri Şekil 4.4’de verilmiştir. Denklem 4.2 ile verilen Tauc eşitliği (Tauc 1974) ve “ $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ ” grafiği cam üzerine büyütülen ZnO ince filmin optik yasak bant aralığı (E_g) elde etmek için kullanılmıştır.



Şekil 4.4. Cam üzerine büyütülmüş ZnO ince filmin; a) dalga boyu – soğurma spektrumu, b) “ $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ ” grafiği.

Burada, α soğurma katsayısı, ν foton frekansı, B sabit, h Planck sabiti ve n indistir. Soğurma katsayısı ise $\alpha = (2,303 A)/t$ ile hesaplanır. Burada A ; soğurma şiddeti ve t ise oluşturulan ince filmin kalınlığıdır. n indis değeri (izinli doğrudan geçişler için $n=1/2$, izinsiz doğrudan geçişler için $n=3/2$, izinli dolaylı geçişler için $n=2$ ve yasaklı dolaylı geçişler için $n=3$) ZnO için $n=1/2$ olmak üzere Tauc denklemi:

$$\alpha h\nu = B(h\nu - E_g)^n \quad (4.2)$$

dir. Bu ifade kullanılarak elde edilen “ $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ ” grafiğinin lineer kısmının $h\nu$ eksenini kestirerek optik yasak bant genişliği 3,34 eV olarak elde edilmiştir.

4.3. Elektriksel Analizler

Üretilen Al/ZnO/p-Si/Al hetero eklem cihazın elektriksel özellikleri ve Fotovoltaik parametrelerini belirlemek için karanlık ve ışık altında akım – gerilim (I-V) ölçümleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler, Keithley 2440 5A sourcemeter ve Oriel 1000 W solar simülatör kullanılarak (AM1.5; 1 kW/m²) gerçekleştirilmiştir. Ölçüm verilerinin grafiği Şekil 3.5’te ve yarı logaritmik akım – gerilim grafiği de Şekil 3.6’da verilmiştir. Şekil 3.5’ten görüldüğü gibi Al/ZnO/p-Si/Al hetero eklem diyot iyi bir doğrultucu karakter sergilemektedir ve ± 2 V’daki doğrultma oranı $I_f/I_r=7,4 \times 10^3$ olarak hesaplanmıştır. Termoyonik emisyon teorisinden bir hetero eklem diyot için akım – gerilim karakteristiği Denklem 4.3 ile verilen ifadeye uyar (Sze 2002):

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.3)$$

Burada, n idealite faktörü, T mutlak sıcaklık, q elektron yükü, k Boltzmann sabiti ve I_0 doyma akımıdır ve I_0 şu şekilde ifade edilir:

$$I_0 = AA^*T^2 \left[\exp\left(\frac{q\phi_B}{kT}\right) \right] \quad (4.4)$$

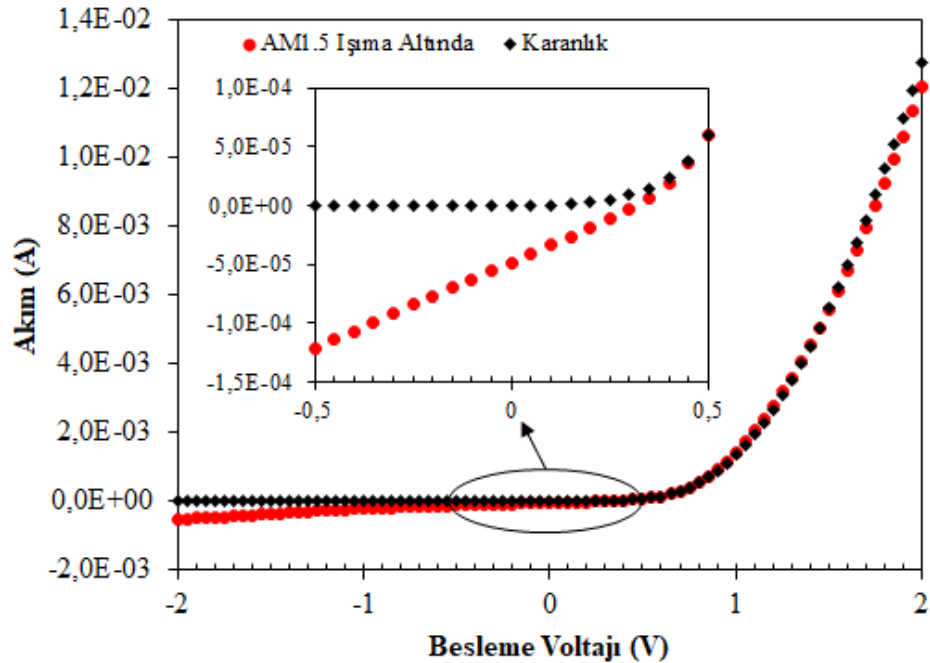
Burada, A etkin diyot alanı, A^* Richardson sabiti ve ϕ_B bariyer yüksekliğidir. Bariyer yüksekliği ϕ_B için bir ifade Denklem 4.4’ten

$$\phi_B = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (4.5)$$

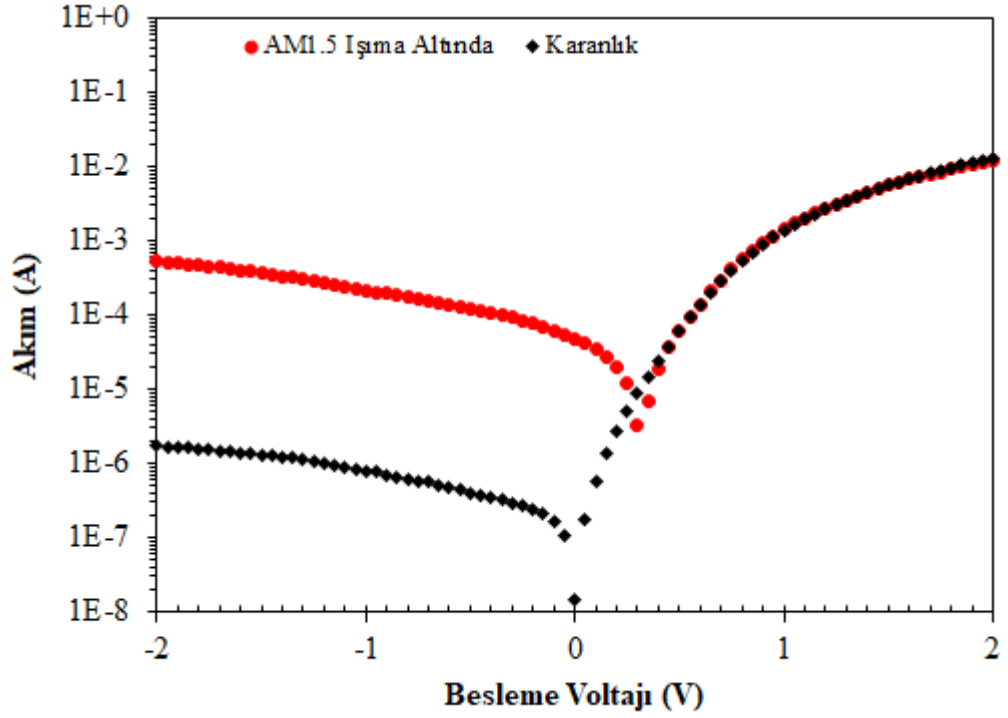
olarak elde edilir. Şekil 4.6 ile verilen yarı logaritmik I-V grafiğinden karanlık için ters doyma akımı $I_0=3,66 \times 10^{-8}$ A olarak elde edildi. Bu I_0 değeri için bir bariyer yüksekliği değeri, p-Si için bilinen teorik Richardson sabiti değeri $A^*=32 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$ (Sze 1981) de kullanılarak $\phi_B = 0,71 \text{ eV}$ olarak hesaplandı. Ayrıca, ileri besleme durumu için diyot idealite faktörünü veren bir ifade de Denklem (4.3)'ten elde edilebilir (Rhoderick ve Williams 1988):

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d(\ln(I))} \right) \quad (4.6)$$

Bu ifade ve Şekil 4.6'da verilen karanlık akım için yarı logaritmik I-V eğrisi kullanılarak Al/ZnO/p-Si/Al hetero eklem diyotun ileri besleme yönünde idealite faktörü $n=2,16$ olarak elde edildi.



Şekil 4.5. ZnO/p-Si hetero eklem diyotun oda sıcaklığında karanlık ve ışık altındaki akım – gerilim (I-V) grafiği.



Şekil 4.6. ZnO/p-Si hetero eklem diyotun oda sıcaklığında karanlık ve ışık altındaki yarı logaritmik akım – gerilim (lnI-V) grafiği.

Ayrıca, seri direncin cihaz parametrelerine etkisini görmek ve yüksek besleme voltajı bölgesinde idealite faktörünün değişimini incelemek için Cheung–Cheung Metodu olarak bilinen yöntem de uygulanmıştır (Cheung ve Cheung 1986).

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = n \frac{kT}{q} + IR_s \quad (4.7)$$

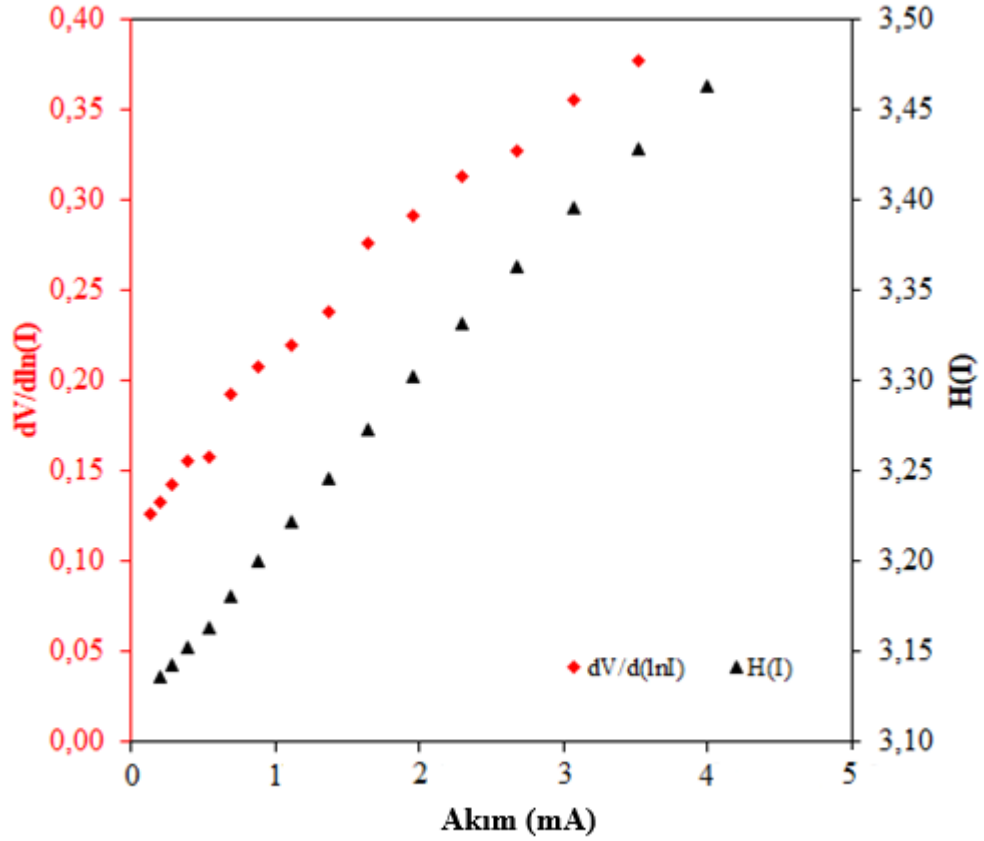
denklemini kullanılarak elde edilir.

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (4.8)$$

ve

$$H(I) = n\phi_B + IR_s \quad (4.9)$$

Grafiğin eğiminden R_s değeri ve önceki basamakta elde edilen $n=4,95$ değeri ve grafiğin 0 A akımda $H(I)$ eksenini kestiği noktadan ϕ_B değeri sırasıyla, $88,466 \Omega$ ve $0,63 \pm 0,02$ eV olarak elde edildi (Şekil 4.7.).



Şekil 4.7. Oda sıcaklığında karanlık I-V ölçümünden elde edilen deneysel $dV/d(\ln I) - I$ ve $H(I) - I$ eğrileri.

I-V ölçümü ile elde edilen bütün elektriksel parametreler, literatürdeki bazı çalışmalarda elde edilen sonuçlar ile birlikte karşılaştırmalı olarak Tablo 4.1’de listelenmektedir.

Çizelge 4.1. Al/ZnO/p-Si/Al hetero eklem diyotun oda sıcaklığındaki elektriksel parametreleri ve ilgili literatür verileri.

Standart (I-V) Yöntemi				Cheung – Cheung Yöntemi		
	n	Φ_B (eV)	I_0 (A)	n	Φ_B (eV)	$R_s(\Omega)$
Bu çalışmada	2,16	0,71	$3,66 \times 10^{-8}$	4,95	0,63	76,025 / 88,466
(Bedia ve ark. 2014)	-	0,87	$7,33 \times 10^{-9}$	2,50	0,90	6,28k / 5,6k
(Zebbar ve ark. 2011)	4,00	0,67	$1,78 \times 10^{-7}$	-	-	-
(Chaabouni ve ark. 2006)	-	0,78-0,64	$2,16 \times 10^{-7} - 6,05 \times 10^{-5}$	-	-	-
(Sharma ve ark. 2016)	3,20	0,74	-	-	-	-
(Hardan ve ark. 2016)	2,32	0,78	-	-	-	-
(Pathak ve ark. 2016)	1,10	0,66	0,02 mA/cm ²	-	-	-

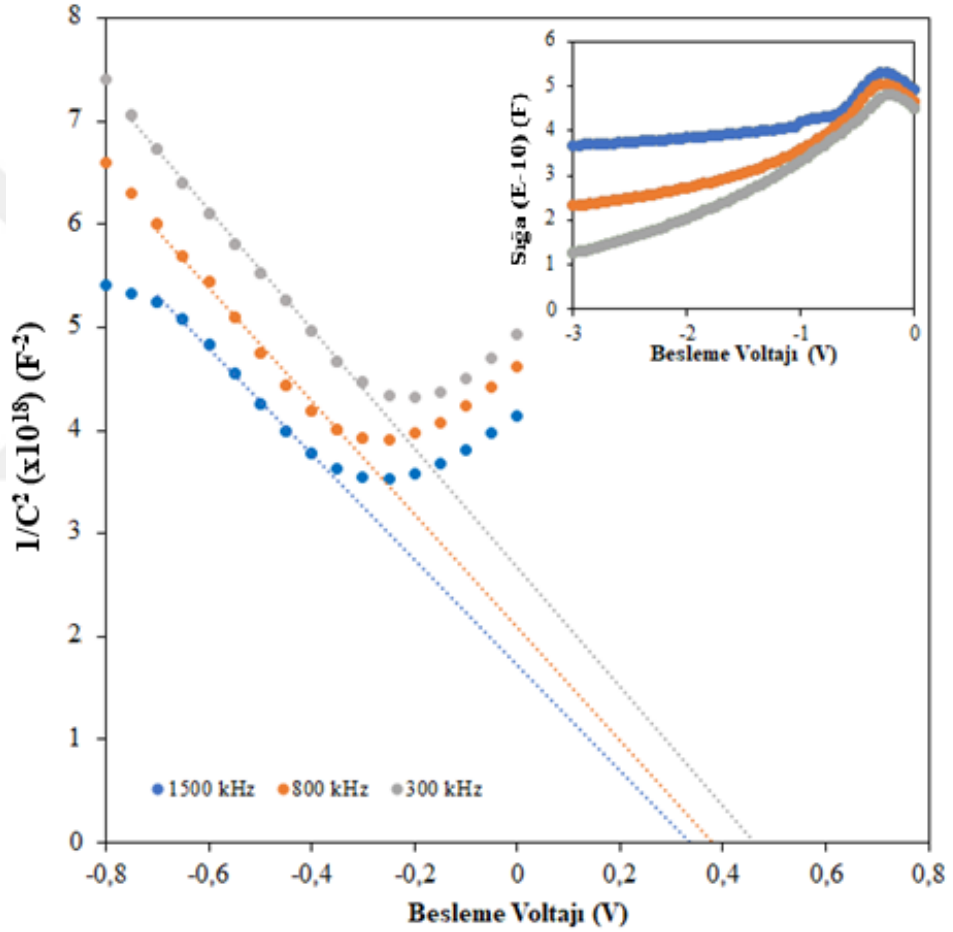
Tablo 4.1’de görüldüğü üzere standart I-V hesaplamaları ve Cheung – Cheung yöntemi ile elde edilen ϕ_B bariyer yüksekliği değerleri hem birbirleriyle hem de literatür verileri (Chaabouni ve ark. 2006, Zebbar ve ark. 2011, Bedia ve ark. 2014, Pathak ve ark. 2016, Hardan ve ark. 2016, Sharma ve ark. 2016) ile yüksek oranda örtüşmektedir. Bu çalışmada Al/ZnO/p-Si/Al hetero eklem diyot için elde edilen idealite faktörü değeri $n=2,16$ ideal değer olan 1’den çok büyük değildir. Bu küçük sapma ara yüzeyde bulunan muhtemel kusur ve ince bir oksit tabakasının varlığına bağlı olabilir (Zebbar ve ark. 2011). Ayrıca, bu çalışmada elde edilen seri direnç değeri Bedia ve ark. (2014) elde ettiği değere göre oldukça küçüktür.

Kapasitans – voltaj (C-V) ölçümü, Al/ZnO/p-Si/Al hetero eklem cihazın eklem ara yüzeyi hakkında bilgi edinmek için, taşıyıcı konsantrasyonu ve bariyer yüksekliği değerini hesaplamak için 300, 800 ve 1500 kHz olmak üzere üç farklı frekans değerinde ve oda sıcaklığında yapıldı. Bir hetero eklem p-n diyotun eklem gölgesinin kapasitansı geleneksel hetero eklem teorisi ile ifade edilir (Sze 2002, Chirakkara ve ark. 2012):

$$C^2 = \left[\frac{q \epsilon_{s1} \epsilon_{s2} N_A N_D}{2(\epsilon_{s1} N_A + \epsilon_{s2} N_D)} \right] \frac{1}{(V_{bi} - V)} \quad (4.10)$$

Burada q elektron yükü, ϵ_{s1} ve ϵ_{s2} dielektrik sabitleri, N_A ve N_D yarıiletkenlerin akseptör ve donör konsantrasyonları, V_{bi} yapı potansiyeli ve V besleme voltajıdır. Al/ZnO/p-Si/Al hetero eklem diyot için donör konsantrasyonunun akseptör konsantrasyonundan çok büyük olduğunu ($N_D \gg N_A$) yani, tek- taraflı keskin eklem diyot olduğunu varsayarak Denklem (4.10)'u daha sade bir şekilde ifade edebiliriz:

$$\frac{1}{C^2} = \left[\frac{2(V_{bi} - V)}{A^2 q \epsilon_{s1} N_A} \right] \quad (4.11)$$



Şekil 4.8. Al/ZnO/p-Si/Al hetero eklem diyotun oda sıcaklığında ters beslemede frekansa bağlı $1/C^2 - V$ grafiği.

Burada A etkin diyot alanıdır. Şekil 4.8'de verilen $1/C^2 - V$ grafiğinde her frekans değeri için V_{bi} değerleri, eğrilerin lineer kısımlarının voltaj eksenini kestirilmesi ile elde edildi. N_A değerleri de $N_A = 2 / (A^2 q \epsilon_{s1} \times \text{eğim})$ ifadesi ve $1/C^2 - V$ grafiğinin eğimi kullanılarak elde edildi.

Bir diyotun bariyer yüksekliği ϕ_B aşağıdaki denklem ile ifade edilir:

$$\phi_B = V_{d0} + \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_V}{N_A} \right) \quad (4.12)$$

Burada, N_V valans (değerlik) bandındaki etkin durum yoğunluğudur ve 300 K'de Si için değeri $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 'tür, V_{d0} sıfır beslemede difüzyon voltajına karşılık gelmektedir ve şu şekilde ifade edilmektedir:

$$V_{d0} = V_{bi} + \frac{kT}{q} \quad (4.13)$$

Denklem (4.12) ve (4.13) kullanılarak her bir frekans değeri için ϕ_B bariyer yüksekliği değerleri elde edilmiştir. C-V analizinden elde edilen bütün veriler Tablo 4.2'de listelenmiştir (Cheung – Cheung , 1986).

Çizelge 4.2. Oda sıcaklığında frekansa bağlı C-V analizinden elde edilen cihaz parametreleri.

Frekans	Eğim	$N_A \text{ (cm}^{-3}\text{)}$	$V_{bi} \text{ (V)}$	$\phi_B \text{ (eV)}$
300 kHz	$5,78 \times 10^{18}$	$2,08 \times 10^{15}$	0,46	0,71
800 kHz	$5,50 \times 10^{18}$	$2,19 \times 10^{15}$	0,38	0,63
1500 kHz	$5,11 \times 10^{18}$	$2,35 \times 10^{15}$	0,34	0,58

Tablo 4.2'de görüldüğü üzere artan frekans ile taşıyıcı konsantrasyonu N_A değerinin arttığı, bariyer yüksekliği ϕ_B değerinin azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni eklem bölgesinde bulunan muhtemel kusurların (rekombinasyon merkezi olarak davranan) eklem kapasitans katkısının artan frekansa cevap verememesi olarak açıklanabilir. Elde edilen akseptör taşıyıcı yoğunluğu değerleri kullanılan p-tipi Si alttaşın taşıyıcı değerleri ile uyumludur. Ayrıca, C-V ölçümünden elde edilen bariyer yüksekliği değerleri, I-V çalışmalarından elde edilen bariyer yüksekliği değerleri ile büyük uyumluluk göstermektedir.

AM1.5 ışık altındaki (1 kW/m^2) akım gerilim (I-V) ölçümü, hetero eklem diyotun bir fotovoltaiik hücre davranışı sergilediğini göstermektedir. Al/ZnO/p-Si/Al hetero eklem

diyot için solar güç dönüşüm verimi η 'yı belirlemek için aşağıda Denklem (4.14) ile verilen ifade kullanıldı.

$$\eta = \frac{J_{sc}V_{oc}FF}{P_{in}} \quad (4.14)$$

Bu ifadede, J_{sc} kısa devre akım yoğunluğu, V_{oc} açık devre gerilimi, FF doldurma faktörü ve P_{in} diyot üzerine düşen solar ışık gücüdür ki bu durumda 1 kW/m^2 'ye karşılık gelmektedir. Al/ZnO/p-Si/Al hetero eklem diyotun tüm fotovoltaik parametreleri hesaplandı ve Çizelge 4.3'te literatür verileri ile karşılaştırmalı olarak listelendi.

Çizelge 4.3. Fotovoltaik cihaz parametrelerinin literatür verileri ile karşılaştırmalı listesi.

	$R_{sh} (\Omega)$	$R_s (\Omega)$	$J_{sc} (\text{mA/cm}^2)$	$V_{oc} (\text{V})$	$J_m (\text{mA/cm}^2)$	$V_m (\text{V})$	$FF (\%)$	$\eta (\%)$
Bu çalışmada	$6,95 \times 10^3$	$2,9 \times 10^3$	1,55	0,30	0,854	0,15	27	0,13
(Pathak ve ark. 2016)	$6,33 \times 10^6$	8,0	44	0,27	34	0,17	48	6,0
(Chirakkara ve Krupanidhi 2012)	$2,04 \times 10^3$	5,1	17	0,35	16	0,22	38	3,6
(Agüero ve ark. 2015)	-	-	0,9	0,25	-	-	-	-

Şönt (paralel) direnci R_{sh} ve seri direnç R_s değerleri sırasıyla, kısa-devre akım yoğunluğu J_{sc} ve açık-devre voltajı V_{oc} yakınlarındaki eğimlerin çarpmaya göre tersinden elde edilmiştir. Ölçülen $V_{oc} = 0,3 \text{ V}$ değeri literatür verileri ile yakınlık göstermektedir ancak ölçülen $J_{sc} = 1,55 \text{ mA/cm}^2$ değeri Pathak ve ark. (2016) ile Pietruszka ve ark. (2014) verilerine göre oldukça düşüktür. Bu da V_{oc} yakınındaki yüksek seri dirençten ($R_s = 2,9 \times 10^3 \Omega$) ve fotonlar tarafından oluşturulmuş serbest yük taşıyıcıların ZnO/p-Si eklem ara yüzünde (elektron ve holler) rekombinasyona uğramasına neden olan muhtemel kusurlar ve kristalin tane sınırlarındaki yük tuzaklarından kaynaklıdır (Kaplan 2017).

5. SONUÇ

Bu çalışmada, Al/ZnO/p-Si/Al hetero eklem diyot Radyo Frekans Magnetron saçtırma yöntemi kullanılarak başarıyla üretilmiştir. Üretilen ZnO/cam, ZnO/p-Si ve Al/ZnO/p-Si/Al numuneler kullanılarak yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel analizler ile detaylı bir çalışma yürütülmüştür.

X-ışını kırınım spektrumu ZnO ince filmin kübik kristal yapıda, 8 nm tane boyutuyla nano-kristalin olduğunu göstermiştir. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) analizlerinden elde edilen görüntüler ZnO ince film yüzeyinin homojen dağılıma ve 2 nm kadar küçük bir ortalama yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğunu göstermiştir. ZnO/cam numunesinden yapılan ince filmin UV-Vis optik soğurma spektrumu analiziyle ZnO ince filmin optik yasak bant genişliği de $E_g = 3,34$ eV olarak hesaplanmıştır.

I-V ölçümleri ve çalışmalarından yani, geleneksel hetero eklem teorisi ve Cheung-Cheung yöntemi kullanılarak elde edilen bariyer yüksekliği değerleri C-V analizinden elde edilen bariyer yüksekliği değerleri birbiriyle ve literatür verileriyle büyük ölçüde örtüşmektedir. Ayrıca, Cheung-Cheung yöntemi ile elde edilen seri direnç değeri literatür verilerine kıyasla oldukça iyidir. C-V analizinden elde edilen bir diğer değer olan yük taşıyıcı yoğunluğu da kullanılan p-tipi Si alt taşın yük taşıyıcı yoğunluğu ile tutarlılık göstermektedir. Son olarak, Al/ZnO/p-Si/Al hetero eklem diyotun fotovoltik dönüşüm verimi $\eta = \% 0.13$ olarak hesaplandı. Verimin bu denli düşük olması fakirleşmiş bölgede yük taşıyıcıların rekombinasyona uğramasına sebep olabilecek eklem ara yüzeyinde bulunan muhtemel kusurlar ve kristal tane sınırlarındaki rekombinasyon merkezlerinden kaynaklanmaktadır.

Sonuç olarak, üretilen Al/ZnO/p-Si/Al hetero eklem cihazın diyot karakteristiği göstermesi ve düşükte olsa ışığa duyarlılığı, cihazın foto diyot olarak kullanılabilceği anlamına gelmektedir.

KAYNAKLAR

- Agüero, N.M., Agarwal, V., Vidales, H.I.V., Alvarezand, J.C., Sebastian, P.J. 2015.** A heterojunction based on macro porous silicon and zinc oxide for solar cell application. *J. New Mat. Electrochem. Systems*, 18: 225-230.
- Bedia, A., Bedia, F.Z., Benyoucef, B., Hamzaoui, S. 2014.** Electrical characteristics of ultraviolet photodetector based on ZnO nanostructures. *Physcss Procedia*, 55: 53-60.
- Bian, H., Ma, S., Yang, G., Zhu, H., Yan, S., Gao, J., Zhang. Z. 2016.** The optical and electrical properties of ZnO:Zr films. *Journal of Alloys and Compounds*, 672: 20-26.
- Chaabouni, F., Abaab, M., Rezig, B. 2006.** Characterization n-ZnO/p-Si films grown by magnetron sputtering. *Superlattice and Microstructures*. 39: 171-178.
- Chirakkara, S., Krupanidhi, S.B. 2012.** Study of n-ZnO/p-Si (100) thin film heterojunction by pulsed laser deposition without buffer layer. *Thin Solid Films*, 520: 5894–5899.
- Cullity, B.D. 1978.** Elements of X-ray Diffraction, Addison-Wesley, Reading, MA, USA.
- Hardan, N.H.A., Hamid, M.A.A., Ahmed, N.M., Shamsudin, R., Othman, N.K. 2016.** Ag/ZnO/p-Si/Ag heterojunction and their optoelectronics characteristics under different UV wavelength illumination. *Sensors and Actuators A*, 242, 50-57.
- Hu, C.C. 2009.** Modern semiconductor devices for integrated circuits. 2nd ed., Pearson Education, USA, 384 pp.
- Kaplan, H.K. 2017.** ZnS/Si heteroeklem diyotların yapısal, elektriksel ve optik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Bursa.
- Keskenler, E.F., Tomakin, M., Doğan, S., Turgut, G., Aydın, S., Duman, S., Gurbulak. B. 2013.** Growth and characterization of Ag/n-ZnO/p-Si/Al heterojunction diode by sol–gel spin technique. *Journal of Alloys and Compounds*, 550: 129-132.
- Kwok, K. Ng. 1995.** Complete guide to semiconductor devices. McGraw-Hill, Inc., New York, 677 pp.
- Milnes, A.G., Feucht, D. L. 1972.** Heterojunctions and metal-semiconductor junctions. Akademic press, Newyork and London, 408 pp.

- Muthukrishnan, K., Vanajara, M., Boomadevi, S., Karn, R.K., Singh, V., Singh, P.K., Pandiyan, K. 2016.** Studies on acetone sensing characteristics of ZnO thin film prepared by sol-gel dip coating. *Journal of Alloys and Compounds*, 673: 138-143.
- Oliveira, F.F., Proenca, M.P., Araujo, J.P., Ventura, J. 2016.** Electrodeposition of ZnO thin films on conducting flexible substrates. *J Mater Sci.*, 51: 5589-5597.
- Pathak, T.K., Kumar, V., Prakash, J., Purohit, L.P., Swart, H.C., Kroon, R.E. 2016.** Fabrication and characterization of nitrogen doped P-ZnO on n-Si heterojunctions. *Sensor and Actuators A: physical*, 247: 475-481.
- Pietruszka, R., Luka, G., Witkowski, B.S., Kopalko, K., Zielony, E., Bieganski, P., Placzek-Popko, E., Godlewski, M. 2014.** Electrical and photovoltaic properties of ZnO/Si heterostructures with ZnO films grown by atomic layer deposition. *Thin Solid Films*, 563: 28-31.
- Pietruszka, R., Witkowski, B.S., Luka, B.S., Wachnicki, L., et al. 2014.** *Beilstein J. Nanotechnol*, 5: 173-179.
- Rhodecik, E.H., Williams, R.H. 1988.** Metal-semiconductor contacts. Clarendon, Oxford, 257 pp.
- Romero, R., López, M.C., Leinen, D., Martín, F., Ramos-Barrado, J.R. 2004.** Electrical properties of the n-ZnO/c-Si heterojunction prepared by chemical spray pyrolysis. *Materials Science and Engineering B*, 110: 87-93.
- Samavati, A., Nur, H., Ismail, A.P., Othaman, Z. 2016.** Radio frequency magnetron sputtered ZnO/SiO₂/glass thin film: Role of ZnO thickness on structural and optical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 671: 170-176.
- Sharma, S., Bayer, B.C., Skakalova, V., et al. 2016.** Structural, electrical and UV detection properties of ZnO/Si heterojunction diodes. *IEEE T. Electron Devices*, 63: 1949-1956.
- Sze, S.M. 1981.** Physics of semiconductor devices. 2nd ed., Jhon Wiley and Sons Inc., New York, 868 pp.
- Sze, S.M. 2002.** Semiconductor Devices: Physics and Technology 2nd ed., John Willey and Sons inc., New Jersey, USA, 28-30 pp.
- Sze, S.M., Kwok, K. Ng. 2007.** Physics of semiconductor devices. 3rd ed., Jhon Wiley and Sons Inc., New Jersey, 815 pp.

Tauc, J. 1974. Amorphous and Liquid Semiconductor, Plenum Press, London, NewYork, 175 pp.

Zebbar, N., Kheireddine, Y., Mokeddem, K., Hafdallah, A., et al. 2011. Structural, optical and electrical properties of n-ZnO/p-Si heterojunction prepared by ultrasonic spray. *Mater. Sci. Semicon. Proc.* 14, 229-234.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Serhat SARSICI
Doğum Yeri ve Tarihi :Antalya, 10.10.1987
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu	Kurum	Yıl
Lise	: Bozüyük Mustafa Şeker Anadolu Lisesi	2002-2006
Lisans	: Uludağ Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü	2011-2015
Tezsiz Yüksek Lisans	: Uludağ Ü. Eğitim Fakültesi (Pedagojik Formasyon)	2016-2017
Yüksek Lisans	: Uludağ Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik ABD	2015-2018
Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl	: Bursa Özel Efsane Anadolu Lisesi	2017-
İletişim (e-posta)	: serhatsarsici@gmail.com	

YAYINLAR:

Kaplan, H.K., **Sarsıcı, S.**, Akay, S.K., Ahmetoğlu, M. 2017. The characteristics of ZnS/Si heterojunction diode fabricated by thermionic vacuum arc. *Journal of Alloys and Compounds*, 724: 543-548.

KATILDIĞI AKADEMİK FAALİYETLER:

Kaplan, H.K., **Sarsıcı, S.**, Akay, S.K. 2016. Fotovoltaik Hücre Uygulamaları İçin Cam Üzerine RF Magnetron Sıçratma ile Oluşturulmuş ZnO İnce Filmlerin Elektrik ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi. V. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, 12-12 Mayıs 2016, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.

Sarsıcı, S., Kaplan, H.K., Akay, S.K. 2016. Electrical and Optical Investigation of ZnS/p-Si Heterojunction Fabricated By Using Thermionic Vacuum Arc. Turkish Physical Society 32nd International Physics Congress, 6-9 September 2016, Bodrum, TURKEY.

Kaplan, H.K., **Sarsıcı, S.**, Akay, S.K. 2016. Photo-Detector Potential of ZnS/n-Si Isotype Fabricated By Using Thermionic Vacuum Arc. Turkish Physical Society 32nd International Physics Congress, 6-9 September 2016, Bodrum, TURKEY.