T.C.
DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ag/ZnO/p–Si YAPISININ ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU

Cihat BOZKAPLAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

DİYARBAKIR
Haziran 2011

T.C. DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ
DİYARBAKIR

Cihat BOZKAPLAN tarafından yapılan "Ag/ZnO/p-Si yapısının elektriksel karakterizasyonu" konulu bu çalışma, jürimiz tarafından Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Kemal AKKILIÇ

Üye : Doç. Dr. Abdullah TOPRAK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Yusuf Selim OCAK

Tez Savunma Sınavı Tarihi: 03/06/2011

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

.../...../.....

Prof. Dr. Hamdi TEMEL

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma Sayın Doç. Dr. Kemal AKKILIÇ'ın rehberliğinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmam boyunca hep yanımda hissettiğim, yardımlarını ve desteğini hiçbir şekilde esirgemeyen hocam Doç. Dr. Kemal AKKILIÇ'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuar çalışmalarım sırasında her türlü yardımı benden esirgemeyen, fikirlerinden istifade ettiğim ve çalışmam boyunca verdiği destek ve katkılarından dolayı Sayın Yrd. Doç. Dr. Yusuf Selim OCAK hocama teşekkür ederim.

Bu çalışmada ZnO'nun yarıiletkene saçtırma işlemi ODTÜ Fizik Bölümü, Katıhal Fiziği laboratuarında yapılmıştır. Laboratuar çalışması esnasında yardım ve ilgilerinden ötürü Sayın Prof. Dr. Raşit TURAN ve öğrencisi Mustafa KULAKÇI'ya da ayrıca teşekkür ederim.

Tezin anlatım dilinin düzeltilmesindeki katkılarından dolayı Doç. Dr. Abdullah TOPRAK'a da teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma aynı zamanda Dicle Üniversitesi Bilimsel Projeler Koordinatörlüğü tarafından "Ag/ZnO/p–Si yapısının akım gerilim karakterizasyonu" isimli ve 10–ZEF–127 nolu proje ile desteklenmiştir. Teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım esnasında her türlü destek ve teşviklerini gördüğüm ve çoğu zaman kendilerini ihmal ettiğim aileme bu süre zarfında hep yanımda oldukları için sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

		Sayfa
TEŞEKKÜR.....		I
İÇİNDEKİLER.....		II
ÖZET.....		IV
ABSTRACT.....		V
ÇİZELGE LİSTESİ.....		VI
ŞEKİL LİSTESİ.....		VII
KISALTMA VE SİMGELER.....		VIII
1.	**GİRİŞ**.....	1
2.	**ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR**.....	7
3.	**MATERYAL ve METOT**.....	19
3.1.	Metal–Yarıiletken Kontaklar	19
3.1.1.	Metal p–tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar	20
3.1.2.	Metal p–tipi Yarıiletken Omik Kontaklar	22
3.1.3.	Schottky Diyotlarda Termoiyonik Emisyonla Akım İletimi	23
3.1.4.	Schottky Engel Yüksekliği Üzerine Etkiler	25
3.1.5.	Schottky Diyotlarda Seri Direnç Etkisi.....	27
3.1.6.	Schottky Engel Diyotların Kapasitesi	29
3.2.	Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemleri.....	31
3.2.1.	Plazma Saçtırma Buharlaştırma Yöntemi.....	32
3.2.2.	Termal Buharlaştırma Yöntemi	33
3.3.	Deneysel İşlemler	35
3.3.1.	Yarıiletkenlerin Temizlenmesi.....	35
3.3.2.	Diyotların Oluşturulması.....	35
3.3.3.	Akım–Gerilim, Kapasite–Gerilim ve Kapasite–Frekans Ölçümlerinin Alınması.....	37

4. BULGULAR VE TARTIŞMA…… 39

4.1. Giriş……..……..... 39

4.2. Akım–Gerilim Ölçümleri……...…….. 39

4.3. Kapasite–Gerilim Ölçümleri……...……. 48

4.4. Kapasite–Frekans Ölçümleri……....…… 52

5. SONUÇ VE ÖNERİLER…….……..... 55

6. KAYNAKLAR…….…..... 57

ÖZGEÇMİŞ…….....…….....……..……..... 69

ÖZET

Ag/ZnO/p–Si YAPISININ ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cihat BOZKAPLAN

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

2011

Yarıiletken ZnO ince filmler elektriksel iletkenliği ve optik geçirgenliği yüksek malzeme olmalarından dolayı teknolojik açıdan pek çok yerde kullanılırlar. Bu sebepten malzemenin üretimi ve teknik açıdan kullanılabilirliğinin ölçümü önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada p–Si üzerine ZnO ince filminin oluşturulması ve Ag metalinin ZnO/p–Si yapısı üzerine buharlaştırılması ile Ag/ZnO/p–Si heteroeklem diyotu elde edildi. Elde edilen yapının doğrultucu kontak özelliği gösterdiği gözlemlendi. Diyotun elektriksel özellikleri oda sıcaklığında akım–gerilim *(I–V)* kapasite–gerilim *(C–V)* ve kapasite–frekans *(C–f)* ölçümleri ile incelendi. Engel yüksekliği, idealite faktörü, ve seri direnç gibi yapının elektriksel parametreleri akım–gerilim *(I–V)* ve kapasite–gerilim *(C–V)* ölçümlerinden belirlendi. Elde edilen sonuçlar literatürde mevcut bulunan ZnO heteroeklem kontaklarla karşılaştırıldı.

Anahtar Kelimeler : ZnO, heteroeklem, engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç

ABSTRACT

ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF Ag/ZnO/p–Si HETEROJUNCTION

MSc THESIS

Cihat BOZKAPLAN

DEPARTMENT OF PHYSİCS
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
UNIVERSITY OF DICLE

2011

As semiconductor ZnO thin films have high electrical conductivity and optical permeability materials used in most position respect of technological. Because of this considers producting of the material and measuring of using respect of technological.

In this study, by forming a thin film of ZnO on p–Si and by evaporating Ag, metal on ZnO/p–Si structure, Ag/ZnO/p–Si heterojunction diode has been obtained. It is observed that structure exhibit a rectifying behavior. The electrical junction properties have been characterized by current–voltage *(I–V)*, capacitance–voltage *(C–V)* and capacitance–frequency *(C–f)* methods at room temperature. The characteristic parameters of the structure such as barrier height, ideality factor and series resistance have been determined from the current–voltage and capacitance–voltage measurements. Obtained results have been compared with available results of ZnO heterjunction contacts in literature.

Key Words: ZnO, heterojunction, barrier height, ideality factor and series resistance.

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge No		Sayfa
Çizelge 1.1.	ZnO'nun 300 K'deki Bazı Özellik ve Değerleri	4
Çizelge 4.1.	Oluşturulan Ag/ZnO/p–Si diyotunun ln*I*–*V* grafiklerinden elde edilen elektriksel parametreleri	41
Çizelge 4.2.	Oluşturulan Ag/ZnO/p–Si diyotunun R_d–*V* grafiği ve Cheung fonksiyonları kullanılarak hesaplanan elektriksel parametreleri	46
Çizelge 4.3.	ln*I*–*V* ve C^{-2}–*V* grafiklerinden hesaplanan engel yükseklikleri	50

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No		Sayfa
Şekil 1.1.	ZnO altıgen vürtzit yapısı	2
Şekil 1.2.	Kübik çinko sülfür (ZnS) yapısı	2
Şekil 3.1.	Metal ve p–tipi yarıiletken ile oluşturulan doğrultucu kontağın (a) kontaktan önce ve (b) kontaktan sonra enerji bant diyagramı	21
Şekil 3.2.	Metal ve p–tipi yarıiletken ile oluşturulan doğrultucu kontaktan sonra; $V \neq 0$ olması durumunda	22
Şekil 3.3.	Metal p–tipi yarıiletken omik kontağın enerji–bant diyagramı a) Kontaktan önce b) Kontaktan sonra ve termal dengede c) $V \neq 0$ olması durumunda	23
Şekil 3.4.	Düz beslem altındaki metal–yarıiletken Schottky kontakta görüntü azalma etkisine ait enerji–bant diyagramı	24
Şekil 3.5.	Görüntü kuvvetinden dolayı potansiyel engelindeki bükülme	27
Şekil 3.6.	Seri direncin *I–V* karakteristiğine etkisi	28
Şekil 3.7.	DC saçtırma sisteminin şematize edilmiş hali	32
Şekil 3.8.	Termal buharlaştırma sisteminin şematize edilmiş hali	34
Şekil 3.9.	ZnO ve Al püskürtme işlemlerinin gerçekleştirildiği vakum sistemi	36
Şekil 3.10.	Termal buharlaştırma sistemi	37
Şekil 3.11.	Ag/ZnO/p–Si yapısı	37
Şekil 4.1.	Ag/ZnO/p–Si diyotuna ait *I–V* grafiği	40
Şekil 4.2	Ag/ZnO/p–Si diyotuna ait R_d–*V* grafiği	45
Şekil 4.3.	Ag/ZnO/p–Si diyotuna ait d*V*/d(ln*I*)–*I* ve *H(I)–I* eğrileri	47
Şekil 4.4.	Ag/ZnO/p–Si diyotunun 500 kHz frekansındaki *C–V* eğrileri	49
Şekil 4.5.	Ag/ZnO/p–Si diyotunun 500 kHz frekansındaki C^{-2}–*V* grafiği	49
Şekil 4.6.	MS yapılarda *I–V* ve *C–V* ölçümleri için potansiyel dalgalanma	51
Şekil 4.7.	Ag/ZnO/p–Si diyoduna ait *C–f* grafiği	54

KISALTMA VE SİMGELER

A	:Diyotun etkin alanı
A^*	:Richardson sabiti
AC	:Alternatif akım
AES	:Auger elektron spektroskopisi
AFM	:Atomik kuvvet mikroskobu
AM1.5	:Hava kitlesi 1.5
C	:Kapasite
C–V	:Kapasite–gerilim
DC	:Doğru akım
DLTS	:Derin seviye geçiş spektroskopisi
DSSC	:Boya duyarlı güneş pili
E_c	:İletkenlik bandının tabanı
E_f	:Fermi enerji seviyesi
E_g	:Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
E_v	:Değerlik bandının tavanı
EL	:Elektrolüminesans
eV	:Elektron volt
ε_s	:Yarıiletkenin dielektrik sabiti
Φ_b	:Schottky engel yüksekliği
Φ_m	:Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	:Yarıiletkenin iş fonksiyonu
χ	:Yarıiletkenin elektron ilgisi
h	:Planck sabiti
I–V	:Akım–gerilim
I_0	:Ters beslem doyma akımı

I_{sc}	:Kısa devre akımı
ITO	:İndiyum kalay oksit
J	:Akım yoğunluğu
k	:Boltzmann sabiti
LED	:Işık yayan diyot
MESFET	:Metal–yarıiletken alan etkili transisitör
m_n^*	:Elektronun etkin kütlesi
MS	:Metal/yarıiletken
MIS	:Metal/yalıtkan/yarıiletken
n	:İdealite faktörü
N_a	:Alıcı konsantrasyonu
N_c	:Yarıiletkenin iletkenlik bandındaki durum yoğunluğu
N_d	:Verici konsantrasyonu
e	:Elektronun yükü
PL	:Fotolüminesans
PLD	:Atmalı lazer biriktirme
PV	:Fotovoltaik
PVD	:Fiziksel buhar biriktirme
R_d	:Diyot direnci
RF	:Radyo Frekans
R_p	:Paralel direnç
R_s	:Seri direnç
RS–MBE	:Radikal kaynak–moleküler demet epitaksi
SCLC	:Sınırlı uzay yükü akımı
SEM	:Taramalı elektron mikroskobu
SZO	:Yarıiletken katkılı çinko oksit
T	:Mutlak sıcaklık

TEM	:Geçirmeli elektron mikroskobu
QDs	:Kuantum noktaları
USP	:Ultrasonik sprey piroliz
UV	:Mor ötesi
XRD	:X ışını kırınımı
V_d	:Difüzyon potansiyeli
V_n	:Yarıiletkenin iletkenlik bandı ile Fermi seviyesi arasındaki fark
V_{oc}	:Açık devre gerilimi
ZnO	:Çinko oksit

1. GİRİŞ

Yüksek iyoniklikleri ve geniş bant aralıklarının, direkt bant aralığı olması; soğurma ve lüminesans için yüksek optik geçirgenlik olasılığına sahip olmaları nedeniyle periyodik tablonun IIB ve VIA grubu elementlerinin birleşimi ile oluşan II–VI bileşiklerine olan ilgi büyüktür. Bu bileşiklere CdS, CdZnS, ZnS ve ZnO gibi bileşikler örnek olarak verilebilir. II–VI bileşiklerinin yasak enerji aralığı 1.8–4 eV civarındadır. Bu bileşikler kızılötesi dedektörler, güneş pilleri, lazerler ve çeşitli diyotların üretiminde oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Fahrenbruch 1977).

Son yıllarda geniş bant aralığına sahip yarıiletken malzemelerin, teknoloji ve elektronik biliminde kullanım alanları genişlemiştir. Bu malzemelerin teknolojide geniş çapta kullanılması nedeniyle, birbirinden üstün yanlarının ve daha ucuz elde edilebilme yollarının araştırılması hız kazanmıştır. ZnO, ZnS, ZnSe, GaAs, GaN gibi yarıiletkenler, yüksek sıcaklık ve yüksek ışıma gücü gerektiren elektronik biliminde LED ve lazer diyotları gibi kısa dalga boylu (UV ve şiddetli mavi–yeşil) ışık yayan optik aletlerde kullanılmakta ve daha iyi sonuçların elde edilebilmesi için araştırılmaktadır (Reynolds ve ark. 1998, Aoki ve ark. 2000, Look ve ark. 2004).

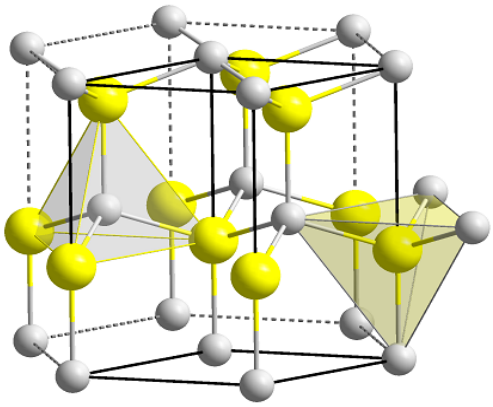
Elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde geçirgen olan geniş bant aralığına sahip yarıiletkenler, elektronik ve optoelektronik aygıtların üretiminde önemli rol oynamaktadır. Geçirgen iletken ve yarıiletken oksitlerin en önemli avantajları kimyasal olarak kararlı olmaları ve farklı altlıklar üzerine kolayca depolanabilmeleridir (Minami 2005).

Fotoelektrik ve optoelektronik uygulamalarda kullanılan aygıtlara dikkat edildiğinde II–VI grubu bileşiklerinin ve bu grup içinde yer alan ZnO ince filmlerin önemi daha rahat anlaşılmaktadır. Katkısız ZnO 3.37 eV gibi geniş bir bant aralığına sahiptir ve n–tipi yarıiletken özelliği gösterir. n–tipi yarıiletken özelliğe sahip olmasına hangi elementin (O boşluğu veya Zn çatlağı) sebep olduğu bilinmemektedir. Yüksek nitelikli ZnO filmler 700 °C'den daha düşük sıcaklıkta büyütülebilir. 60 meV'luk geniş

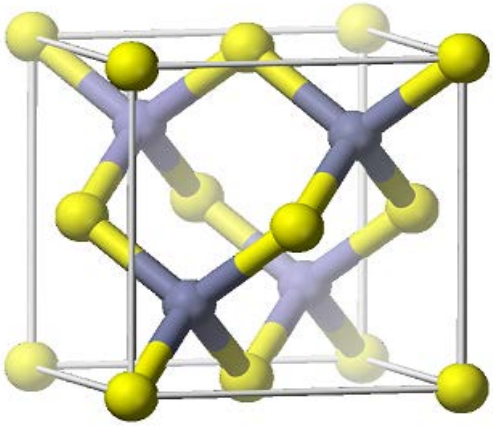
eksiton[1] bağlanma enerjisi, oda sıcaklığında ve daha yüksek sıcaklıklarda, yoğun yakın bant kenarı eksitonik yayınımına izin verir.

ZnO'nun karakteristik hesaplarının yapılması 1935 yılına dayanır. ZnO'nun örgü parametreleri, optik özellikleri ve Raman saçılması gibi teknikler ile titreşimsel özellikleri yıllar önce incelenmiştir (Bunn 1935, Heller 1950, Mohatny 1961).

ZnO üç farklı formda kristallenir. Bunlar altıgen (hegzagonal) vürtzit, kübik çinko sülfür ve çok nadiren de olsa kübik kaya tuzu yapılarıdır. Çevre koşullarında en kararlı yapı vürtzit yapıdır. Vürtzit hegzagonal kristal yapısına sahip ZnO oda sıcaklığında 3.4 eV'luk bir enerji bant aralığına ve 60 meV eksiton bağlanma enerjisine sahip n–tipi bir yarıiletkendir (Xu ve Ching 1993, Look 2001, Gaspar ve ark. 2001).



Şekil 1.1. ZnO altıgen vürtzit yapısı



Şekil 1.2. Kübik çinko sülfür (ZnS) yapısı

Çinko sülfür yapı, kübik yapıya sahip alttaşlar üzerine büyütüldüklerinde kararlı olabilmektedirler. Her iki durumda da çinko ve oksit merkezler düzgün dörtyüzlü yapıdadırlar. ZnO'ya ait vürtzit, kübik çinko sülfür yapılar Şekil 1.1. ve Şekil 1.2.'de gösterilmektedir. Kaya tuzu yapısı sadece yüksek basınç altında gözlemlenebilir. ZnO'nun örgü sabitleri a = 3.25 Å ve c = 5.2 Å'dur. Burada c/a oranı yaklaşık 1.60'dır ki bu oran hegzagonal hücrenin ideal değeri olan 1.633'e çok yakındır (Rossler 1999).

[1] Elektron ve boşluk, aralarındaki Coulomb etkileşmesi nedeniyle, tıpkı hidrojen atomundaki elektron ve proton gibi bağlı duruma geçebilir. Bu bağlı elektron boşluk çiftine eksiton adı verilir. Bir eksiton kristal içinde serbestçe dolaşıp enerji iletebilir. Ancak nötr olduğu için elektrik yükü iletmez.

ZnO piezolektrik[1] yapıya sahip bir malzemedir. Birçok II–VI bileşikleri gibi ZnO'nun bağları fazlasıyla iyoniktir ve bu özellik onun kuvvetli piezoelektrik özelliğini açıklar.

Yarıiletken teknolojisinde yarıiletkenin n–tipi ve p–tipi özelliğine sahip olması aranılan bir özelliktir (Ryu ve ark. 2000, Look ve ark. 2003, Xu ve ark. 2003). ZnO'nun p–tipi yarıiletken haline getirilmesi N, P veya As iyonlarından birisinin yaklaşık milyonda bir oranında katılmasıyla sağlanmaktadır; fakat yeni bir araştırma konusu olduğu için henüz teknolojisi yoktur (Chen ve ark. 2003, Park ve ark. 2003, Jeong ve ark. 2004).

Direk ve geniş bant aralıklı materyal olan ZnO çeşitli elektronik ve optoelektronik uygulamalar için çok çekici bir materyaldir (Reynolds ve Collins, 1969).

Yarıiletken ZnO kristalinin eksiton bağlanma enerjisi (60 meV), teknolojide geniş kullanım alanına sahip diğer yarıiletken malzemelerden (20 meV ZnSe ve 21 meV olan GaN) çok daha büyüktür. Bunun yanı sıra ZnO, ZnSe ve GaN'a göre çok daha düşük sıcaklıklarda hazırlanabilmektedir. Bu yüzden de optoelektronik uygulamalar için son derece önem taşımaktadır. $T_m \approx 2268$ K yüksek erime sıcaklığına sahip ve bozulmaksızın yüksek akım taşıma kapasitesi olan sağlam bir malzeme olup dielektrik sabiti $\varepsilon = 8.5$'tir. (Carlsson 2002).

Teknoloji ve sanayide geniş kullanım alanına sahip olan ZnO aşağıdaki özelliklerinden dolayı daha çok tercih edilmektedir.

i) ZnO'nun eksiton bağlanma enerjisi 60 meV tur. Buradan da ZnO'nun diğer yarıiletkenlerden daha parlak bir ışın yayıcı olduğu anlaşılmıştır. Örneğin uygun bir LED malzemesi için aranılan özellikler şunlardır: uygun enerji bant aralığına sahip olmalı, hem n–tipi hem de p–tipi yarıiletken özelliğine sahip olmalı, kuvvetli ışık yayıcı olmalı, son olarak da etkin radyasyon yayıcı yolları olmalı.

[1] Piezoelektrik özelliği , (özellikle kristaller ve belirli kristaller; kemik gibi) bazı malzemelere uygulanan mekanik stres sonucunda, malzemenin elektrik alan ya da elektrik potansiyel oluşturmasıdır.

Çizelge 1.1. ZnO'nun 300 K'deki Bazı Özellik ve Değerleri

Yoğunluk	5.606 g/cm^3
300 K' deki Kararlı Yapısı	Vürtzit
Erime Noktası	1975 °C
Termal İletkenlik	0.6–1.2 Wcm^{-1} K^{-1}
Lineer genleşme sabiti	a_0=6.5×10^{-6}, c_0=3.0×10^{-6} °C^{-1}
Dielektrik sabiti	8.5
Kırılma İndisi	2.008–2.029
Yasak Enerji Aralığı	3.37 eV
Taşıyıcı Yoğunluğu	<10^6 cm^{-3}
Eksiton Bağlanma Enerjisi	60 meV
Elektron Etkin Kütlesi	0.24

ii) Yarıiletken bir malzemeden görünür bölgede ışın elde edilebilmesi için enerji aralığının ~2 eV veya daha büyük olması gerekir ki ZnO'nun enerji bant aralığı 3.4 eV'dir. (Srikant ve Clarke 1998, Kim ve Park 2001)

iii) Diğer yarıiletkenlerden daha kolay elde edilebilen ve ucuz olan bir malzemedir.

iv) Islak kimyasal işlemlerde kullanılabilir. Örneğin kimyada foto katalizör olarak kullanılır.

v) Yüksek radyasyona maruz kaldığında kusur (defect) oluşum oranı yaygın kullanılan diğer yarıiletkenlere göre daha düşüktür. ZnO uzay ve nükleer uygulamalarda kullanılan olası cihazlar için GaN'dan daha iyi radyasyon direnci gösterir. Bu sebeple radyasyona daha dayanıklıdır. Bu özelliği uzay teknolojisinde ve radyasyon bulunan çevrelerdeki fotonik uygulamalarda önemli kullanım alanı sağlamaktadır (Akkoyunlu 2000, Carlsson 2002).

Tüm bu özellikler ZnO'ya pratikte önemli bir avantaj kazandırmıştır. ZnO piezoelektrik güç çevirici ince filmlerde, yüzey dalga akustik aletlerinde, gaz sensörlerinde, optoelektronik aletlerde, yarıiletken dedektörlerde, LED'lerde, plazma monitörlerde, sıvı kristal ekranlarda, dijital gösterimlerde, lazer teknolojisinde ve görünür bölgede ışık yayan aletlerin yapımı gibi bilinen birçok alanda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Yukarıda belirtildiği gibi birçok alanda kullanılan ZnO'nun özelliklerinin daha iyi incelenebilmesi ve geliştirilebilmesi için, bu çalışmada, malzeme olarak ZnO seçilmiştir.

Uzun süre ZnO üzerine ciddi anlamda çalışmalar yapılmamıştır. Yakın zamanlarda ZnO üzerine yapılan çalışmalarda çok hızlı bir artış olmuş ve son yıllarda ZnO ile ilgili binlerce çalışma yayınlanmıştır. Bu zamana kadar yapılan araştırmalar ile gelinen son nokta, ZnO'nun birçok alanda kullanılan yarıiletken malzemelerden daha üstün yanlarının bulunmuş olmasıdır.

Özellikle son 10 yılda ZnO filmlerin farklı yöntemlerle farklı alttaşlar üzerine büyütülmesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır.

Bacaksız ve ark. (2008) ZnO ince filmleri, 550 °C'de cam yüzeyler üzerine sprey piroliz yöntemi ile çinko klorür, çinko asetat ve çinko nitrat öncülleri kullanarak hazırlamıştır. Çağlar ve ark. (2009) p–Si üzerine sol–jel yöntemi ile oluşturdukları ZnO filmin kırılma indisi özelliklerini, büyüme kinetiğini, oryantasyonunu ve kristal yapısındaki ısı davranışı etkisini incelenmişlerdir. Kim ve ark. (2010) farklı sıcaklıklarda 4H–SiC (0001) alttaşlar üzerine atmalı (pulse) lazer biriktirme (PLD)

tekniği kullanarak epitaksiyel olarak büyütülmüş ZnO ince filmler hazırladılar. Sahoo ve ark. (2010) p–Si (100) yüzeyler üzerine spin kaplama–piroliz tekniği ile ZnO ince filmler ürettiler. Zhang (2010) Yüksek kalitede ZnO filmleri ZnO tohum tabakası yardımıyla silikon ve kuvars cam üzerine sol–jel yöntemi ile hazırlamıştır. Kim ve Kim (2011) Al katkılı ZnO (AZO) ince filmleri, cam üzerine RF magnetron saçtırma yöntemi ile oluşturmuşlardır.

Ayrıca, son yıllarda ZnO tabanlı elektronik ve fotovoltaik aygıtların üretimi ve karakterizasyonu ile ilgili çalışmalara olan ilgi artmaya devam etmektedir.

Zhanga ve ark. (2004) Cu_2O/ZnO/ITO p–i–n heteroeklemini elektrokimyasal biriktirme yöntemi ile oluşturdular. p–Cu_2O/i–ZnO/n–ITO heteroekleminin elektriksel özelliklerini akım–gerilim ölçümleri kullanılarak araştırdılar. Badran ve ark. (2010) metalik çinko tozunu ortama oksijen gazı vererek termal buharlaşma yoluyla p–Si üzerine büyüttüler. Altıgen şeklinde hazırladıkları ZnO nanorodlarla p–Si/n–ZnO heteroeklem diyotunu elde ettiler. Elektriksel ve optiksel özelliklerini incelediler. Yakuphanoğlu ve ark. (2010) Nano küme n–CdO/p–Si heteroeklem diyodunu sol–jel yöntemi ile yaptılar. Nano küme CdO filmin yapısal ve optiksel özellikleri incelediler. Zhu ve ark. (2011) duyarlaştırıcı olarak ZnO fotoanot filmler ve CdS kuantum noktaları (QDs) tabanlı duyarlaştırıcı güneş pilleri ürettiler. Sun ve ark. (2011) p–ZnO:N/nGaN:Si ışık yayan diyotunu (LED) metal organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) tekniği ile c–düzlem safir üzerine ürettiler. Fotolüminesans ve elektrolüminesans özelliklerini karşılaştırdılar. İslam ve ark. (2011) radyo frekans manyetik sıçratma sistemi ile çeşitli kalınlıklarda büyütülen Al katkılı ZnO (Al: ZnO) ince filmlerin elektriksel, yapısal ve optiksel özelliklerini, $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ (CIGS) yapılı güneş pilinde incelediler. Ocak ve ark. (2011) DC saçtırma yöntemi ile elde ettikleri ZnO/p–InP heteroekleminin elektriksel ve fotoelektriksel özeliklerinin analizini yaptılar.

Bu çalışmada p–Si üzerine DC saçtırma yöntemi ile 200 nm kalınlığında ZnO film oluşturulmuş ve daha sonra bu yapı üzerine Ag buharlaştırılarak Ag/ZnO/p–Si yapısı elde edilmiştir. Bu yapının elektriksel özellikleri akım–gerilim, kapasite–gerilim ve kapasite–frekans ölçümleri kullanılarak tayin edilmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Metal–yarıiletken (MS) kontakların geçmişi 1874 yılında Braun'un metal sülfat kristallerinde elektriksel iletkenliğin asimetrik olduğunu bulmasına dayanır. 1906 yılında Pickard, silisyum kullanarak geliştirdiği metal–yarıiletken dedektör patentini almıştır. Daha sonra 1907 yılında Pierce, metal teli ile yarıiletken yüzeyinde nokta kontak şeklinde oluşturduğu diyotların doğrultma karakteristiğinin olduğunu belirlemiştir (Neamen 2003). 1921 yılında ise Richardson, metal–vakum sistemlerinde termoiyonik emisyon olayını açıklamıştır.

MS kontaklarda doğrultma özelliğinin açıklanması ile ilgili ilk çalışma 1931 yılında Schottky, Störmer ve Waibel'in kontakta elektriksel akım aktığı esnada tüm kontak boyunca bir potansiyel düşüşü olacağını göstermeleri ile yapılmıştır. Bu çalışmalardan hemen sonra Wilson (1932) MS diyotlar için, kuantum mekaniksel tünelleme teorisini geliştirmiş ve doğrultma için ters polariteyi açıklamıştır.

1938 yılında Schottky ve Mott birbirinden bağımsız olarak doğrultma mekanizmasının, elektronların potansiyel engeli üzerinden sürüklenme ve difüzyon şeklinde geçişi ile açıklanabileceğini ileri sürmüşlerdir. Schottky–Mott teorisine göre, oluşan potansiyel engelin nedeni metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki nicelik farkıdır. Potansiyel engelin büyüklüğü ise, yine bu modele göre metalin iş fonksiyonu ile yarıiletkenin elektron ilgisinin farkı alınarak elde edilir (Rhoderick ve Williams 1988). Ancak daha sonra yapılan deneyler, Schottky engel yüksekliğinin, metalin iş fonksiyonundan ziyade metal–yarıiletken kontağın hazırlanma yöntemlerine bağlı olduğunu göstermiştir. Elde edilen deneysel sonuçlara göre, bu teorinin eksikliği MS arayüzeyde bir tabakanın varlığını dikkate almamasıydı. Oysa bu tabaka pratikte her zaman mümkündür ve ancak kontağın hazırlanma şartlarına göre kalınlığı ve kimyasal yapısı değişebilir. Başka bir deyişle, çok ince de olsa MS arayüzeydeki bir tabakanın varlığı ve bu tabaka içinde bulunabilecek iyonlar nedeniyle oluşan elektronik arayüzey hal yoğunlukları, yarıiletkene ait Fermi seviyesinin yasak enerji aralığındaki hareketini sınırlandırmaktadır. Schottky–Mott teorisinin yalnızca ideal durumlar için geçerli olacağı ancak daha sonra anlaşılabildi. Bu sonuç üzerine, Bardeen yeni bir model önererek, MS arayüzeyin yeterli sayıda yerel elektronik hallerin olması durumunda,

potansiyel engel yüksekliğinin metalin iş fonksiyonundan bağımsız olacağını söyledi (Wilmsen 1985).

Schottky ve Bethe, 1940 yılında metal–vakum sistemlerindeki iletkenlik ile metal–yarıiletken diyotlardaki iletkenlik arasındaki benzerlikleri ortaya koymuş, iki yıl sonra aynı olayın metal–yarıiletken doğrultuculara da uygulanabileceği Bethe tarafından gösterilmiştir (Bethe 1942).

1947 yılında Bardeen, metal ile yarıiletken arayüzeyinde yalıtkan bir tabaka var olduğunda, bu yalıtkan tabakanın metal ile yarıiletken yüzeylerinde ki dipol tabakasının Fermi seviyesinin konumuna katkısını ortadan kaldırdığını ileri sürmüştür. İkinci Dünya Savaşı döneminde, mikrodalga radarların gelişmesiyle nokta kontak diyotlar tekrar önem kazanmış, daha çok frekans dönüştürücü ve mikrodalga dedektör diyotu olarak kullanılmıştır (Torrey ve Whitmer 1948).

Aynı yıl yükseltmelerinin düşük olması nedeniyle, vakum tüpleri yerlerini metal–yarıiletken doğrultuculara bırakmışlardır. Bu yapılar uzun süre sadece mikrodalga ölçümlerinde kullanılmıştır (Bardeen 1947, Brattain 1948).

1964 yılında Baird, Schottky engelini silisyum transistörle birleştirerek, Schottky engel kapılı metal–yarıiletken alan etkili transistörü (MESFET) bulmuştur (Rideout 1978). Metal–yarıiletken doğrultucu kontakların teorik izahı, pratikteki uygulamalarından yıllar sonra anlaşılabilmiş, gelişmelerin birçoğu metal–vakum sistemleriyle çalışan araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiştir. Schottky etkisi olarak bilinen ve metal–vakum sistemlerinde uygulanan elektrik alandan doğan imaj–kuvvet etkisiyle engelin alçalması olayı, elli yıl kadar sonra Sze ve ark. (1964) tarafından metal–yarıiletken yapılarda doğrulanmıştır.

1966 yılında Crowell ve Sze tarafından Schottky'nin difüzyon ve Bethe'nin termiyonik emisyon teorileri birleştirilerek tek bir teori halinde ortaya konulmuştur. Crowell ve Sze tarafından birleştirilen termiyonik emisyon–difüzyon teorisi ideal Schottky diyotlardaki akım iletim olayında önemli bir yer tutmuştur. Turner ve Rhoderick (1968) kimyasal metotlarla hazırlanan yüzeyler için, engel yüksekliğinin yüzeyin hazırlanma şartlarına bağımlılığını araştırmış ve çok yüksek vakumda yarılmış silisyum üzerine metalin buharlaştırılmasıyla oluşan diyotlar için kullanılan metalin cinsinden bağımsız olarak, engel yüksekliğinin yaşlanmadan etkilenmediğini

bulmuşlardır.

Card ve Rhoderick (1971) arayüzey hal yoğunluğunu belirleyip, arayüzey hal yoğunluğunun ve arayüzey tabakasının *I–V* karakteristiklerinin idealite faktörü üzerine etkilerini açıklamışlardır. Chattopadhyay ve Kumar (1988) metal/SiO_2/p–Si Schottky engel diyotlarında, arayüzey tabakasının tuzak yoğunluğu ve uzay yük yoğunluğunun değerini farklı bir metot kullanarak hesaplamışlardır.

Engel yüksekliğinin homojensizliğinden dolayı idealite faktörü ve engel yüksekliği parametrelerinin diyottan diyota farklılık gösterebileceği, Mönch (1987) tarafından ortaya atılmıştır. Bu durum, Tung (2001) tarafından teorik sonuçlar üzerinde kurulan homojen olmayan Schottky kontakların sayısal simülasyonları ile açıklanmıştır. MS kontakların homojen engel yükseklikleri, Schottky potansiyel engellerinin imaj–kuvvet alçalması da dahil edildiğinde idealite faktörünün (n) karakteristik değeri olan 1.01'e, engel yüksekliklerinin doğrusal bir ekstrapolarizasyonu ile ifade edilmiştir.

Daha sonra ideal ve ideal olmayan diyotlar için Cheung ve Cheung (1986) tarafından, doğru beslem *I–V* karakteristikleri kullanılarak Schottky diyotlarda engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnci hesaplamak için farklı bir hesaplama modeli daha ileri sürülmüştür. Bunların yanı sıra, MS yapılarda seri direnç üzerine birçok çalışma mevcuttur. Seri dirence ilave olarak paralel (shunt) direnç de incelenmiştir (Kaminski ve ark. 1999, El–Adawi ve Al–Nuaim 2002).

Çok itinalı bir üretim yapılmadıkça, metal ve yarıiletken arasında ince arayüzey doğal oksit tabakasının oluşması kaçınılmazdır. Böyle yalıtkan bir tabaka Schottky diyotunu metal–yalıtkan–yarıiletken (MIS) diyotuna çevirir ve bu aratabakanın diyot karakteristikleri üzerinde kuvvetli bir etkisi olabilir. Schottky diyotların arayüzey durumları üzerine ilk çalışma, engel yüksekliğinin, metalin iş fonksiyonu, arayüzey durumları ve aratabaka kalınlığına bağlılığını inceleyen Cowley ve Sze (Szatkowski ve Sieranski 1992) tarafından yapılmıştır. Daha sonra Card ve Rhoderick (1971) arayüzey durumlarının doğru beslem *I–V* verilerinden elde edilen idealite faktörüne etkisini incelemişlerdir. Tseng ve Wu (1987) ise arayüzey durumlarının Schottky kontakların elektriksel davranışları üzerine etkilerini incelemişlerdir. Onlardan bağımsız olarak Horvath

(1998) Card ve Rhoderick'in çalışmalarını genişletmiş ve arayüzey durum enerji dağılımı ve arayüzey tabaka kalınlığının ters ve düz beslem *I–V* karakteristiğinden elde edilebileceğini göstermiştir.

Türüt ve arkadaşları (1992) arayüzey oksit tabakalı ve arayüzey tabakasız Al/p–Si Schottky diyotlarında arayüzey halleri ve arayüzeydeki sabit yükleri dikkate alarak, *I–V* ve *C–V* karakteristiklerini inceleyip, engel yüksekliği, idealite faktörü ve arayüzey durum yoğunluklarını tespit etmişlerdir. Arayüzey hallerinin, metal–yarıiletken kontaklarda ters besleme karşı ölçülen $1/C^2–V$ grafiğinde bükülmeye sebep olup, *C–V* karakteristiklerini etkileyebileceği Szatkowski ve Sieranski (1992), tarafından deneysel sonuçlarla gösterilmiştir. Türüt ve Sağlam (1992), metal–yarıiletken kontaklarda arayüzey hal yoğunluğunu ve bunun sebep olduğu artık sığayı deneysel olarak incelemişler ve bu sığanın frekansın artmasıyla azaldığını, yani arayüzey hal yoğunluğunun artan frekansla azaldığını izah etmişlerdir.

Akkılıç ve ark. (2003) arayüzey tabakalı ve arayüzey tabakasız Sn/n–Si Schottky diyot yapılarının *I–V* karakteristiklerini incelemişlerdir. İdealite faktörünün uygulanan gerilimle ve etkin engel yüksekliğinin de idealite faktörüyle değişimini teorik ve deneysel olarak araştırmışlardır.

Lee ve ark (2004) p–tipi Si alt tabanlar üzerine depolanan ZnO ince filmlerin oluşum mekanizması araştırdılar. ZnO/Si heteroyapılarının oluşumunu karakterize etmek için Auger elektron spektroskopisi (AES, Auger Electron Spectroscopy), ZnO ince filmlerin kristalizasyonunu araştırmak için X–ışın kırınımı (XRD, X–ray diffraction) ve ZnO/p–Si (100) mikroyapısal özelliklerini araştırmak için geçirmeli elektron mikroskobu (TEM, Transmission Electron Microscope) sonuçlarını kullanarak filmlerin oluşum mekanizmalarını tanımladılar. Auger elektron spektroskopisi (AES) sonuçları yüzeyde çinko, oksijen ve karbon 70 nm derinlikte ise çinko ve oksijen bulunduğunu göstermiştir. X–ışın kırınımı (XRD) sonuçlarından kuvvetli bir c ekseni yönelimi, geçirmeli elektron mikroskobu (TEM) sonuçlarından da ZnO ve Si arayüzeyinde amorf bir tabakanın bulunduğu gözlenmiştir. Bu sonuçlar, c eksen yönelimli ZnO ince filmlerin amorf ara yüzey üzerine büyütüldüğü için, yüzey enerjisi etkisinin, Si alt tabanı ve ZnO ince filmi arasındaki ara yüzey enerjisinden daha baskın

olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle de amorf tabakanın varlığına bakılmaksızın, c ekseni yönelimi oluşumuna yüzey enerjisinin minimizasyonunun öncülük ettiği sonucuna varmışlardır.

Han ve ark. (2005) p–tipi Si alt tabanlar üzerine RF magnetron saçtırma yöntemi ile biriktirilen ZnO ince filmlerin optik ve elektronik özelliklerine tavlamanın etkisini araştırmışlardır. X–ışını kırınımı (XRD) sonuçları, p–Si (100) üzerine büyütülen ZnO filmlerin kristalliğinin tavlama işlemiyle arttığını ortaya çıkarmıştır. Ayrıca tavlanmış ve tavlanmamış örneklerin her ikisinde de (0001) kristal doğrultusunda c ekseni yönelimini gözlemişlerdir. Tavlama sonrası PL spektrumundan serbest eksiton ve derin seviye lüminesans (Deep–Level Luminescence) piklerini gözlerken tavlanmamış örneklerde herhangi bir lüminesans piki gözlememişlerdir.

Ievtushenko ve ark. (2010) kat kat büyütme metodu kullanarak radyo–frekans magnetron saçtırma yöntemi ile üç katmanlı ZnO filmleri Si üzerine biriktirdiler. Raman saçılması konfokal analizi ile film biriktirmede ZnO tabaka sayısının artırılmasının ZnO film kalitesini geliştirdiğini doğruladılar. ZnO filmleri İTO/cam yüzeyler, c–Al_2O_3, Si, SiNx/Si ve cam üzerine homoepitaksiyal şekilde büyüterek elde ettiler. Film kalitesini artırmak amacıyla beş tabakadan fazla biriktirme yaptılar. Beş katlı ZnO filmlerin büyütülme kalitesini taramalı elektron mikroskobu (SEM), X–ışını kırınımı (XRD) ve geçirgenlik ölçümleri ile incelediler. XRD sonuçları beş katlı ZnO filmlerin (002) yapısında olduğunu göstermiş ve XRD diyagramlarından elde edilen kırınım piki beş katlı ZnO filmlerin yüksek kalitesini ortaya çıkarmıştır. SEM sonuçları ZnO filmlerin biriktirilmesinde çatlak ve kusurların olmadığını göstermiştir. Geçirgenlik ölçümü sonuçları ise ZnO filmlerin saydam yüzeylerde biriktirilmesinin, spektrumun görünür bölgesinde yüksek optiksel iletim ve hızlı absorbsiyon özelliğine sahip olduğunu göstermiştir.

Duan ve ark. (2011) ZnO filmleri n–Si (100) yüzeyine 40 W'tan az güç uygulayarak radyo frekans magnetron saçtırma yöntemi ile biriktirdiler. Sonra Ag katkılı ZnO (SZO) filmleri 100 W'tan daha yüksek saçtırma gücü uygulayarak Si üzerine biriktirdiler. SZO filmlerin yapısal, elektriksel ve optik özelliklerine ZnO tabakasının yaptığı etkiyi araştırdılar. ZnO tabakasının üç boyutlu büyüme sürecini incelediler. P–SZO/n–Si heteroeklem enerji bant diyagramını Anderson'un modeline

göre şekle döktüler. Elde ettikleri sonuçlar ZnO tabakasının zayıf derin seviye emisyonuna, iyi doğrultma davranışına, daha düşük arayüzey durum yoğunluğuna, büyük tane boyutuna, pürüzsüz yüzeye, yüksek taşıyıcı mobilitesine ve SZO filmin daha iyi özellikler göstermesine neden olduğunu göstermiştir. Bunun sebebi de SZO ve Si arasındaki büyük örgü uyumsuzluğunun neden olduğu kısmi baskıyı ZnO tabakasının etkili bir şekilde azaltmasıydı.

Çinko oksit (ZnO) yüksek elektriksel ve optik geçirgenliğe, düşük bant aralığına sahip olması nedeniyle gaz sensörleri, LED (Light Emitting Diode), foto direnç gibi opto–elektronik cihazların yapımında tercih edilen bir materyal olmuştur. Bu özelliklerinden dolayı ZnO üzerinde çalışıldığı ilk zamandan bu yana çeşitli üretim yöntemleri kullanılarak kullanım amaçlarına hizmet edecek biçimde, en kaliteli ve en ucuz olacak şekilde üretilmeye çalışılmıştır.

ZnO ile Schottky kontak ilk kez Mead (1965) tarafından duyuruldu.

Neville ve Mead (1970) n–tipi ZnO yüzeyi üzerine Au ve Pd çöktürerek 15 dk yoğunlaştırılmış fosforik asitte beklettikten sonra organik çözücülerde durulayarak ve yoğunlaştırılmış HCl'de beş dakika bekleterek yapının idealite faktörlerini (n=1.05) ideale yakın değerler buldular. Au ve Pd için engel yüksekliğinin sırasıyla 0.71 eV ve 0.65 eV olduğu belirlediler. Ancak, elde ettikleri sonuçlar çok ayrıntılı bulgular içermiyordu.

ZnO filmlerin karakterizasyonu ve ZnO ile yapılan elektronik ve optik aygıtlar üzerine çalışmalar özellikle son 10 yılda hızlı bir şekilde artmaya başlamış ve son birkaç yılda birçok çalışmanın ilgi odağı olmuştur.

Akane ve ark. (2000) özellikle dar eklem ve alçak gerilim cihazları için düşük kontak direncine sahip alaşımsız omik kontak tercih ettiler. In tabanlı alaşımsız omik kontağı hidrotermal yolla büyütülen n–tipi ZnO'nun üzerine oluşturdular. Arayüzey tepkilerinden elde edilen sonuçlar düzgün metal–yarıiletken arayüzeylerin sağlandığını göstermiştir.

Kim ve ark. (2001) tavlanmış n–tipi ZnO tabakaya Ti/Au kontağı yaptılar ve yapının *I–V* karakteristiklerini incelediler.

Tüzemen ve ark. (2001) yaptıkları çalışma ile saçtırma plazmasında oksijen argon oranını ayarlayarak tavladıkları ZnO filmlerin n tipinden p tipine dönüştürülebileceğini gösterdiler. Bu şekilde fabrikasyonu yapılan p–n eklemlerinin özelliklerini ve Hall ölçümleri ile filmlerde taşıma karakteristiklerini incelediler. Omik kontakları Au/Al filmlerini çöktürerek oluşturdular. Saçtırma plazması ile ayrıştırılan oksijenin entalpi oluşum hesaplamalarını yüksek kimyasal potansiyelde aldılar. Entalpi oluşum hesabında moleküler oksijenle karşılaştırılan bu hesaplamalar saçtırma yöntemi ile oluşturulan asal ZnO'da p tipi iletkenliğin kusur oluşum entalpisi hesabına uyduğunu göstermiştir.

Lee ve ark. (2002) n–ZnO/p–Si heteroeklem fotodiyotlar oluşturdular. Fotodiyotları, Ar ve O_2'den 06:01 oranında kullanarak 300 °C, 480 °C ve 550 °C gibi çeşitli sıcaklıklarda p–Si yüzeylere RF saçtırma yöntemi ile ZnO filmleri kaplayarak ürettiler. Akım–gerilim (*I–V*) ölçümü ile karakterizasyonlarını yaptıkları diyotların birçoğunun tipik doğrultucu davranışlar gösterdiğini gözlemlediler. Diyotların bazıları 670 nm dalga boyunda monokromatik kırmızı ışık altında fotoelektrik etki gösterdiler. 480 °C'de ZnO film ile kapladıkları bir diyottan ters beslem altında % 53 maksimum kuantum verimi elde ettiler. X–ışını fotoelektron spektroskopisi ile n–ZnO/p–Si arayüzeyini karakterize ettiler ve ZnO filmlerin fotolüminesans geçirgenlik ölçümlerini yaptılar. 480 °C'de n–ZnO ile yapılan diyotların çok iyi fotoelektrik özelliği göstermesi için yüksek kaliteli film ve iyi eklem arayüzeyi gerektiği sonucuna vardılar.

Schottky kontakların termal kararlılıkları kapsamlı olarak çalışılmamakta iken Polyakov ve ark. (2003) Au ve Ag Schottky kontaklarının engel yüksekliğini ve termal kararlılıklarını n–tipi ZnO ve katkısız Zn kullanarak incelemiştir.

Romero ve ark. (2004) (100) düzlemine sahip n–tipi ve p–tipi monokristal silisyum yüzeylerde kimyasal sprey piroliz yöntemi ile oluşturulan n–ZnO/c–Si heteroeklemlerin elektriksel, yapısal ve düzensel özelliklerini 223 K ve 373 K sıcaklık aralığında *C–V* ölçümleri ve giriş spektroskopisi yöntemi ile incelediler. n–ZnO/c–Si heteroeklemlerin, Si ve ZnO'nun iş fonksiyonlarının arasındaki enerji farkına uygun bir engel yüksekliği gösterdiğini gördüler. n–ZnO:Al/c–Si arayüzeyi yakınında oluşan kusurlar değişen (çivileme) bir Fermi enerjisine neden olmuştur. Bundan dolayı n–ZnO:Al/c–Si heteroeklemler daha karmaşık bir davranış sergiler.

MOCVD ile büyütülen ZnO film ile Ag Schottky kontak yapıldı. Oda sıcaklığında Schottky engel yükseklikleri *I–V–T* ve *C–V* ölçümleri ile 0.89 eV ve 0.92 eV olarak belirlendi. Sıcaklık 265 K'den 340 K'e çıkarılınca idealite faktörünün 1.37'den 1.29'a düştüğü görüldü. Bu yüksek idealite faktörünün, yüzey durumları ve arayüzey tabakalarından kaynaklandığına karar verildi (Sheng ve ark. 2002, Oh ve ark. 2005).

Chaabouni ve ark. (2006) n–ZnO/p–Si heteroeklem elde etmek için p–Si yüzeylere RF magnetron saçtırma yöntemi ile ZnO filmler biriktirdiler. 25 °C, 100 °C, 200 °C, 300 °C ve 400 °C sıcaklıklarında farklı alttaşlar kullandılar. Eklemin elektriksel özelliklerini akım–gerilim (*I–V*) ve kapasite–gerilim (*C–V*) ölçümleri ile belirlediler. Engel yüksekliğini klasik $1/C^2–V$ karakterizasyonundan ve karanlıkta alınan *I–V* ölçümlerinden 0.7 eV olarak hesapladılar. Ayrıca optik spektrum, farklı yüzey sıcaklıkları ile büyütülen ZnO filmlerin yansımasının, UV ve görünür bölgede katkısız silikondan daha düşük olduğunu gösterdi. Yüksek yüzey sıcaklıklarında büyütülen filmler yansıma kayıplarını minimuma indirdiği için Si tabanlı optoelektronik cihazlarda yansıma önleyici olarak kullanılması sonucuna vardılar.

Elektronik ve fotonik uygulamalarda, yapımında ZnO kullanılan malzemelerin önündeki en önemli engel p–tipi katkının ve ZnO p–n eklemlerinin sentezinin zorluğudur. Zhang ve ark. (2005) ZnO'ya p–tipi katkı sorununu gidermek için, azot ve alüminyum (N–Al) ile katkılanmış ZnO filmleri ultrasonik sprey piroliz tekniği ile hazırladılar. Büyütülen ZnO filmlerinin yapısal, optiksel ve elektriksel özelliklerini X–ışınları kırınımı (XRD), fotolüminesans (PL) spektrumu, Hall etkisi ve Seebeck etkisi ölçümleri ile incelediler. Sonuçlar son derece mükemmel p–tipi iletime ve iyi ultraviyole emisyon özelliklerine sahip olduğunu göstermiştir. N–Al ile katkılanmış ZnO tabakaların üzerine katkılanmamış ZnO tabakaları ile oluşturulan p–n ekleminin, akım–gerilim (*I–V*) özelliklerinden yapının 2.5 V eşik gerilimine ve doğrultucu özelliğe sahip olduğunu gördüler.

Zhang ve ark. (2006), p–tipi tek–kristal silisyum yüzeyler üzerine sol–jel işlemi ile Nanokristalin çinko oksit (nc–ZnO) filmler oluşturarak nc–ZnO/p–Si heteroeklemler imal ettiler. ZnO filmlerin yapı ve morfolojisini, X–ışını kırınımı (XRD) spektroskopisi ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile analiz ettiler. Bunun sonucunda ZnO filmlerin

altıgen vürtzit yapıya sahip olduğunu ve 50–100 nm kalınlığındaki polikristal nano parçalar oluştuğunu tespit ettiler. nc–ZnO/p–Si heteroeklemlerin elektriksel taşıma özelliklerini, sıcaklığa bağlı akım–gerilim (*I–V*) ölçümleri ile kapasite–gerilim (*C–V*) ölçümleri ile incelediler. Sıcaklığa bağlı *I–V* özellikleri gösterdi ki düz beslemde iletim çoklu adım tünelleme akımı ile belirleniyordu ve doyma akımının aktivasyon enerjisi 0.26 eV civarında idi. $1/C^2$–*V* grafiği eklemin tutarsız ve difüzyon potansiyelinin oda sıcaklığında 1.49 V olduğunu göstermiştir.

Hazra ve Basu (2005) ZnO p–n eklemini şu şekilde yaptılar. Önce cam yüzey üzerine konvansiyonel DC saçtırma yöntemi ile n–tipi ZnO filmler oluşturdular. Üzerine de yenilikçi CVD yöntemi ile p–tipi ZnO ince filmler biriktirdiler. Yarıiletkenin elektriksel parametreleri, oda sıcaklığında Hall etkisi ölçümleri ve direnç etkisi ile tespit ettiler. ZnO p–n ekleminin *I–V* ölçümlerini 30 °C, 300 °C ve 400 °C'de aldılar. Yapının doğrultucu özelliklerini de çizilen *I–V* eğrilerinden gözlediler. Düz beslemde idealite faktörü, doyma akımı ve engel yüksekliğini sıcaklığın bir fonksiyonu olarak hesapladılar. Eklem özelliklerinin geliştirilmesini, sıcaklık artışı ile idealite faktörü değerindeki azalmadan gözlediler. Eklemin enerji bant diyagramını, bantlar arası taşıyıcı tünelleme mekanizmasını açıklamak için kullandılar.

El–Shaer ve ark. (2007) n–ZnO/p–4H–SiC heteroeklem diyotların karakterizasyonunu ve büyütülmesini incelediler. n–ZnO katmanlarını p–4H–SiC üstüne radikal kaynak–moleküler demet epitaksi (RS–MBE) tekniği ile büyüttüler. Önce n tipi 4H–SiC levhaları üzerine kimyasal buharlaştırma (CVD) yöntemini kullanarak yatay sıcak duvar reaktörü hazırladılar. 4H–SiC levha üzerine oluşturulan n–ZnO'nun bilgilerini, p–n yapıların niteliğini, tabakaların kalitesini incelediler. Ardından Mesa diyot yapılarını ürettiler. Al, çapı 1 mm olan bir daire maskeye doğru saçtırıldı ve omik kontak oluşturmak için p–SiC yapısı tavlandı. El–Shaer ve ark. (2007) n–ZnO omik kontakları, elektron demeti buharlaştırma tekniği ile 30 nm/300 nm Ti/Au saçtırarak oluşturdular. Elde edilen yapıların elektriksel özelliklerini Hall ölçümleri ve akım–gerilim (*I–V*) ölçümleri ile incelediler. *I–V* ölçümlerinden diyotun doğrultucu özelliğe sahip olduğunu saptadılar ve eşik gerilimini yaklaşık 2 V olarak buldular.

Aydoğan ve ark. (2009) geniş bant aralığına sahip yarıiletken n–tipi ZnO ince filmi elektrokimyasal biriktirme tekniği ile n–tipi Si yüzey üzerine oluşturdular ve

yapının akım–gerilim (*I–V*) ve kapasite–gerilim/frekans (*C–V/f*) ölçümlerini oda sıcaklığında aldılar. Engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç gibi yapının karakteristik parametrelerini akım–gerilim ölçümleri ile belirlediler. *I–V* grafiklerinin yardımıyla Cheung fonksiyonları ve Norde (1971) yöntemini kullanarak Schottky kontağının elektriksel parametrelerini hesapladılar. Düz beslemin yüksek değerlerinde tamamen tuzaklanmış sınırlı uzay yükü (SCLC) akımının iletim mekanizmasının baskın olduğunu gördüler. *C–f* ölçümlerinden yüksek frekanslarda kapasitenin hızla azaldığını gördüler. Düşük frekanslarda gözlenen yüksek kapasite değerlerini, denge durumunda arayüzey durumlarından kaynaklanan aşırı kapasiteye ve ZnO'nun alternatif akım (AC) sinyalini takip edebilmesine atfetmişlerdir.

Majumdar ve Banerji (2009) p–ZnO/n–Si ince film heteroeklemini n–tipi Si yüzeyi üzerine atmalı lazer biriktirme (PLD) tekniği ile oluşturdular. Eklem materyalinin ve yüzey morfolojisinin kristalinitesini (saydamlığı) taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve geçirmeli elektron mikroskobu (TEM) ve X ışını difraktometresi (XRD) ile incelediler. p–n heteroyapıların akım–gerilim (*I–V*) karakteristikleri ile lineer olmayan diyot davranışını gözlemlediler. Azot kaynağı olan üre ile katkılanan Çinko oksit p–tipi iletkenlik göstermiş ve daha fazla nem algılama yeteneğine sahip olmuştur. Heteroyapıların nem hassasiyeti, boşluk konsantrasyonunun azalması nedeniyle direnç artışı göstermiştir. Böylece azot katkılı ZnO filmlerde p–tipi iletkenlik tespit ettiler. Azot katkılı p–ZnO/n–Si ince film heteroekleminin normal atmosferik sıcaklık ve basınçta sırasıyla tepki ve düzelme süreleri 12 s ve 36 s olduğunu tespit ettiler. % 30–% 97 aralığında bağıl nem (RH) ile direncin hemen hemen doğrusal değişim gösterdiğini gördüler.

Quemener ve ark. (2011) p–tipi Si ve Al katkılı ZnO arasındaki arayüzeyin elektronik özelliklerini incelediler. 300 nm kalınlığında ZnO filmleri (Al) DC magnetron saçtırma yöntemi ile oda sıcaklığında biriktirdiler. Ve daha sonra 100 °C–400 °C sıcaklık aralığında, ısıl işleme tabi tuttular. Akım–gerilim (*I–V*), kapasite–gerilim (*C–V*) ve derin seviye geçiş spektroskopisi (DLTS) ölçümlerini heteroyapıların elektriksel özelliklerini karakterize etmek için kullandılar. *I–V* ölçümlerinden yapının diyot gibi doğrultucu özellik gösterdiğini anladılar. Ancak, 200 °C'nin üzerindeki tavlamada, tükenme bölgesindeki rekombinasyonun arttığını gözlediler. Bu durumu arayüzey taşıyıcı konsantrasyonunun artışına ve kusur

oluşumuna bağladılar. Biri değerlik bandının üzerinde 0.38 eV değerinde diğeri de 250 ^{o}C üstü ısıl işlem sırasında 0.43 eV civarında oluşan bu iki önemli kusuru DLTS yöntemi ile saptadılar.

Sun ve ark. (2011) p–ZnO:N/n–GaN:Si heteroeklemini metal organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) tekniği ile c–düzlem safir üzerine ZnO biriktirerek ışık yayan diyot (LED) ürettiler. 8.94×10^{16} cm^{-3} boşluk konsantrasyonuna sahip p–tipi N_2O tabakasını, plazma ortamında tavladılar ve NH_3 kullanılarak azot katkılı ZnO oluşturdular. 1.15×10^{18} cm^{-3} elektron konsantrasyonlu silikon katkılı GaN filmi n tabakası olarak kullanıldı. Yapının akım–gerilim (*I–V*) eğrisinden, istenilen doğrultucu davranışı tespit ettiler. Düz beslemde eşik gerilimini yaklaşık 4 V ve ters beslemde kırılma (çığ) gerilimini 7 V'tan daha büyük buldular. Düz beslem altında oda sıcaklığında UV ve EL spektrumu ölçümlerini aldılar.

Shen ve ark. (2010) n–ZnO/p–Si heteroeklem arayüzey yapısı ile bir tür güneş pilini DC manyetik sıçratma yöntemi kullanarak ürettiler. Yapının fotovoltaik (PV) özelliğini AM1.5 aydınlatma altında akım–gerilim (*I–V*) ölçümlerini kullanarak incelediler. *I–V* eğrilerinin güçlü düz besleme bağlı olarak değiştiğini gördüler ve fotoelektrik dönüşüm verimini % 0.7–% 1.14 olarak hesapladılar. Açık devre geriliminin en büyük değerini ve kısa devre akımını sırasıyla 400 mV ve 17.27 mA/cm^2 civarında buldular. *I–V* eğrilerinden, gerilime bağlı olarak arayüzey durumlarının katkısı ile birleşme akımının arttığını gözlemlediler. ZnO/p–Si arayüzeyinde aldıkları Si 2p spektrumu ile arayüzey kalitesinin karmaşıklığını ve çok sayıda arayüzey durumlarının varlığını doğruladılar. ZnO/p–Si tabanlı güneş pilinden iyi bir performans elde etmek için engel yüksekliğindeki artışın ve seri direncin 50 Ω'un üzerinde olmasının oldukça önemli olduğunu karanlıktaki *I–V* ölçümlerinden anladılar.

Sharma ve ark. (2011) Nanokristal çinko oksit ince filmleri FTO kaplamalı cam yüzeyler üzerine sulu çinko asetat [$Zn(CH_3COO)_2\bullet2H_2O$] çözeltisi ile elektroduyarlı bir şekilde ürettiler. Filmleri organik yüzey kullanarak ve organik yüzey kullanmadan PVA (poli vinil alkol) ve SDS (sodyum dodesil sülfat) gibi iki farklı elektrokimyasal banyodan geçirdiler. Boya duyarlı güneş pilinin (DSSC) özelliklerinden ve kristal boyutundan etkilenen yüzey morfolojisinin şekillenmesinde organik yüzeylerin önemli bir rol oynadığını saptadılar. Organik yüzey olmayan filmlerde tane boyutunu ~150 nm

gözlerlerken; SDS yapılı filmlerde dikey hizalanmış ince ve sıkı paketlenmiş altıgen kristaller gözlediler. ZnO:SDS:Dye (Boya) ve ZnO:PVA:Dye (Boya) ince filmlerinin dönüşüm verimlerini sırasıyla % 0.49 ve % 0.27 olarak hesapladılar.

Zhu ve ark. (2011) duyarlaştırıcı olarak ZnO fotoanot ve CdS kuantum noktaları (QDS) kullanarak duyarlı güneş pili ürettiler. Hem ZnO filmleri hem CdS kuantum noktalarını ultrasonik sprey piroliz (USP) depolama tekniğini kullanarak hazırladılar. Bu metodla ısıl işleme gerek kalmadan CdS QDs ve ZnO filmleri arasında kolay ve hızlı çökelme sağladılar. Pillerin fotovoltaik performanslarını incelediler. Sonuçlar kısa devre akım yoğunluğunun (6.99 mA/cm^{-2}) maksimuma ulaştığını ve enerji dönüşüm veriminin % 1.54 olduğunu göstermiştir.

3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada metal–metal oksit yarıiletken heteroeklem yapı elde edilmiştir. Bu yapının elektriksel karakterizasyonunun gerçekleştirilebilmesi için plazma saçtırma yöntemi ile ZnO ince filmi p–Si yarıiletken üzerine oluşturulmuş ve elde edilen ZnO/p–Si üzerine Ag metali buharlaştırılarak Ag/ZnO/p–Si yapısı oluşturulmuştur. Elde edilen yapının elektriksel karakterizasyonu bu yapıya ait akım–gerilim, kapasite–gerilim ve kapasite–frekans ölçümleri ile gerçekleştirilmiştir.

Bu bölümde, önce metal yarıiletken kontakların fiziğinden, metal–yarıiletken kontaklardaki termoiyonik iletim mekanizmasından, ayrıca bu kontakların fiziksel parametrelerini etkileyen faktörlerden ve bu yapıların kapasite özelliklerinden bahsedilmiştir.

Bölüm sonunda ise gerçekleştirilen tüm deney basamakları sırasıyla anlatılmıştır.

3.1. Metal–Yarıiletken Kontaklar

İki farklı madde kontak haline getirildiğinde maddeler arasındaki yük alışverişi ile yeni bir yük dağılımı meydana gelir. Bu yük alışverişi, iki madde arasında termal dengenin bir sonucu olarak her iki maddenin Fermi enerji seviyeleri aynı hizaya gelinceye kadar devam eder (Ziel 1968). Bu durum iki metal arasında olduğu gibi, metal ile n–tipi veya p–tipi yarıiletkenler arasındaki kontaklarda da geçerlidir. Metal–yarıiletken kontaklar, metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına ($\Phi_m - \Phi_s$) bağlı olarak omik kontak ve Schottky (doğrultucu) kontak olarak iki kısımda incelenir ve bütün yarıiletken tabanlı devre elemanlarının oluşumunda yer aldıkları için büyük bir öneme sahiptirler. Bu bölümde metal–yarıiletken yapıların oluşumu, bu yapılarda gerçekleşebilecek yük taşınım mekanizmaları ve bunlara bağlı olarak bu yapıların elektriksel karakterizasyonlarının nasıl yapılacağı incelenecektir.

Bir metal ile bir yarıiletken, aralarında başka bir madde olmaksızın kontak durumuna getirildiklerinde meydana gelen yeni sistem, metal–yarıiletken kontak diye

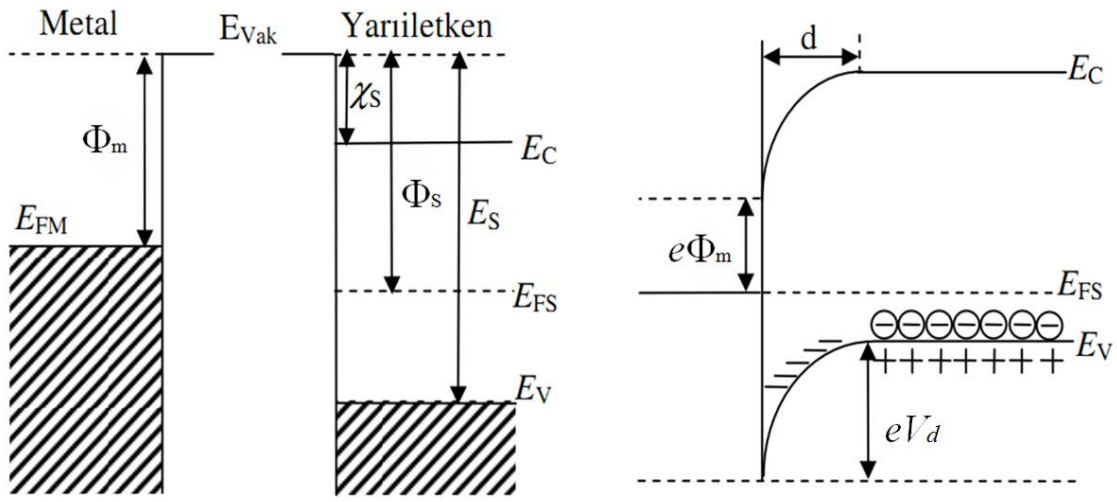
adlandırılır. Teorik olarak p–tipi yarıiletken kontaklarda $\Phi_m \langle \Phi_s$ ise, doğrultucu kontak eğer $\Phi_m \rangle \Phi_s$ ise, omik kontak oluşur. n–tipi yarıiletken kontaklarda ise $\Phi_m \rangle \Phi_s$ durumunda doğrultucu kontak ve eğer $\Phi_m \langle \Phi_s$ durumunda ise omik kontak oluşur. Şekil 3.1.'de bir metal ve p–tipi yarıiletken ile oluşturulan doğrultucu kontağın enerji bant diyagramı gösterilmektedir.

3.1.1. Metal p–tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar

Bir metal, bir yarıiletken ile kontak haline getirildiğinde, bu iki madde arasında yüklerin yeniden dağılımı vuku bulur. Yük dağılımı, her iki maddenin Fermi seviyeleri (elektrokimyasal enerji) aynı düzeye gelinceye kadar devam eder ve denge durumuna ulaşılır. Bir metal yarıiletken kontakta yük taşıyıcıları (boşluk ve elektronlar) bir doğrultudan diğer doğrultuya göre daha kolay geçebiliyorsa, bu bir doğrultucu kontaktır. Bu da doğrultucu kontakta bir doğrultudaki akımın diğer doğrultuya göre daha kolay geçtiğini göstermektedir. Φ_m; metalin iş fonksiyonu Φ_s; yarıiletkenin iş fonksiyonu ve E_s ise valans bandının tepesi ile vakum seviyesinin tabanı arasındaki fark olsun. Eğer $\Phi_m \langle \Phi_s$ ise kontak doğrultucu, $\Phi_m \rangle \Phi_s$ ise kontak omik olacaktır.

Şimdi birinci durumu göz önüne alalım. Yani $\Phi_m \langle \Phi_s$ olsun ve oda sıcaklığında akseptörlerin hepsi iyonize olmuş olsun. Kontaktan önce, (Şekil 3.1.) yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\Phi_s - \Phi_m$ kadar aşağıdadır. Kontaktan sonra, metal ve yarıiletkenin Fermi seviyeleri aynı hizaya gelinceye kadar (Şekil 3.1.b) metalden yarıiletkene elektron akışı meydana gelir. Bunun neticesinde yarıiletken tarafındaki holler, bu elektronlardan dolayı iyonize olurlar. Yarıiletkenin yüzey tabakasındaki bu negatif yüklü iyonize olmuş akseptörler *d* kalınlığındaki bir uzay yük tabakası içerisinde dağılırlar. Yarıiletken gövdedeki enerji seviyeleri $\Phi_s - \Phi_m$ kadar yükseldiğinden, yarıiletken tarafındaki holler için yüzey engeli;

$$eV_d = \Phi_s - \Phi_m \qquad (3.1)$$



Şekil 3.1. Metal ve p–tipi yarıiletken ile oluşturulan doğrultucu kontağın (a) kontaktan önce ve (b) kontaktan sonra enerji bant diyagramı

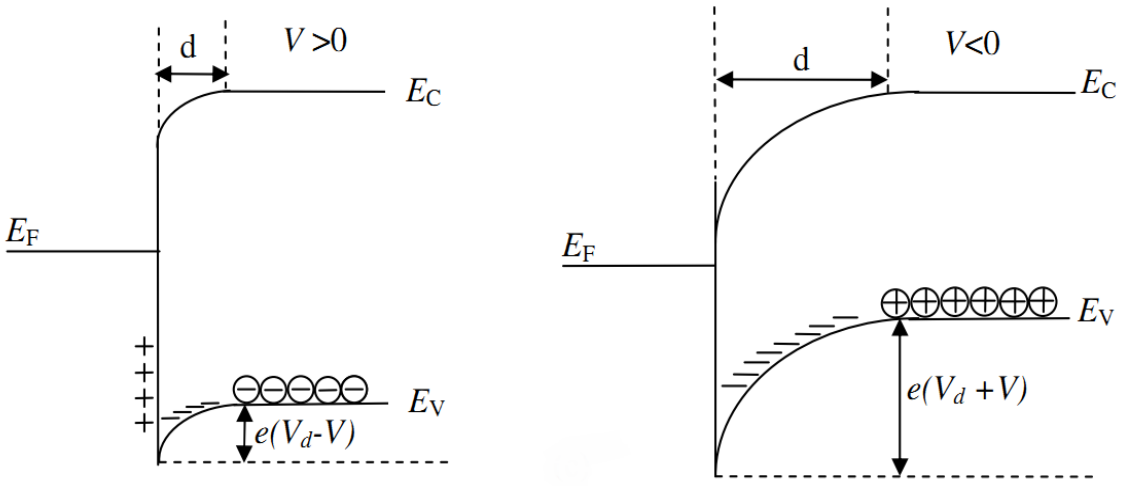
olur. Burada V_d, difüzyon potansiyelidir. Yarıiletken içerisindeki bu potansiyel, metalin yüzeyine göre alınır. Kontağın metal tarafındaki holler için engel yüksekliği;

$$e\Phi_b = E_s - \Phi_m \tag{3.2}$$

olur.

Termal uyarılmadan dolayı, yarıiletkendeki bazı holler potansiyel engelini aşacak kadar enerji kazanıp, metalin içine geçebilirler. Aynı şekilde metalde termal olarak oluşan bazı holler de engeli aşacak kadar enerji kazanıp, yarıiletken içine geçebilirler. Böylece kontakta engelden geçen zıt yönlü iki I_0 akımı oluşur. Eğer yarıiletkene bir V gerilimi uygulanırsa (Şekil 3.2.) soldan sağa akan hol akımı değişmez, fakat sağdan sola akan hol akımı $\exp(eV/kT)$ çarpanı kadar değişir. Bundan dolayı yarıiletkendeki enerji seviyelerinin tümü eV kadar düşer ve buna bağlı olarak sağdan sola (yarıiletkenden metale) geçen holler için engel yüksekliği eV kadar azalır. Netice olarak sağdan sola akım doğrultusu (yarıiletkenden metale doğru geçen hollerin oluşturduğu akım) pozitif olarak kabul edilirse, karakteristik akım;

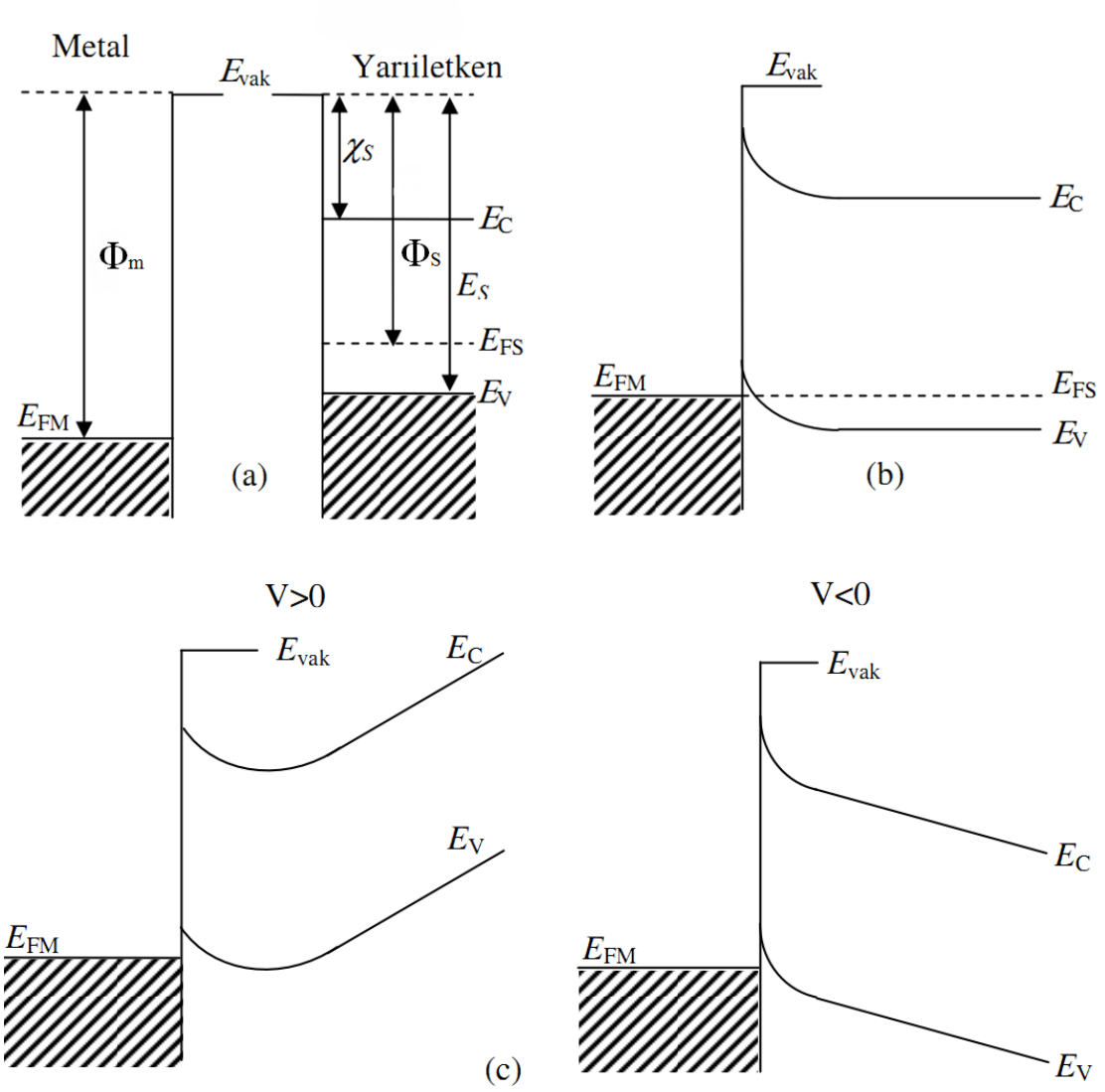
$$I = I_0\left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1\right] \tag{3.3}$$



Şekil 3.2. Metal ve p–tipi yarıiletken ile oluşturulan doğrultucu kontaktan sonra; *V≠ 0* olması durumunda olacaktır. Bu da bir doğrultucu kontaktır.

3.1.2. Metal p–tipi Yarıiletken Omik Kontaklar

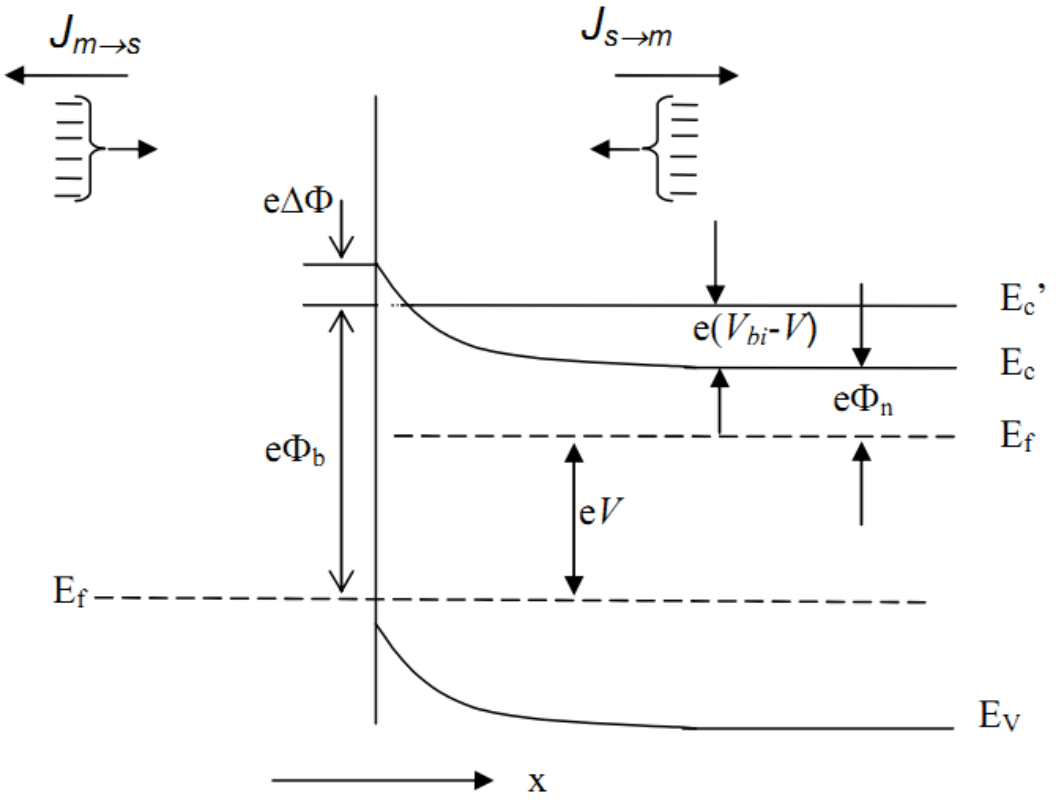
$\Phi_m \rangle \Phi_s$ durumunu dikkate alalım. Şekil 3.3.a'da görüldüğü gibi yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\Phi_m - \Phi_s$ kadar yukarıdadır. Kontaktan sonra bir yük alışverişi olacaktır. Yarıiletkendeki elektronlar, geride bir pozitif yüzey yükü (hollerden dolayı) bırakarak ve metal tarafında bir negatif yüzey yükünü oluşturarak metal tarafına akarlar buna bağlı olarak yarıiletkendeki Fermi seviyesi Şekil 3.3.b'de görüldüğü gibi $\Phi_m - \Phi_s$ kadar aşağı düşer. Hol konsantrasyonunun artmasından dolayı, yarıiletken yüzeyi daha fazla p–tipi olur. Elektronlar, metalden yarıiletken içindeki boş durumlara kolayca geçebilirler. Bu yük hareketi, hollerin yarıiletkenden metale akışına karşılık gelir. Metal tarafına geçen holler (yüksek elektron konsantrasyonundan dolayı) hemen nötralize olurlar. Ters beslem durumunda, metalin iletkenlik bandında termal olarak oluşan holler de kolay bir şekilde yarıiletken tarafına geçebilirler. Böyle her iki doğrultuda akımı kolayca geçirebilen kontaklar, omik kontaklar olarak bilinirler.



Şekil 3.3. Metal p–tipi yarıiletken omik kontağın enerji–bant diyagramı a) Kontaktan önce b) Kontaktan sonra ve termal dengede c) *V≠0* olması durumunda

3.1.3. Schottky Diyotlarda Termoiyonik Emisyonla Akım İletimi

Schottky kontaklarda bir potansiyel engeli üzerinden elektron taşınması işlemi termoiyonik alan emisyon teorisi ile açıklanmaktadır. Sıcak bir yüzeyden termal enerjileri nedeniyle taşıyıcıların salınması olayı termoiyonik emisyon olarak bilinir. Metal–yarıiletken Schottky diyotlarda termoiyonik emisyon teorisi; taşıyıcıların termal enerjileri nedeniyle potansiyel engelini aşarak yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene geçmesidir.



Şekil 3.4. Düz beslem altındaki metal–yarıiletken Schottky kontakta görüntü azalma etkisine ait enerji–bant diyagramı

Schottky diyotlarda akım çoğunluk taşıyıcıları tarafından sağlanır. Metal/n–tipi yarıiletken Schottky diyotlarda elektronlar, metal/p–tipi yarıiletken Schottky diyotlarda ise holler akımı sağlar. Termoiyonik emisyon teorisi oluşturulurken, Maxwell–Boltzman yaklaşımının uygulanabilmesi ve termal denge durumunun olaydan etkilenmemesi için, doğrultucu kontağa ait potansiyel engelinin, *kT* enerjisinden daha büyük olduğu ve tükenim bölgesindeki taşıyıcı çarpışmaların çok küçük olduğu kabul edilmektedir. Şekil 3.4.'te *V* büyüklüğünde düz beslem gerilimi uygulanmış bir Schottky kontak görülmektedir.

Metal–yarıiletken kontaklardaki akım mekanizmaları ilk olarak Bethe tarafından ve daha ayrıntılı olarak da Cowley ve Sze (1965) tarafından ortaya atılmıştır. Bu akım aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$I = I_0\left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right)-1\right] \tag{3.4}$$

Bu ifadedeki, *e* elektron yükü, *k* Boltzmann sabiti, *T* mutlak sıcaklık, *V* uygulanan gerilim ve *n* idealite faktörüdür. Yukarıdaki denklemde yer alan I_0 ters beslem doyma akımı olup

$$I_0 = AA^*T^2\exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \tag{3.5}$$

ile verilir (Rhoderick ve Williams 1988). Bu ifadede bulunan *A* diyotun alanı, Φ_b Schottky engel yüksekliği ve A^* Richardson sabitidir. Bu sabit,

$$A^* = \frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \tag{3.6}$$

ile verilir (Rhoderick ve Williams 1988). Burada *e* elektron yükü, *h* Planck sabiti ve m_n^* elektronun iletkenlik bandı içindeki etkin kütlesidir.

3.1.4. Schottky Engel Yüksekliği Üzerine Etkiler

İdeal bir metal–yarıiletken kontakta engel yüksekliği,

$$\Phi_b = \Phi_m - \chi_s \tag{3.7}$$

ile verilir. Bu ifadede Φ_m, kontak metalin iş fonksiyonu, χ_s, yarıiletkenin elektron ilgisidir (iletkenlik bandının tabanı ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkı). Bazı etkiler 3.7 eşitliği ile verilen Schottky engel yüksekliğinde sapma meydana getirebilir. Bunlardan birisi katotta emisyon akımının, artan alan kuvvetiyle artmasıdır. Bu etki, Schottky etkisi olarak bilinir ve katodun iş fonksiyonunun, yüzey alan kuvvetine bağlı olduğunu ifade eder. Metalden x uzaklığında, dielektrikte ki bir elektron, elektrik alanı oluşturacaktır. Alan çizgileri, metal yüzeyine dik ve metal yüzeyinden içeriye doğru x mesafede lokalize olan +e imaj yükü ile aynı olacaktır. İmaj yükü ile Coulomb etkileşmesinden dolayı elektron üzerine etkiyen kuvvete imaj kuvveti denir ve

$$F = \frac{-e^2}{4\pi\varepsilon_s (2x)^2} = -eE \tag{3.8}$$

olarak ifade edilir. Potansiyel ise,

$$-\Phi(x) = + \int_x^\infty E dx = \int_x^\infty \frac{e}{4\pi\varepsilon_s 4(x)^2} dx = \frac{-e}{16\pi\varepsilon_s x} \tag{3.9}$$

olarak bulunabilir. Burada x, integral değişkeni ve $x=\infty$ için potansiyeli sıfır kabul ettik. Dış elektrik alan sıfır iken potansiyel, 3.9 ifadesiyle verilmiştir. Eğer dış alan sıfırdan farklı ise, o zaman ilave bir terim gelir ve 3.9 ifadesi şöyle olur.

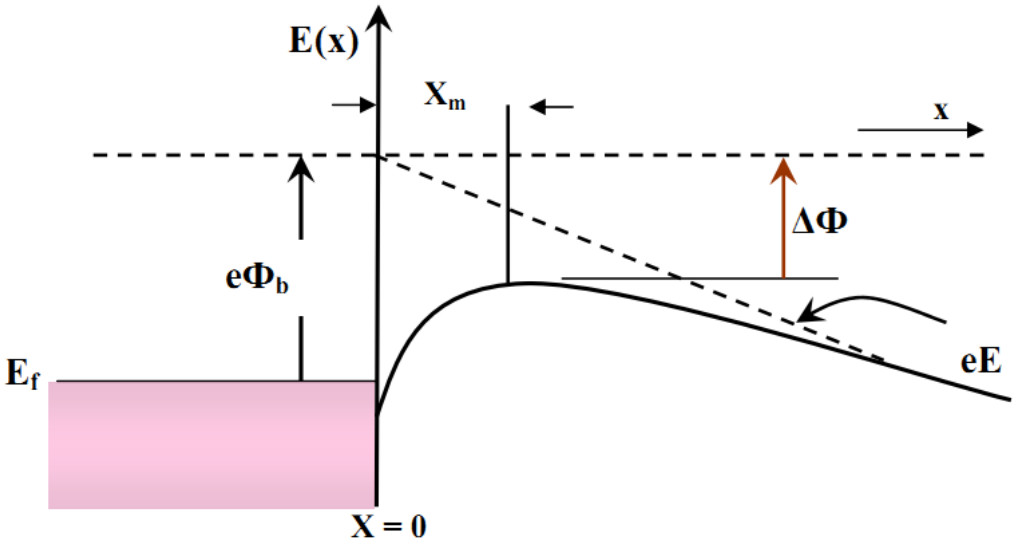
$$-\Phi(x) = \frac{-e}{16\pi\varepsilon_s x} - Ex \tag{3.10}$$

olur. 3.9 eşitliği x'in küçük değerleri için geçerliliğini kaybeder ve x sıfıra giderken $\Phi(x) \to \infty$ 'a yaklaşır. Eşitlikteki ikinci terim dış alandan dolayı potansiyel engelindeki düşme miktarını ifade eder. Potansiyel engelindeki bu düşme, Schottky etkisi ya da imaj kuvveti etkisiyle meydana gelen düşmedir. Görüntü (imaj) kuvvetinden dolayı potansiyel engelindeki bükülme Şekil 3.5.'te verilmiştir. Schottky engel düşmesini $\Delta\Phi$,

$$\frac{d[e\Phi(x)]}{dx} = 0 \tag{3.11}$$

şartından maksimum engelin konumu, X_m' i şu şekilde elde ederiz.

$$X_m = \sqrt{\frac{e}{16\pi\varepsilon_s E}} \tag{3.12}$$



Şekil 3.5. Görüntü (imaj) kuvvetinden dolayı potansiyel engelindeki bükülme

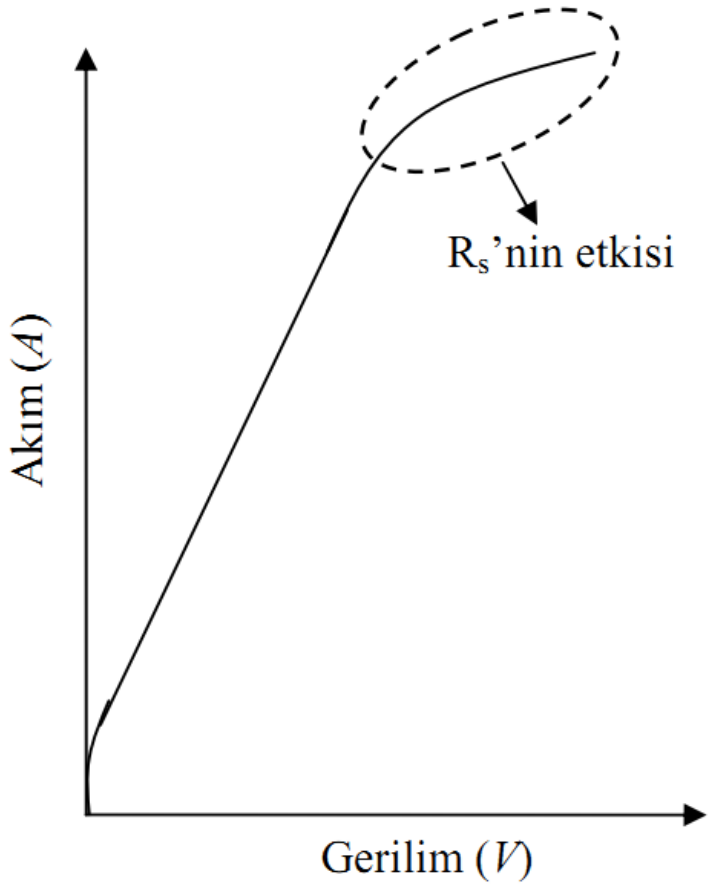
3.1.5. Schottky Diyotlarda Seri Direnç Etkisi

Metal–yarıiletken doğrultucu kontaklarda, yarıiletken tarafında oluşan tükenim bölgesi dışında kalan nötral bölgenin diyot akımına karşı gösterdiği dirence seri direnç denir ve R_s ile gösterilir. Bu etki, büyük gerilim değerlerinde baskın olmaya başlar ve diyot akımının düşmesine neden olur. Şekil 3.6., bir Schottky diyotta büyük gerilim değerlerinde seri direncin etkisi ile meydana gelen diyot akımındaki azalmayı göstermektedir (Rhoderick ve Williams 1988).

Metal–yarıiletken yapıların düz beslem *I–V* karakteristiklerinin yardımı ile Schottky diyotların elektriksel parametrelerinin hesaplanmasında Cheung (1986) tarafından bir metot sunulmuştur. Termiyonik emisyon teorisi dikkate alındığında bir diyottan geçen akımın denklemi

$$I = AA^{*}T^{2}\exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right)\left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right)\right] \qquad (3.13)$$

olarak yazılır. Seri direnç etkisi dikkate alındığında uygulanan potansiyelin IR_s kadarlık gerilimi nötral bölge üzerine düşüreceği göz önüne alınırsa $(V–IR_s)$ olarak yazılır ve denklem



Şekil 3.6. Seri direncin *I–V* karakteristiğine etkisi

$$I = AA^{*}T^{2}\exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right)\left[\exp\left(\frac{e(V-IR_s)}{nkT}\right)\right] \tag{3.14}$$

halini alır. Son eşitlik kullanılarak potansiyel fark

$$V = \left(\frac{nkT}{e}\right)\ln\left(\frac{I}{AA^{*}T^{2}}\right) + n\Phi_b + IR_S \tag{3.15}$$

olarak elde edilir. Denklem 3.15'in ln*I*'ya göre türevi alındığında

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_S \tag{3.16}$$

elde edilir. Bu eşitliğe göre *dV/d(*ln*I)*'nın *I*'ya göre grafiği bir doğru verecektir ve bu doğrunun eğimi seri direnç değerini verecektir. Bu doğrunun *dV/d(*ln*I)* eksenini kesiştiği noktadan idealite faktörü değeri hesaplanabilir. Engel yüksekliğini bulmak için

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{e}\right)\ln\left(\frac{I}{AA^{*}T^{2}}\right) \tag{3.17}$$

şeklinde bir *H(I)* fonksiyonu tanımlanmıştır. 3.15 ve 3.17 eşitlikleri kullanılarak

$$H(I) = n\Phi_b + IR_S \tag{3.18}$$

yazılabilir. Bu eşitlik kullanılarak *H(I)–I* grafiği çizildiğinde yine bir doğru elde edilecektir. Bu doğrunun eğimi, seri direnci verecektir. Bu doğrunun *H(I)* eksenini kestiği noktadan da engel yüksekliği hesaplanabilir.

3.1.6. Schottky Engel Diyotların Kapasitesi

Kapasite–gerilim *(C–V)* karakteristiği Schottky diyotların en önemli özelliklerinden biridir. Schottky diyotların *C–V* karakteristiği ara yüzey durumlarına karşı çok hassastır ve aygıtların elektriksel özellikleri üzerine kuvvetli etkisi söz konusudur. Düşük frekanslarda kapasitenin artması, uygulanan AC sinyalinin yük taşıyıcıları tarafından takip edilebilme yeteneğine bağlıdır. Yeterince yüksek frekansta kapasite–gerilim ölçümleri alınabilirse ara yüzeydeki yükler AC sinyallerini takip edemez.

p–tipi bir yarıiletken ile oluşturulan kontağın kapasitesi denklem 3.19 ile verilir.

$$C = A\left(\frac{\varepsilon_s\varepsilon_0 eN_d}{2}\right)^{\frac{1}{2}}\left(V_d - \frac{kT}{e}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{3.19}$$

Bu denklemde ε_s, yarıiletkenin dielektrik sabiti (Silisyum için ε_s=11.9), ε_0 boşluğun dielektrik sabiti (ε_0 = 8,85×10^{-14} F/cm), *e* elektronun yükü, V_d difüzyon potansiyeli, *k* Boltzmann sabiti, N_d iyonize olmuş donor konsantrasyonu ve *T* Kelvin cinsinden sıcaklıktır. 3.19 ifadesi yeniden düzenlenirse (Rhoderick ve Williams 1988),

$$C^{-2} = \frac{2(V_d + V)}{\varepsilon_s\varepsilon_0 eA^2 N_d} \tag{3.20}$$

yazılır. Burada V uygulama gerilimidir. C^{-2}–V grafiği çizildiğinde yapılacak lineer fit ile C^{-2}=0 için V_d=V olarak difüzyon potansiyeli elde edilir. 3.20 ifadesinin V'ye göre türevi alınırsa,

$$\frac{d\left(C^{-2}\right)}{dV} = \frac{2}{\varepsilon_s \varepsilon_0 e A^2 N_d} \tag{3.21}$$

elde edilir. Bu ifade N_d için yeniden düzenlenerek,

$$N_d = \frac{2}{\varepsilon_s \varepsilon_0 e A^2 \dfrac{d\left(C^{-2}\right)}{dV}} \tag{3.22}$$

bağıntısı elde edilir. Termal dengede p–tipi bir yarıiletkendeki elektron konsantrasyonu,

$$n_0 = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \tag{3.23}$$

ile verilmektedir. Burada N_c, termal dengede iletkenlik bandındaki hal yoğunluğudur. p–tipi bir yarıiletken için $N_d >> n_i$ olacağı için $n_0 \cong N_d$ olur. Burada n_i, katkısız (intrinsic) elektron konsantrasyonudur. Bu durum dikkate alındığında, 3.23 ifadesi,

$$N_d = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \tag{3.24}$$

olarak elde edilir. Son ifadenin tabii logaritması alınacak olursa ve iletkenlik bandı referans seviye olarak (E_c=0) kabul edilirse,

$$E_f = kT \ln\left(\frac{N_d}{N_c}\right) \tag{3.25}$$

Fermi enerji seviyesi elde edilmiş olur. C–V verilerinden engel yükseklikleri, ifadesi

$$\Phi_b(C-V) = E_f + V_d \tag{3.26}$$

ile elde edilebilir (Rhoderick ve Williams 1988).

3.2. Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemleri

Depolanacak ince filmlerin özellikleri, filmlerin kullanım alanları, kaynak ve alttaş malzemelerin sıcaklık optimizasyonu, düzensellik ve kalınlığın homojenliği, biriktirme hızı ve ticari maliyetler, ince film oluşturmada uygun kaplama tekniğinin belirlenmesini doğrudan etkileyen faktörlerdir. Bundan dolayı, ince filmlerin arzulanan bileşimi ve mikro yapısı, kaynak ve alttaş malzemelerden kaynaklanan sınırlamalar dikkate alınarak uygun biriktirme tekniğinin seçilmesi ile elde edilebilir.

İnce filmin kaliteli oluşturulabilmesi için, vakum ortamında gerçekleştirilmesi gereklidir. Vakum ortamında gerçekleştirilen en eski ve en çok kullanılan yöntem, fiziksel buhar biriktirme tekniğidir. Fiziksel buhar biriktirme (PVD) metodu malzemelerin buharlaştırılarak çeşitli yüzeyler üzerine biriktirilmesinde kullanılan bir çok vakum biriktirme yöntemini kapsayan genel bir tekniktir.

Bu kaplama yöntemi yüksek sıcaklık vakum biriktirme veya plazma püskürtme bombardımanı gibi yüzeyde kimyasal reaksiyon içermeyen bir kaplama yöntemidir. Bu yöntemin kullanımı 1838 yılında Michael Faraday'ın çalışmalarına kadar uzanmasına rağmen fiziksel buhar biriktirme terimi ilk defa 1966 yılında C.F. Powell'in yazdığı "Buhar Biriktirme" kitabında kullanılmıştır.

PVD yöntemleri sıralayacak olursak

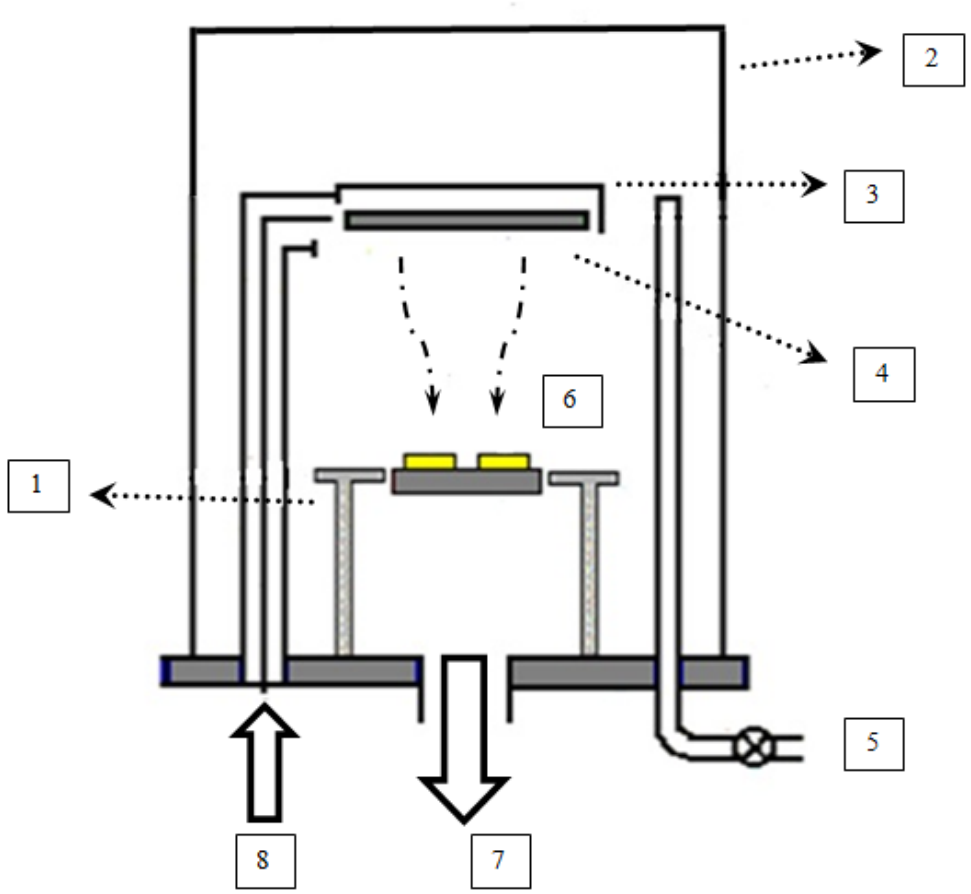
- Buharlaştırarak biriktirme
- Elektron ışın fiziksel buhar biriktirme
- Püskürterek biriktirme
- Katodik ark biriktirme
- Atmalı lazer biriktirme

Bu çalışmada yukarıda sıralanan yöntemlerden fiziksel buhar biriktirme ve püskürterek biriktirme yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

3.2.1. Plazma Saçtırma Buharlaştırma Yöntemi

PVD teknolojisinde en önemli dallardan biride plazma saçtırma yöntemidir. 1852 yılında Grove tarafından geliştirilen bir yöntemdir. Bu güne kadar bu yöntem büyük ölçüde geliştirildi ve 160 yıl boyunca endüstride kullanıldı (Ocak 2010).

Bu yöntemin çalışma prensibi şöyledir. Vakum odasında vakum oluşturulur ve ardından oda Argon gazı ile doldurulur. Yüksek gerilim uygulanması ile Argon gazı



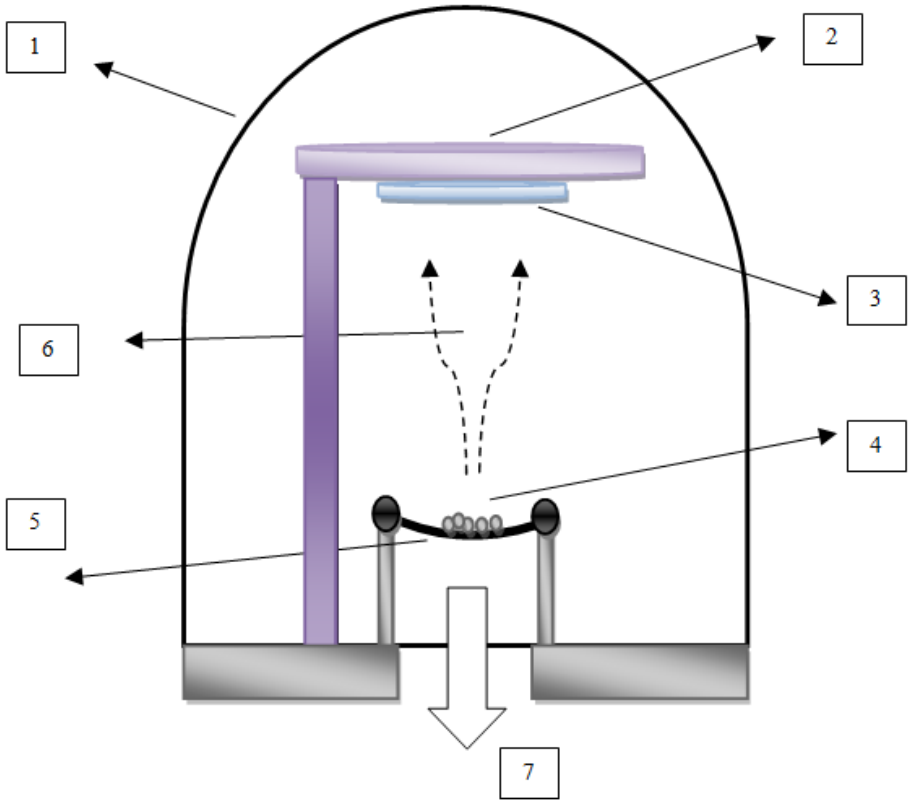
Şekil 3.7. DC saçtırma sisteminin şematize edilmiş hali. 1. Anot 2. Vakum odası 3. Katot koruması 4. Hedef 5. Argon girişi 6. İnce filmlerin büyütüleceği yüzeyler 7. Argon gazı çıkışı 8. Yüksek potansiyel fark

plazma durumuna geçer. Argon iyonları (Ar^+) katoda yüksek bir hızla çarpar ve hedef malzemeyi saçtırır. Burada hedef katot olarak kullanılmalıdır. Hedef atom ve molekül alttaş (numune) yüzeyine çarpar ve yoğun bir film tabakası oluşturur. Buharlaştırma yöntemindeki ısısal eritme yerine, Ar^+ plazma iyonları hedefe çarpar ve hedefi saçtırır. Bu olay saçtırma yönteminin temel mekanizmasıdır. Hedef atom Ar^+ iyonu ile hedeften sökülür. Burada iyonların çarpma hızı çok yüksektir ve hedef atomu yüksek hızlara ivmelendirebilir. Bu hızla, hedef atom alttaş yüzeye yoğun bir şekilde çarpar ve bağlanır. Film yoğunluğu buharlaştırmadan daha yoğundur.

En çok kullanılan iki çeşit saçtırma yöntemi vardır. Bunlar doğru akım (DC) ve radyo frekans (RF) saçtırma yöntemleridir. DC saçtırma yönteminde hedef katot ve kaplanacak malzeme anot olarak kullanılır. Vakum odası 10^{-3} Torr basınca düşürülür, Argon gazı ile doldurulur ve 1000 V civarında bir potansiyel fark uygulanır. Plazma içindeki iyonlar katoda ivmelendirilir, hedefe çarptırılır ve böylece enerji transferi ile hedef atomları istenilen yüzeye saçtırılır. Bu yöntemde hedef katot olarak kullanılır. Burada hedef iletken malzeme olmalıdır. İkinci önemli saçtırma yöntemi RF saçtırma yöntemidir. DC sistemlerde pozitif yük katot üzerinde birikir ve yalıtkan hedeflerin saçtırılması için çok yüksek gerilime ihtiyaç vardır. Yüksek gerilimlerde kolayca atlama olur ve hedef kaynağa ve üretilen malzemeye zarar verir. 1955 yılında G. K. Wehner tarafından geliştirilen yöntemde, 13.5 MHz radyo frekansına sahip alternatif bir akım DC sisteme uygulandı. Alternatif karakteristik ile, pozitif yük plazma bölgesinde kalır ve katotta birikmez. Böylece, katot yüksek gerilime maruz kalabilir ve saçtırma işlemi devam edebilir.

3.2.2. Termal Buharlaştırma Yöntemi

Vakum ortamında rezistif ısıtıcı ile yapılan termal buharlaştırma tekniği, yarıiletken yüzeylerine ince metal filmleri kaplamak için en yaygın şekilde kullanılan tekniklerden biridir. Kaplanacak olan malzemeler, W, Mo ve Ta gibi ısıya dayanıklı, ergime noktası çok yüksek olan metallerden imal edilmiş potaların içinde veya direkt olarak ısıtılmış rezistans üzerinden buharlaştırılır. Kuartz, grafit, alüminyum, berilyum, boron–nitrit ve zirkonyumdan imal edilmiş potalar direkt ısıtmada kullanılmaktadır.



Şekil 3.8. Termal buharlaştırma sisteminin şematize edilmiş hali. 1.Vakum odası 2. Altlık tablası 3. Numune tutucu 4. Buharlaştırılacak metal 5. Isıtıcı filaman 6. Metal Buharı 7. Vakum pompası

Bu yöntem diğer tekniklere göre daha ucuzdur ancak bazı dezavantajları vardır. Geometrik faktörler sebebiyle büyük çaplı üretimler çok zordur veya mümkün değildir. Düşük ergime sıcaklığına sahip malzemeler (<1500 °C) için kullanılabilir. Bazı durumlarda, pota da sıcaklıktan etkilenerek buharlaşır ve kaplama bozulabilir.

Archibald ve Parent (1976), termal buharlaştırma için mevcut olan çeşitli kaynak–buharlaştırıcıların kaplama karakteristiklerini, avantajlarını ve sınırlamalarını tartışmışlardır. Bu teknik için buharlaşma oranları, belli bir sıcaklık ve vakum altında tutulan buharlaşıcının buhar basıncı ile kontrol edildiği için başlangıç materyalinin içeriğinin aynısına sahip alaşım ve karışımları kaplamak zordur. Bununla beraber flaş buharlaştırma tekniği kullanılarak bu problemin üstesinden gelinebilir. Bu teknikte alaşımın veya metalin oldukça küçük boyutlu tozları kontrollü bir oranda sıcak olan buharlaştırma potasına konularak buharlaştırma yapılır böylece alaşımdaki oranın benzeri depozit edilmiş olur.

3.3. Deneysel İşlemler

3.3.1. Yarıiletkenlerin Temizlenmesi

Bu çalışmada University Wafers firmasından alınan, 1–10 Ωcm özdirence ve (100) yönelimine sahip 3 inçlik bir p–Si yarıiletken kullanmıştır. Yarıiletkeni yağlarından arındırmak için önce trikloroetilen'de 10 dakika kaynatılmış, ardından sırasıyla aseton ve metanolde ultrasonik olarak yıkanmıştır. Ardından 30 saniye seyreltik HF:H_2O (1:10) çözeltisine daldırılmıştır. Her basamak sonunda yarıiletken 18 MΩ dirençli deionize suda yıkanmıştır. Deionize sudan geçirilen yarıiletken azot (N_2) ortamında kurutulmuş ve vakum odasına yerleştirilmiştir.

3.3.2. Diyotların Oluşturulması

Önce diyotların oluşturulması için gerekli olan omik kontak işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem için Vaksis firmasının ürettiği PVD–handy tek magnetronlu saçtırma sistemi kullanılmıştır. Kullanılan vakum sistemi Şekil 3.9.'de gösterilmiştir. Vakum odasına yarıiletken konulduktan sonra önce vakum sistemi 10^{-6} Torr mertebesine düşürülmüştür. Daha sonra vakum sisteminden Argon gazı geçirilerek vakum seviyesi 5×10^{-3} Torr mertebesine getirilmiş ve DC güç uygulanarak 200 nm kalınlığında Al ince filmi oluşturulmuştur. Saçtırma işleminden sonra yarıiletken 450 °C'ye ayarlanmış fırın içerisine konulmuş ve azot ortamında 15 dakika tavlanmıştır. Böylece omik kontaklı p–Si yapısı elde edilmiştir.

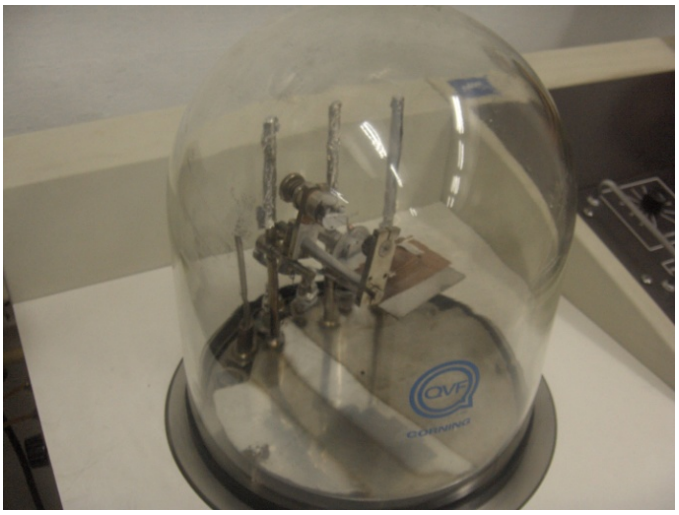
Omik kontakların oluşturulmasından sonra yarıiletkenin yaklaşık 1cm*x*1cm ebatlarına ayrılan parçalardan biri seyreltik HF:H_2O (1:10) çözeltisi ile temizlenmiş, 18 MΩ dirençli deionize suda yıkanmış ve azot (N_2) ortamında kurutulmuştur.



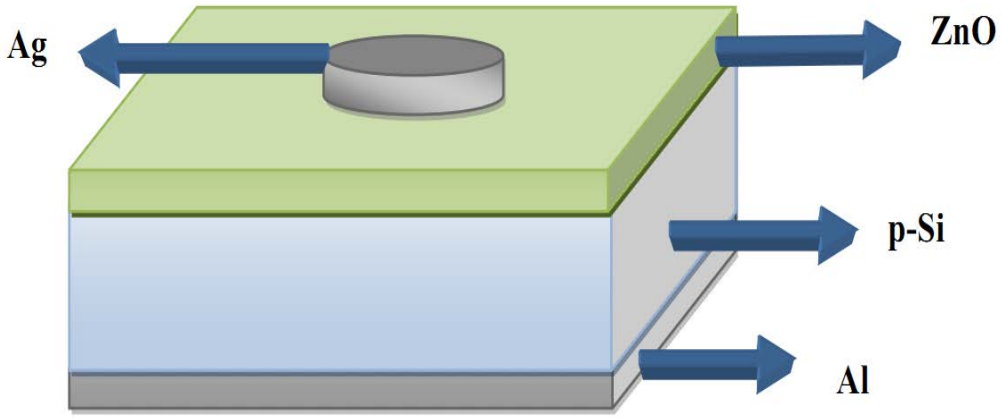
Şekil 3.9. ZnO ve Al püskürtme işlemlerinin gerçekleştirildiği vakum sistemi

Daha sonra p–Si/Al yapısı tekrar aynı vakum odasına alınmıştır. Önce vakum sistemi 10^{-6} Torr mertebesine düşürülmüş ve vakum sisteminden Argon gazı geçirilerek vakum seviyesi 5×10^{-3} Torr mertebesine getirilmiştir. Hedef ile alttaş arasına 40 W güç uygulanıp 1Å/s hızla p–Si/Al yapısı üzerine 200 nm ZnO ince filmi kaplanmıştır. Bu çalışmada hedef olarak 2 inç çapında Kurt Lesker firmasından alınan ZnO hedef kullanılmıştır.

ZnO filmin oluşturulmasından sonra, yapı üzerine doğrultucu kontak elde etmek için Ag metalinin ince filmi oluşturulmuştur. Vakum odasına konulan ZnO/p–Si/Al yapı üzerine 10^{-6} Torr mertebesine düşüldükten sonra gölge maske yardımı ile termal buharlaştırma tekniği kullanılarak Ag kontak oluşturulmuştur. Bu işlemde kullanılan termal buharlaştırma sistemi Şekil 3.10.'da gösterilmektedir. Elde edilen yapının çizimi Şekil 3.11.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Termal buharlaştırma sistemi



Şekil 3.11. Ag/ZnO/p–Si yapısı

3.3.3. Akım–Gerilim, Kapasite–Gerilim ve Kapasite–Frekans Ölçümlerinin Alınması

Elde edilen Ag/ZnO/p–Si yapısının elektriksel karakterizasyonunun gerçekleştirilmesi için önce bu yapıya ait akım–gerilim (*I–V*) ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümler Keithley 2400 sourcemetre kullanılarak, bilgisayar kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Yapıda doğrultma özelliği görülmüştür ve elektriksel özelliğinin belirlenmesi için akım–gerilim (*I–V)* ölçümleri alınmıştır. Daha sonra diyodun kapasite–gerilim (*C–V*) ve kapasite–frekans (*C–f*) ölçümleri Agilent HP 4294A

(40 Hz–110 MHz) Impedans Analizör kullanılarak alınmıştır. Yapının 500 kHz frekansındaki C^{-2}–V grafiği kullanılarak elde edilen elektriksel parametreleri I–V ölçümlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. 1 kHz ile 10 MHz frekans aralığında 0.1 V sabit gerilim altında yapının arayüzey durumlarının AC sinyallerinin takip edip edemedikleri incelenmiştir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Giriş

Bu bölümde Ag metali ile oluşturulan Ag/ZnO/p–Si diyotun elektriksel karakterizasyonu incelenecektir.

4.2. Akım–Gerilim Ölçümleri

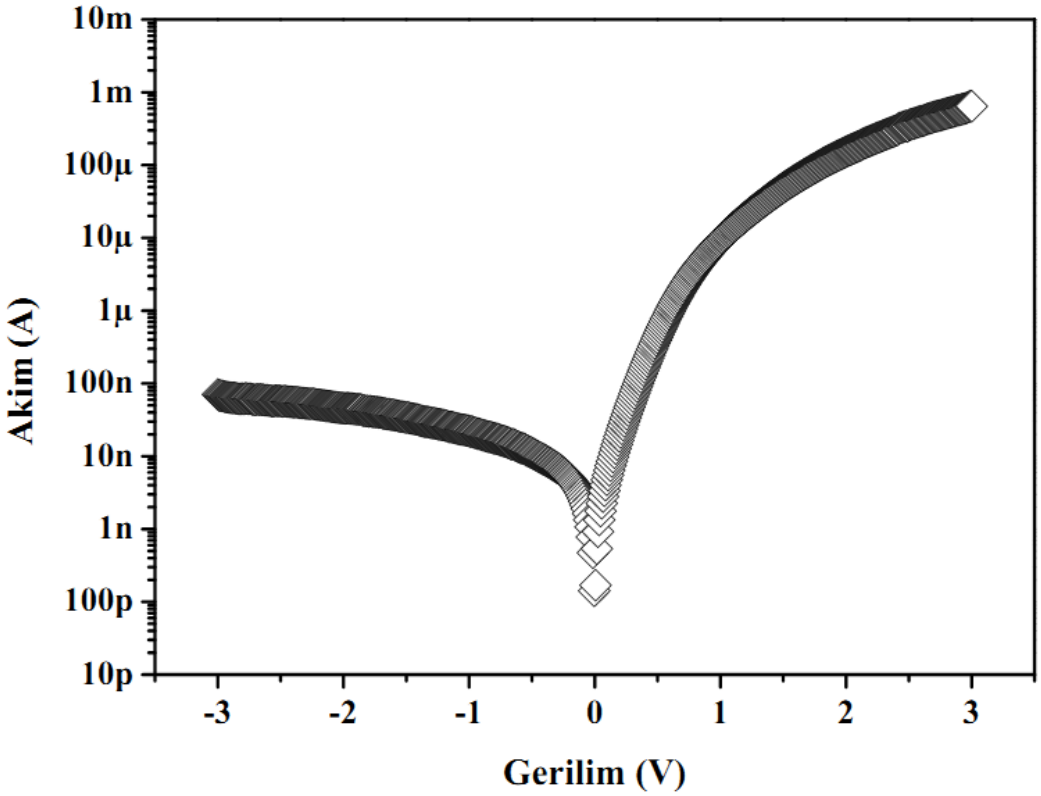
Şekil 4.1.'de Ag/ZnO/p–Si diyotuna ait akım–gerilim grafiği gösterilmektedir. Şekilde de görülebileceği gibi Ag/ZnO/p–Si yapısı doğrultucu özelliğe sahiptir. Bu yapıya ait doğrultma oranı ±3 V için 6915 olarak hesaplanmıştır. Doğrultucu yapıya sahip bu diyot için termoiyonik emisyon teorisi kullanılabilir. Teoriye göre belirli bir V potansiyel altında tutulan bir diyottan geçen akım (Rhoderick ve Williams 1988),

$$I = I_0 \exp\left(\frac{e(V - IR_s)}{nkT}\right) \qquad 4.1$$

denklemi ile ifade edilmektedir. Burada e elektronik yük, V uygulanan gerilim, R_s seri direnç, n boyutsuz idealite faktörü, k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık ve I_0 doyma akım değeridir ve

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \qquad 4.2$$

ile ifade edilir. Burada A diyot alanı, A^* değeri ZnO için 36 $Acm^{-2}K^{-2}$ (Madelung ve ark. 1982) olan Richardson sabiti ve Φ_b ise diyotun engel yüksekliğidir.



Şekil 4.1. Ag/ZnO/p–Si diyotuna ait *I–V* grafiği

Bir diyotun idealite faktörü değeri ln*I–V* grafiğinin lineer bölgesinin eğiminden

$$n = \frac{e}{kT}\frac{dV}{d(\ln I)} \qquad 4.3$$

yardımı ile ve diyotun engel yüksekliği ln*I–V* grafiklerinin *I* eksenin kestiği noktadaki doyma akım değeri olan I_0 değeri kullanılarak

$$\Phi_b = \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \qquad 4.4$$

formülü ile hesaplanabilir. Ag/ZnO/p–Si diyotu için idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri sırasıyla 2.316 eV ve 0.819 eV olarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda diyotun elde edilen elektriksel parametreleri Çizelge 4.1.'de verilmiştir. İdeal bir diyot için idealite faktörü 1 olmalıdır. Birden büyük idealite faktörü değerleri ideallikten sapmayı ifade eder.

Çizelge 4.1. Oluşturulan Ag/ZnO/p–Si diyotunun ln*I–V* grafiklerinden elde edilen elektriksel parametreleri

Diyot	n	I_0 (A)	Φ_b (eV)
Ag/ZnO/p–Si	2.316	8.5×10^{-10}	0.819

Daha önceki araştırmacılar da buna benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Aydoğan ve ark. (2009) *I–V* grafiklerinden aynı özellikteki ZnO'larla yapılan yedi adet Au/n–ZnO diyotlarının engel yüksekliklerini 0.55 eV ve 0.59 eV arası; idealite faktörünü ise 1.21 ve 1.53 arasında çeşitli değerler buldular. İdealite faktörlerinin ideale yakın ve küçük değerler olması engel yüksekliğini etkilemektedir. Bu durumu düzgün olmayan arayüzeylere ve engel yüksekliklerinin homojensizliklerine bağladılar. İdealite faktöründeki sapmaları Au ve ZnO arayüzeyindeki yerel oksit tabakasına, engel yüksekliğinin homojensizliğine, seri direnç etkisine ve engel yüksekliğinin düz beslem bağlı olmasına atfettiler.

Bacaksız ve ark. (2010) ZnO/SnO_2 yapısının 150 K ve 300 K arasındaki sıcaklıklarda *I–V* ölçümlerini incelediler. Genellikle sıfır beslemde sıcaklığın artması ile engel yüksekliği (Φ_b) azalırken idealite faktörü (n) artar. Bunu da yapılan ölçümler sonucu bir kez daha gördüler. p–ZnO/SnO_2 ve n–ZnO/SnO_2 yapıları için 125 K ve 325 K sıcaklık aralığında idealite faktörü değerlerini 5.10 ve 4.00 arasında çeşitli değerler buldular. Daha önce de bazı yazarlar p–ZnO:As/n–ZnO için idealite faktörünü 3–5 arası; n–ZnO/p–(Zn:Mg)O:P için idealite faktörünü 10–20 arası ve p–ZnO:N/n–ZnO için idealite faktörünü 4.7–10.6 arası gibi yüksek değerler bulmuşlardı. p–n eklemi için bulunan bu yüksek değerler Bacaksız ve ark. (2010) tarafından p–n arayüzeyindeki yüzey eksikliğinin oluşturduğu çok sayıdaki sızıntıya ve uzay yükü bölgesindeki taşıyıcı birleşimine atfedildi.

Bacaksız ve ark. (2010) ZnO/SnO_2 yapısının engel yüksekliğinin sıfır beslemde 150 K ve 300 K sıcaklıkları arasında 0.367 eV'den 0.613 eV'ye kadar değiştiğini gördüler. Engel yüksekliğinin artmasının nedenini, arayüzeydeki azınlık yük taşıyıcılarının birikmesiyle oluşan tükenim bölgesinin genişliğinin artmasına atfettiler.

Chaabouni ve ark. (2006) n–ZnO/p–Si diyotunun *I–V* ölçümlerinden 25 °C, 100 °C, 200 °C, 300 °C ve 400 °C'de doyma akımını sırasıyla 2.16×10^{-7} A, 2.66×10^{-7} A, 4.87×10^{-5} A, 1.90×10^{-5} A ve 6.05×10^{-5} A buldular. Yine aynı sıcaklık değerlerinde engel yüksekliğini sırasıyla 0.78 eV, 0.78 eV, 0.64 eV, 0.67 eV ve 0.64 eV buldular. Bulunan bu değerlerin Si ve ZnO'nun iş fonksiyonlarının enerji farkı ile uyumlu olduğunu belirttiler.

Klason ve ark.(2009) p–Si/n–ZnO yapısının *I–V* ölçümlerinden doğrultucu özellik gösterdiğini gözlemlediler. A ve B diye iki grupta incelenen diyotların, ln*I–V* eğrilerinden idealite faktörlerini hesapladılar. İdealite faktörleri A grubu için 3.91±0.11, B grubu için 5.47±0.69 olarak belirlendi. İdealite faktörlerinin idealden uzak bulunmasının nedenini üretim yapılırken SiO_2 ile kaplanan Si'nin yüzeyinin yeterince temiz olmamasına ve arayüzey durumlarının varlığına bağladılar (Klason ve ark. 2009). p–Si/n–ZnO yapısının engel yüksekliklerini A örnekleri için 0.77±0.04 eV ve B örnekleri için 0.65±0.05 eV olarak elde ettiler. Bu değerlerin daha önce ilan edilen değerlere oldukça yakın olduğunu gördüler.

Majumdar ve ark.(2009) p–ZnO/p–Si yapısının engel yüksekliğini küçük bir değer olan 0.66 eV ve idealite faktörünü de 6 olarak buldular. İdealite faktöründeki bu sapmayı öncelikle ZnO ve Si arasındaki örgü uyumsuzluğuna sonra da azınlık taşıyıcılarının hareketi ve tekrar birleşimi ile termoiyonik emisyon teorisine atfettiler.

Yakuphanoğlu ve ark. (2010) ZnO/p–Si diyotunun *I–V* ölçümleri alarak doğrultucu yapıda olduğunu gördüler. Sırasıyla diyotun idealite faktörü ve ters beslemde doyma akımını 3.18 ve 5.66×10^{-9} A hesapladılar. Elde edilen idealite faktörünün 2'den büyük olmasını arayüzey durumlarının varlığına ve oksit tabakasına bağladılar. Doyma akımı değerini kullanılarak engel yüksekliğini 0.78 eV buldular. ZnO'nun nano yapısının ZnO/p–Si diyotların engel yüksekliğine önemli bir etkisi olduğuna ve aygıtın performansında ZnO'nun nano yapısının önemli bir yeri olduğuna karar verdiler.

Yakuphanoğlu (2010) Au/n–ZnO/n–Si Schottky diyotunun *I–V* karakteristiklerini inceledi. İdealite faktörünü 2.01 buldu ki bu da diyotun ideallikten

saptığını gösterir. Bu durumu seri direnç etkisine, silikonun üzerindeki oksit tabakaya ve arayüzey durumlarının varlığına atfetti.

Choi ve ark. (2010) p–Si NWs/ZnO heteroeklem diyotunun *I–V* ölçümlerinden eşik gerilimini 2.26 V, doğrultma oranı 3.0 V gerilim altında 519 olarak belirlediler. ln*I–V* grafiğinden idealite faktörünü 4.5 ve doyma akımını 0.5 nA buldular. İdealite faktörünün yüksek bulunmasını arayüzey durumlarının varlığına atfettiler. Ayrıca sınırlı uzay yükü iletimine, derin seviyedeki tünelleme ve eklemin parazitik etkisine de bağladılar.

Ocak ve ark. (2011) Al/ZnO/p–InP diyotunun 300 K ve 380 K sıcaklıkları arasında yaptıkları *I–V* ölçümlerinden yapının doğrultucu özellik gösterdiğini saptadılar. *I–V* eğrilerinden idealite faktörünü 1.54 ile 1.68 arası ve engel yüksekliğini 0.81 eV ile 0.90 eV arası değerler buldular. İdealite faktöründeki bu sapmayı arayüzey durumlarının varlığına ve seri direnç etkisine bağladılar.

Bir çok araştırmacı tarafından farklı maddelerle yapılan çalışmalarda benzer sonuçlar bulunmuştur. Tüm bu çalışmalar ve arayüzeylerin sarp ve tepkisiz gibi görünse de ZnO tabakasının heteroeklem yapılarda çok önemli modifikasyonlara sebep olduğunu göstermiştir Engel yükseklikleri arasındaki farklılıklar üretim koşullarının farklı olmasına, oluşturulan ara yüzeylerin kalınlıklarının farklı olmasına ve ara yüzeyin homojen olmamasına atfedilebilir (Aydın ve ark. 2007, Okur ve ark 2009).

Diyotun direncinin uygulanan gerilime karşı çizilen grafiğinden seri direnç ve paralel direnç bulunabilir. Diyotun direnci

$$R_d = \frac{\partial V}{\partial I} \qquad 4.5$$

olarak ifade edilir.

Diyotun direnci–uygulanan gerilim *(R_d–V)* grafiğinde düz beslem bölgesinde potansiyel arttıkça, diyotun direnci sabit bir değere ulaşacaktır. Bu diyotun seri direncidir. Şekil 4.2.'de gösterilen grafikte diyotun seri direnci tam olarak

okunamamaktadır. Yine Şekil 4.2.'de de görüldüğü gibi ters beslemde yüksek potansiyel değerlerinde diyotun direnci sabit bir değere ulaşır. Bu sabit değer diyotun paralel direnci olarak adlandırılır. Bu paralel dirence muhtemelen aygıt kesitindeki akım azlığı ya da eklem hasarları neden olmaktadır (El–Nahass ve ark. 2005).

I–V ölçümleri kullanılarak Şekil 4.2.'de çizilen grafik yardımıyla Ag/ZnO/p–Si diyotunun paralel direnci 42 MΩ olarak bulundu. Seri direnç net olarak gözlemlenemediğinden, diyotun seri direnç değeri Cheung (1986) tarafından geliştirilen metotla hesaplanacaktır.

Şekil 4.1.'de görüldüğü gibi, ln*I–V* eğrileri yüksek gerilimlerde lineerlikten sapmaktadır. Bu sapmalar diyotlardaki mevcut seri direnç etkisini göstermektedir. Diyotlara ait seri direnç değerlerini hesaplamak için kullanılan Cheung bağıntıları

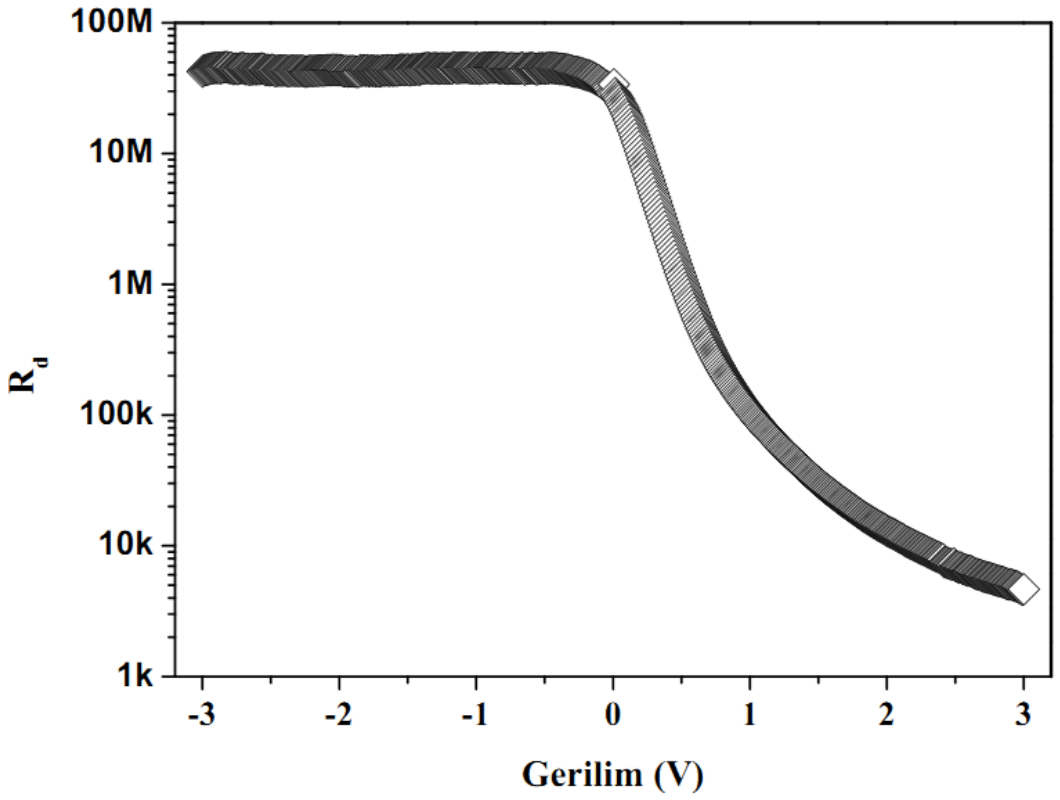
$$\frac{\mathrm{dV}}{\mathrm{d}(\ln I)} = IR_s + n\left(\frac{kT}{e}\right) \qquad 4.6$$

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{e}\right)\ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \qquad 4.7$$

ve

$$H(I) = IR_s + n\Phi_b \qquad 4.8$$

şeklinde verilir. *dV/d*(ln*I)–I* ve *H(I)–I* eğrisi seri direnç bölgesinde lineer bir doğru vermelidir. Diyota ait *dV/d*(ln*I)–I* ve *H(I)–I* eğrisi Şekil 4.3.'te gösterilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi diyot seri direnç bölgesinde lineer bölgeye sahiptir. *dV/d*(ln*I)–I* grafiğinin eğiminden R_s ve y eksenini kestiği yerden *n(kT/e)* değeri hesaplanır. Benzer şekilde *H(I)–I* eğrisinin eğiminden R_s ve y eksenini kestiği yerden Φ_b değeri bulunur. Her iki grafikten elde edilen R_s değerleri yöntemin doğruluğunu kontrol amaçlı kullanılır.



Şekil 4.2. Ag/ZnO/p–Si diyotuna ait R_d–V grafiği

Bu yöntemlerle elde edilen tüm sonuçlar Çizelge 4.2.'de gösterilmiştir. Çizelgeden de görüleceği gibi elde edilen Ag/ZnO/p–Si diyotunun seri direnç değerleri birbirine yakın değerler bulundu. Diyotun *dV/d*(ln*I*)–*I* grafiğinden elde edilen idealite faktörünün, *I*–*V* grafiğinden elde edilen idealite faktöründen büyük olduğu ve *I*–*V* eğrisinden bulunan engel yüksekliği ile *H(I)*–*I* grafiğinden elde edilen engel yüksekliği değerlerinin birbirlerine yakın değerler olduğu görüldü. Daha önce de bazı araştırmacılar da benzer sonuçlara ulaşmışlardır.

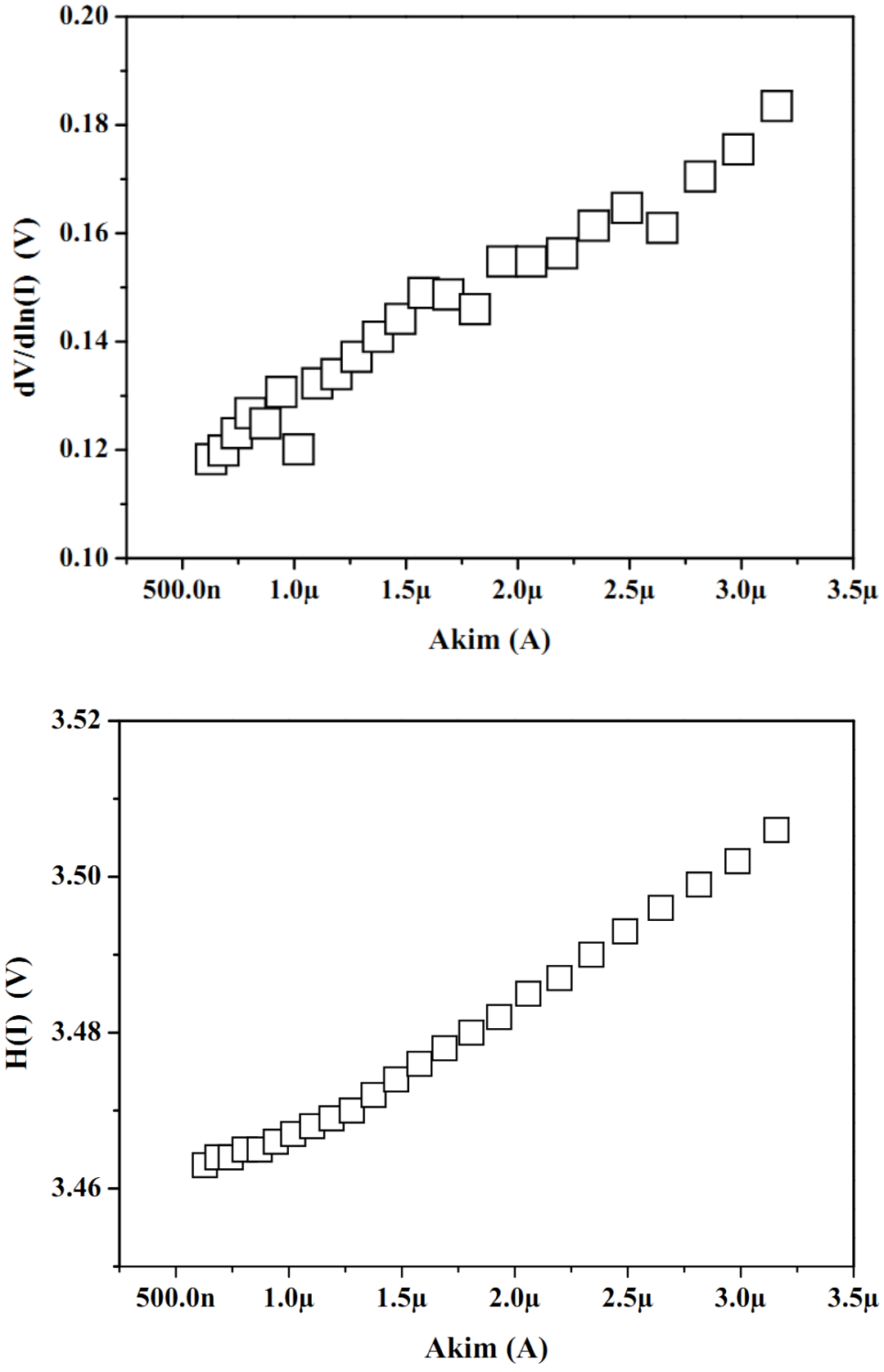
Aydoğan ve ark. (2009) Au/n–ZnO yapısının *dV/d*(ln*I*)–*I* grafiğinden idealite faktörünü 2.10 ve seri direncini 1525 Ω buldular. İdealite faktörü değerinin *I*–*V* grafiklerinden elde edilen değerden daha büyük olduğunu gördüler. Bu durumu arayüzey durumlarına, seri direnç etkisine ve arayüzey tabakası boyunca gerilimin düşmesine atfettiler. *H(I)*–*I* grafiğinden engel yüksekliği 0,54 eV ve seri direnç 1531 Ω buldular. Buradan bulunan seri direnç değerinin *dV/d*(ln*I*)–*I* grafiğinden bulunan değere yakın olduğunu gözlemlediler.

Çizelge 4.2. Oluşturulan Ag/ZnO/p–Si diyotunun R_d–V grafiği ve Cheung fonksiyonları kullanılarak hesaplanan elektriksel parametreleri

Diyot	*dV/d*(ln*I*)–*I*		*H(I)–I*		R_d–*V*
	n	R_S (kΩ)	Φ_b (eV)	R_S (kΩ)	R_p (MΩ)
Ag/ZnO/p–Si	4.39	16.79	0.798	16.72	42

Gupta ve ark. (2009) NiO/ZnO p–n ekleminin *dV/d*(ln*I*)–*I* grafiğinden idealite faktörünü 3.87 ve seri direnç değerini 0.57 kΩ olarak hesapladılar. *I–V* grafiğinden hesaplanan idealite faktörü (4.1) ile *dV/d*(ln*I*)–*I* grafiğinden elde edilen idealite faktörü arasındaki bu farkı arayüzey tabakası boyunca gerilim düşmesine, arayüzey durumlarına ve seri direnç etkisine bağladılar. Engel yüksekliğini 0.32 eV, seri direnç değerini 0.69 kΩ buldular. *I–V* eğrisinden hesaplanan engel yüksekliği (0.33) ile *H(I)–I* grafiğinden bulunan engel yüksekliği değerlerinin birbirleri ile uyumlu olduğunu gördüler.

Seri dirençler arasındaki farklılıklar, diyotlar oluşturulurken ara yüzeyde istenmediği halde oluşmuş olduğu düşünülen oksit tabakalara, ara yüzey durumlarının etkisine ve yüzeylerin homojen olmamasına atfedilebilir. Diyot için *dV/d*(ln*I*)–*I* ve *H(I)–I* eğrilerinden elde edilen seri direnç değerlerinin uyumlu olması ise yöntemlerden elde edilen sonuçların tutarlılığını göstermektedir. Ayrıca Cheung fonksiyonları ile elde edilen tüm idealite faktörleri, ln*I–V* grafiklerinin eğimlerinden elde edilen idealite faktörlerinden daha büyüktür. Bu durum seri direncin varlığına, arayüzey durumlarının etkisine ve arayüzey tabakası boyunca gerilim düşmesine atfedilebilir (Kılıçoğlu 2008).



Şekil 4.3. Ag/ZnO/p–Si diyotuna ait d*V*/d(ln*I*)–*I* ve *H*(*I*)–*I* eğrileri

4.3. Kapasite–Gerilim Ölçümleri

Kapasite–gerilim (*C–V*) karakteristiği Schottky diyotların en önemli özelliklerinden biridir. Schottky diyotların *C–V* karakteristiği ara yüzey durumlarına karşı çok hassastır ve arayüzey durumlarının devre elamanlarının elektriksel özellikleri üzerine etkisi söz konusudur. Şekil 4.4. Ag/ZnO/p–Si diyotuna ait 500 kHz frekansında –2 ile 2 volt arasında *C–V* grafiğini göstermektedir. Grafikten de çok net bir şekilde anlaşılacağı gibi diyotun ters beslemde kapasite değerleri daha küçük değerler olarak gözlenirken düz beslemde gerilim arttıkça kapasitenin arttığı gözlenmiştir.

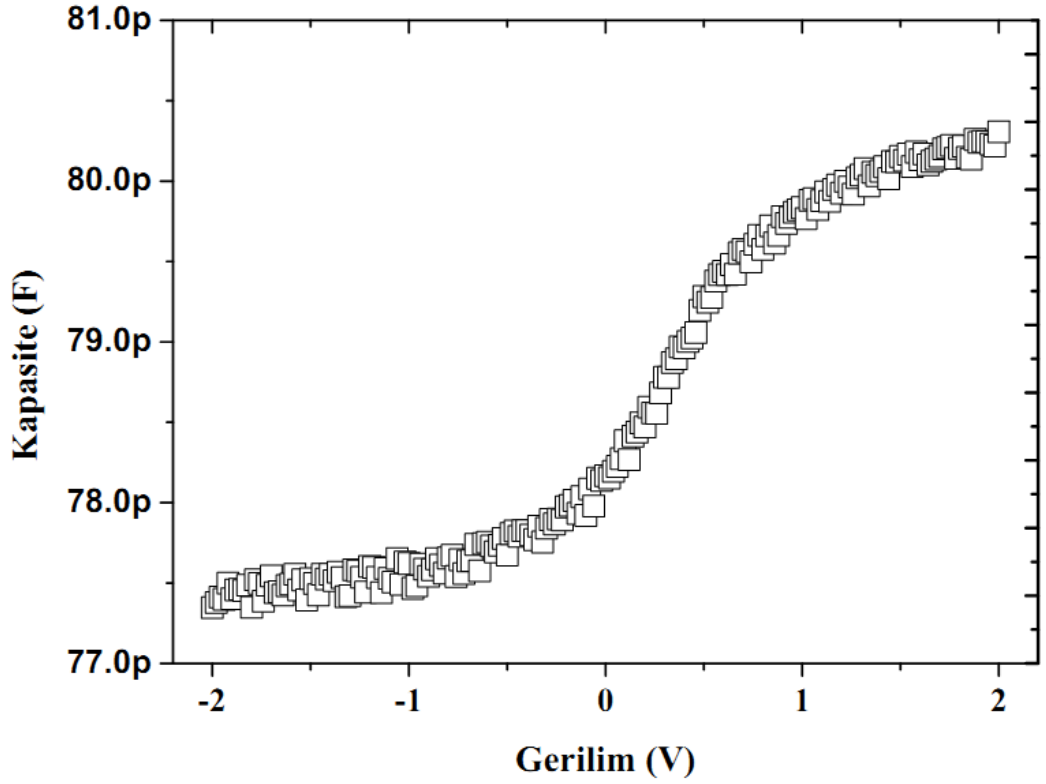
Diyotların karakteristik parametreleri ayrıca ters beslem C^{-2}–V eğrilerinden de hesaplanabilir. Artan ters beslem gerilimi ile yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar geriye doğru çekilir ve tükenim bölgesinin genişliği $w+\Delta w$ kadar artar. Tükenim bölgesindeki yükte meydana gelen değişim, kapasitede bir değişime neden olur.

Doğrultucu kontaklarda arayüzey bölgesi kapasitesi (Rhoderick ve Williams, 1988)

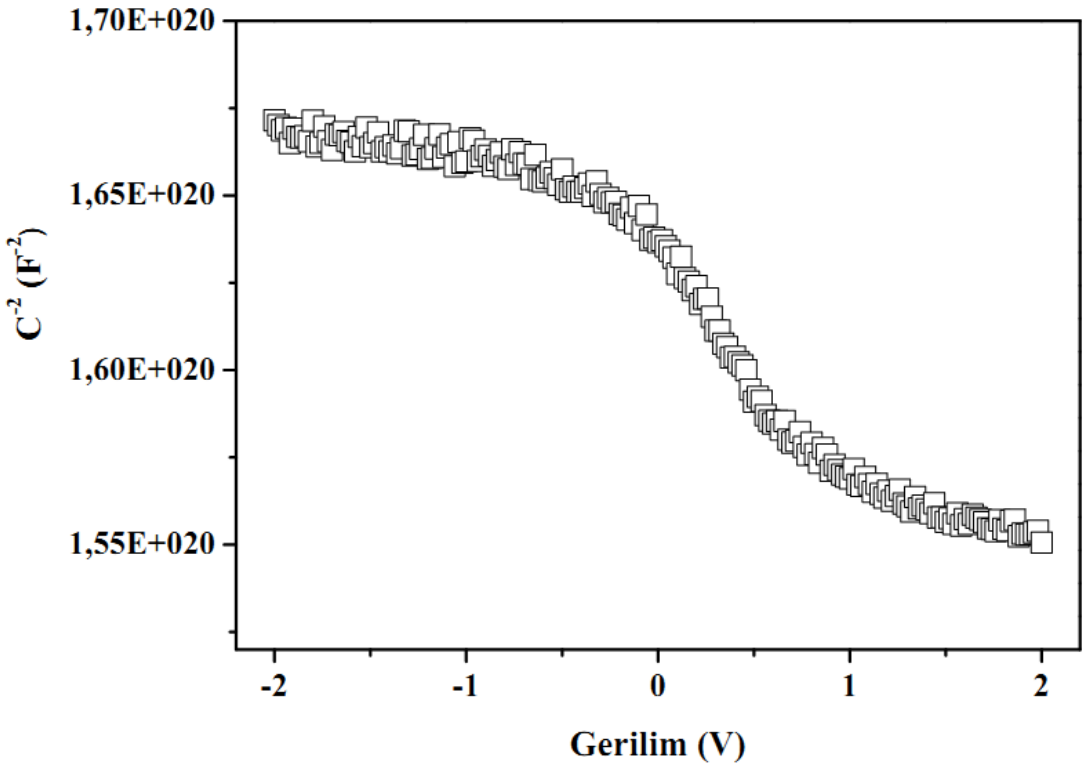
$$\frac{1}{C^2}=\frac{2(V_d+V)}{e\varepsilon_s A^2 N_d} \tag{4.9}$$

olarak verilir. Burada A diyotun etkin alanı, ε_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, V_d ise C^{-2}–V eğrisinin V eksenin kestiği yerden hesaplanan sıfır beslem difüzyon potansiyeli ve N_d ise iyonize olmuş diyotların konsantrasyonudur. Ag/ZnO/p–Si diyotuna ait C^{-2}–V eğrisi Şekil 4.5.'te gösterilmektedir. Diyota ait engel yüksekliği denklem 4.13 ile hesaplanabilir.

$$\Phi_b(C-V)=V_d+E_f \tag{4.13}$$



Şekil 4.4. Ag/ZnO/p–Si diyotunun 500 kHz frekansındaki *C–V* eğrisi



Şekil 4.5. Ag/ ZnO /p–Si diyodunun 500 kHz frekansındaki C^{-2}–*V* grafiği

Burada E_f değeri p–tipi yarıiletkenin nötral bölgesindeki iletim bandının en düşük değeri ile Fermi seviyesi arasındaki potansiyel farktır. ZnO için E_f hesabı

$$E_f = kT \ln\left(\frac{N_c}{N_d}\right) \tag{4.14}$$

ile yapılır. Burada N_c termal dengede iletkenlik bandındaki hal yoğunluğudur.

Ag/ZnO/p–Si diyotu için ZnO'nun dielektrik sabiti 8.5 (Nahm ve ark.2000), fermi enerji seviyesi 0.226 eV ve termal dengede iletkenlik bandındaki hal yoğunluğu 3.35×10^{18} cm^{-3} (Sze 1981) alınırsa; iyonize olmuş donorların konsantrasyonu 5.356×10^{14} cm^{-3} ve engel yüksekliği 1.669 eV bulunur.

Çizelge 4.3. hem *I–V* hem de *C–V* ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliklerini göstermektedir. Çizelgeden de görüldüğü gibi Ag/ZnO/p–Si diyotu için C^{-2}–*V* eğrisinden hesaplanan engel yüksekliği değeri, *I–V* eğrisiden elde edilen değerden daha büyüktür.

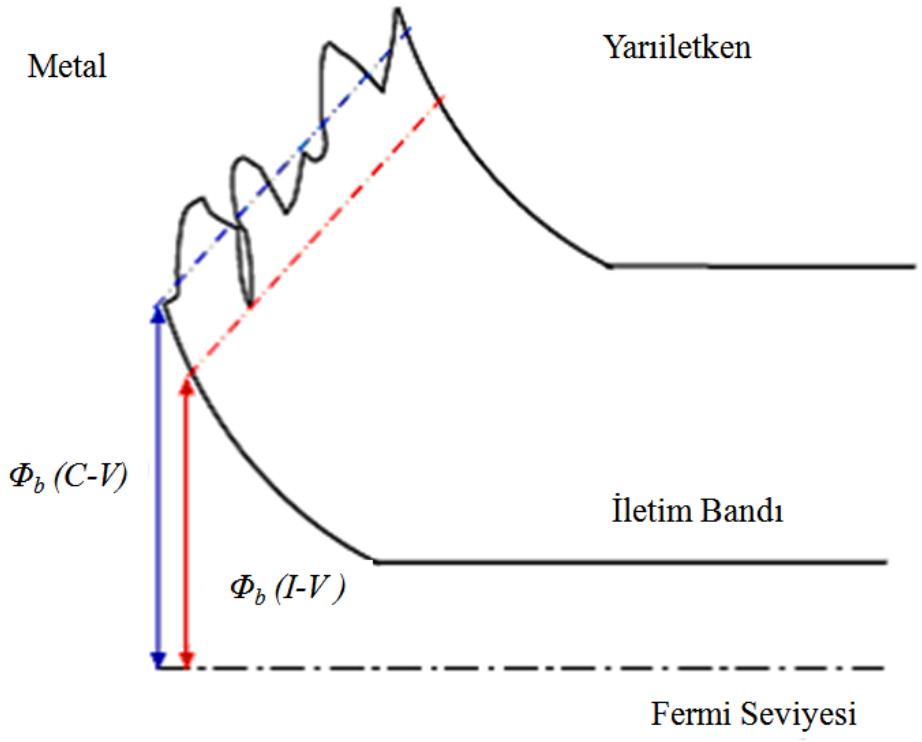
Bulduğumuz sonuçlara benzer sonuçları daha önce bazı araştırmacılar da tespit etmişlerdir. Aydoğan ve ark. (2009) C^{-2}–*V* ölçümlerinden ZnO filmin katkı konsantrasyonunu 1.5 kHz ve 10 kHz frekanslarda sırası ile 4.73×10^{15} cm^{-3}, 4.76×10^{15} cm^{-3} ve 5.15×10^{15} cm^{-3} buldular. C^{-2}–*V* grafiklerinden ters beslemde engel yüksekliklerini sırasıyla 0.73 eV, 0.71 eV ve 0.72 eV buldular. Elde edilen engel yüksekliği değerlerinin *I–V* ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği değerlerinden daha büyük olduğunu gördüler. Engel yükseklikleri arasındaki bu farkı engel yüksekliği homojensizliği, imaj kuvveti etkisi ve arayüzey tabakasına bağladılar.

Çizelge 4.3. ln*I–V* ve C^{-2}–*V* grafiklerinden hesaplanan engel yükseklikleri

Diyot	Φ_b *(I–V)* (eV)	Φ_b *(C–V)* (eV)
Ag/ZnO/p–Si	0.819	1.669

Diğer yandan Chaabouni ve ark. (2006) n–ZnO/p–Si yapısının *C–V* ölçümlerinden 100 kHz frekansta 25 °C, 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C'de difüzyon potansiyeli değerlerini 0.9 V, 0.6 V, 0.8 V, 0.8 V ve 0.7 V buludular. Taşıyıcı konsantrasyonu N_d 6.00×10^{17} cm^{-3}, 8.62×10^{16} cm^{-3}, 1.03×10^{19} cm^{-3}, 2.60×10^{18} cm^{-3} ve 1.21×10^{17} cm^{-3} buldular. Engel yüksekliği 0.93 eV, 0.68 eV, 0.76 eV, 0.79 eV ve 0.77 eV bulundu. Engel yüksekliği değerleri *I–V* ölçümlerinden belirtilen sıcaklıklarda sırasıyla 0.78 eV, 0.78 eV, 0.64 eV, 0.67 eV, 0.64 eV değerleri bulunmuştu. Sonuçlar karşılaştırıldığında engel yüksekliği dağılımının homojen olmadığını gördüler. C^{-2}–*V* grafiklerinden bulunan bu değerler ile *I–V* ölçümlerinden elde edilen değerlerin uyumlu olduğuna karar verdiler.

Dhananjay ve ark. (2007) Au/ZnO diyotunun engel yüksekliğini C^{-2}–*V* grafiklerinden 1.05 eV buldular. Bu değer daha önce *I–V* ölçümlerinden buldukları engel yüksekliği değerinden (1.02 eV) büyük çıktı. Aradaki bu küçük fark C^{-2}–*V* ölçümlerinden elde edilen sonucun *I–V* ölçümlerinden bulunan sonuçla uyumlu olduğunu gösterir.



Şekil 4.6. MS yapılarda *I–V* ve *C–V* ölçümleri için potansiyel dalgalanma (Güllü ve ark. 2008)

MS veya metal–yalıtkan–yarıiletken (MIS) için homojen olmayan engel yüksekliği modeline göre *I–V* ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği genellikle *C–V* ölçümlerinden elde edilen değerden daha küçüktür. *I–V* ve *C–V* ölçümlerinde kullanılan yöntemlerin farklılığından dolayı aynı sonuçlar elde edilemez. Kapasite (*C*) tükenim bölgesindeki potansiyel dalgalanmaya karşı hassas değildir ve ölçülen engel yüksekliği engel yüksekliği dağılımının ortalama değeridir. Fakat ara yüzeyden geçen akım engel yüksekliğine üstel olarak bağlıdır ve ara yüzey dağılımına karşı hassastır (Güllü ve ark. 2010). Şekil 4.6. MS yapılarda *I–V* ve *C–V* ölçümleri için potansiyel dalgalanmayı göstermektedir.

4.4. Kapasite–Frekans Ölçümleri

Schottky engel diyotlarının kapsitesi idealde frekanstan bağımsızdır. Metal ve yarıiletken arasında bir oksit tabakasının oluşması, arayüzey durumlarının oluşması, ve seri direncin olması durumlarında diyot ideallikten sapar. Diyota bir V gerilimi uygulandığında, bu gerilim oksit tabakası, yarıiletken uzay yükü bölgesi ve seri direnç arasında paylaşılır.

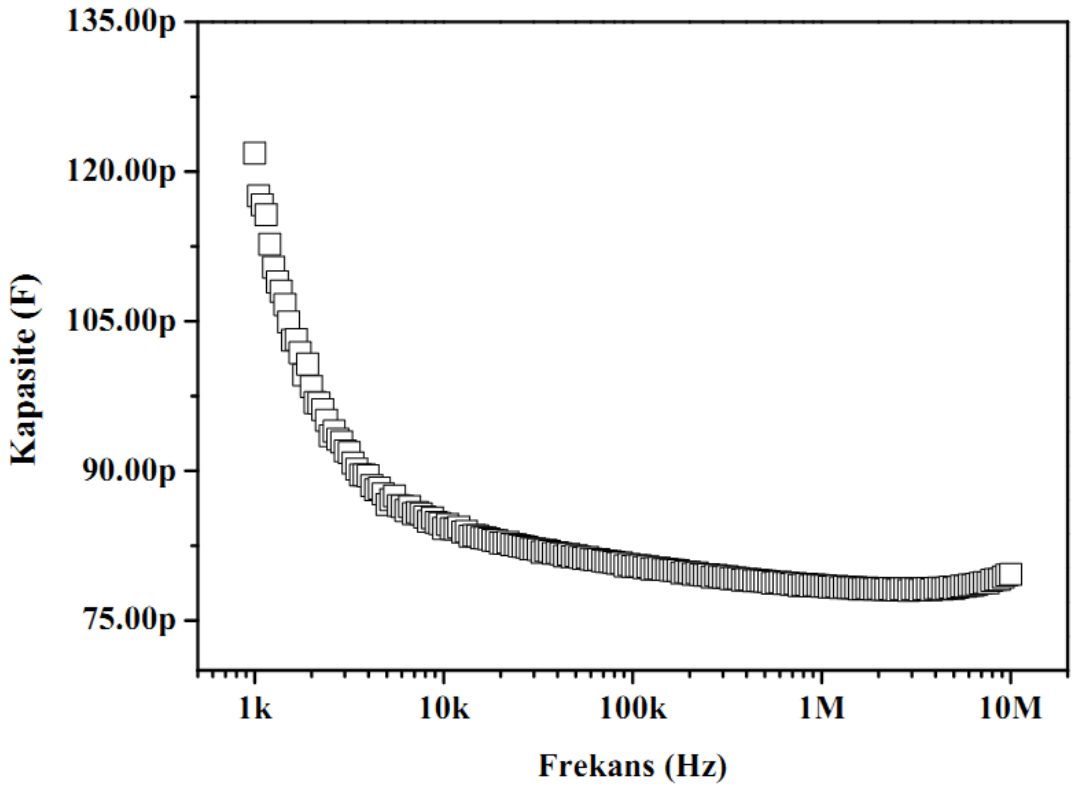
Düşük frekanstaki kapasite, doğrultucu kontağın tükenim bölgesi tarafından desteklenir. Düşük frekanslarda diyotun kapasitesine arayüzey durumlarından gelen katkılar, yüksek frekanslara doğru gidildikçe azalmakta ve yeterince yüksek frekanslarda arayüzey durumlarından gelen kapasite katkısı sıfıra çok yaklaştığından ihmal edilebilmektedir. Bu durumda yüksek frekanslarda eklem kapasitesi, arayüzey durumlarının AC sinyalini takip edememesinden dolayı, sadece uzay yükü kapasitesinden ibarettir. Frekans artarken diyotun toplam kapasitesi tükenim bölgesinin kapasitesini etkilediği gibi frekansa bağlı direnci de etkiler.

Genellikle ters beslemde frekans ve kapasitenin birbirine bağımlı olması Schottky engelinin bazı özelliklerinden, safsızlık seviyesinden ve yüksek dirençten kaynaklanır. Düşük frekanslarda yüksek kapasite değerlerinin AC sinyalini takip edebilmesi denge durumundaki arayüzey durumlarından çıkan aşırı kapasitenin bir sonucudur.

Ag/ZnO/p–Si diyotunun 1 kHz ile 10 MHz frekans aralığında 0.1 V sabit gerilim altında *C–f* ölçümü yapıldı. Buradan yapının arayüzey durumlarının AC sinyallerini takip edip edemedikleri incelendi. Bu ölçüm sonucu Şekil 4.7.'deki grafik üzerinde gösterildi. Bu grafikte düşük frekanslarda aşırı kapasite gözlendi. *C–f* grafiğinden de görüldüğü üzere, frekans arttıkça kapasite değeri küçülmektedir. Bunun sebebi arayüzey durumlarının AC sinyalini yüksek frekans değerleri için izleyememesidir. Uygulanan frekans değerinin 1000 kHz'den büyük olduğu durumlarda, arayüzey durumları AC sinyalini izleyemediğinden dolayı, arayüzey durumları eklem kapasitesine herhangi bir katkıda bulunmaz (Singh 1985, Chattopadyay ve RayChaudhuri 1993). Bu yüzden yüksek frekanslarda eklem kapasitesi, uzay yükü kapasitesine eşit olur. *C–f* grafiğinin düşük frekansta artık kapasite gösterip yüksek frekansta gösterememesi ve kapasitenin yüksek frekansta frekansa bağlı olmadığı ve sadece uzay yükü kapasitesine eşit olduğu görüldü. Yüksek frekanslarda, arayüzey durumları AC sinyalini takip edemediklerinden etkileri azalmaktadır. Şekil 4.7.'den görüldüğü gibi, seri direnç etkisi artan frekans ile daha belirgin bir şekilde kendisini hissettirmektedir. Düşük frekanslardaki artık kapasitenin varlığı diyodun arayüzey durumlarına ve omik kontak direncinin yüksek olmasına, düşük frekanslarda AC sinyalinin takip edilebilmesine atfedildi.

Bulduğumuz sonuçlar daha önce bazı araştırmacıların bulduğu sonuçlarla uyum içerisindedir. Benzer şekilde Werner ve ark. (1988) düşük frekanslarda kapasitenin büyük olmasını, arayüzey durumlarının metal ile dengelenmesinden çok yarıiletkendeki azınlık taşıyıcılarına bağladılar. Omik kontak direncinin düşük olması ve arayüzey tabakasının olmaması durumunda da artık kapasite gözlemleyemediler.

Aynı şekilde Batı ve ark. (2000) düşük frekanslarda arayüzey durumlarının AC sinyalini takip ettiğini ve artık kapasite verdiğini gördüler. Yüksek frekanslarda, arayüzey durumları AC sinyalini takip edemediklerinden etkilerinin azaldığını gözlediler. Dolayısıyla toplam kapasite frekansla azaldı. Arayüzey durumlarının AC sinyalini takip etmesinin seri direnç ile ters orantılı olduğunu gördüler. Akım yoğunluğu arttığında seri direnç etkisi daha etkili olmakta ve bu yüzden kapasite azalmaktaydı.



Şekil 4.7. Ag/ZnO/p–Si diyoduna ait *C–f* grafiği

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

MS ve MIS yapılar üzerine yapılan araştırmalar artarak devam etmektedir. Araştırmaların bir bölümü yeni yarıiletken malzemelerin hazırlanması yönünde gelişirken bir bölümü de bu yarıiletkenlerin elektronik özelliklerinin belirlenmesi ve bu özelliklerden faydalanılarak yeni metal–yarıiletken devre elamanları geliştirmeyi amaçlar.

Bu tezde önce elektriksel devre elemanlarının üretiminde kullanılmak amacıyla, diyotların oluşturulması için gerekli olan omik kontak işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem için tek magnetronlu saçtırma sistemi kullanılmıştır. Daha sonra vakum sisteminden Argon gazı geçirilerek Al ince filmi oluşturulmuştur. Saçtırma işleminden sonra yarıiletken, fırın içerisine konulmuş ve azot ortamında tavlanmıştır. Böylece omik kontaklı p–Si yapısı elde edilmiş oldu. Daha sonra p–Si/Al yapısı tekrar aynı vakum odasına alınmış ve p–Si/Al yapısı üzerine 200 nm ZnO ince filmi kaplanmıştır.

ZnO filmin oluşturulmasından sonra, yapı üzerine doğrultucu kontak elde etmek için Ag metalinin ince filmi oluşturulmuştur. Vakum odasına konulan ZnO/p–Si/Al yapısı üzerine gölge maske yardımı ile termal buharlaştırma tekniği kullanılarak Ag kontak oluşturulmuştur. Böylece Ag/ZnO/p–Si yapısı elde edilmiştir.

Yapının önce karanlıkta *I–V* ölçümleri alınmıştır. Yapılan ölçümler sonunda yapının doğrultma özelliğine sahip olduğu görülmüştür. Daha sonra Ag/ZnO/p–Si diyotunun idealite faktörünün Çizelge 4.1.'de görülebileceği gibi ln*I–V* grafiğinden 2.316 hesaplanmıştır. İdeal bir diyotun idealite faktörü 1'dir ve idealite faktörünün 1'den büyük olması, diyotlarda ideallikten sapmayı gösterir. Daha önce yapılan çalışmalarda bu sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Üretilen diyottaki bu ideallikten sapma genelde kullanılan ara tabakanın varlığına, arayüzey durumlarına ve seri direncin etkisine bağlanır. Bu sonuçlar ZnO ile ikinci bir mekanizmanın arayüzeyde oluşmasına, tükenim bölgesinde elektron ve deşiklerin tekrar birleşmesi veya uygulanan gerilim ile difüzyon akımının artmasına bağlanmıştır. Diyodun ln*I–V* grafiğinden engel yüksekliği 0.819 eV olarak hesaplanmıştır. Literatürde benzer diyotlarla karşılaştırıldığında Ag/ZnO/p–Si diyotunun engel yüksekliğinin daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Engel yükseklikleri arasındaki farklılıklar üretim koşullarının farklı

olmasına, oluşturulan arayüzeylerin kalınlıklarının farklı olmasına ve arayüzeyin homojen olmamasına atfedilmiştir.

Şekil 4.2.'de görüldüğü gibi, tüm yapıların ln*I*–*V* eğrileri yüksek gerilimlerde lineerlikten sapmaktadır. Bu sapmalar diyotdaki mevcut seri direnç etkisini göstermektedir. Diyoda ait seri direnç değeri Cheung tarafından geliştirilen metot ile hesaplanmıştır. Bu yöntemle önce d*V*/d(ln*I*)–*I ve H(I)–I* grafikleri çizilmiş ve bu grafikler yardımı ile diyodun idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnci hesaplanmıştır. Yapılan hesaplar sonunda d*V*/d(ln*I*)–*I ve H(I)–I* grafiklerinden elde edilen seri direnç değerlerinin birbirleri ile uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Hesaplanan tüm değerler Çizelge 4.2.'de verilmiştir. Çizelgeden de görülebileceği gibi bu yöntemle hesaplanan idealite faktörlerinin ln*I*–*V* grafiklerinden elde edilen değerlerden daha büyük olduğu görülmüştür. Bu sonuç seri direncin varlığına, arayüzey durumlarının etkisine ve arayüzey tabakası boyunca gerilim düşmesine atfedilebilmiştir.

Daha sonra oluşturulan yapının *C*–*V* ölçümü 500 kHz frekansında alınmış ve diyotun kapasite değerinin düz beslemde gerilim artarken arttığı görülmüştür. Ters beslemde ise daha düşük değerlerde kapasite gözlenmiştir. Diyotun engel yüksekliği ayrıca ters beslem C^{-2}–*V* eğrisinden de hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonunda ters beslem C^{-2}–*V* eğrisinden hesaplanan değerin ln*I*–*V* eğrisinden hesaplanan değerden daha büyük olduğu görülmüştür. Bu durum kapasitenin tükenim bölgesindeki potansiyel dalgalanmaya karşı hassas olmamasına ve ölçülen engel yüksekliği değerinin engel yüksekliği dağılımının ortalama değeri olmasına, buna karşın ara yüzeyden geçen akımın engel yüksekliğine üstel olarak bağlı olmasına ve ara yüzey dağılımına karşı hassas olmasına atfedilmiştir. Şekil 4.6.'da MS yapılarda *I*–*V* ve *C*–*V* ölçümleri için potansiyel dalgalanma gösterilmiştir.

Ag/ZnO/p–Si diyotunun *C*–*f* ölçümü yapıldı. Şekil 4.7.'deki grafikten de görüldüğü gibi düşük frekanslarda aşırı kapasite gözlendi. Düşük frekanslardaki artık kapasitenin varlığı diyodun arayüzey hallerine ve omik kontak direncinin yüksek olmasına, düşük frekanslarda arayüzey durumlarının AC sinyalini takip edebilmesine atfedilebildi.

6. KAYNAKLAR

Akane T., Sugioka K., and Midorikawa K., Vac J. 2000. Nonalloy Ohmic contact fabrication in a hydrothermally grown n–ZnO (0001) substrate by KrF excimer laser irradiation. Sci. Technol. B., 18: 1406.

Akkılıç, K., Kılıçoğlu, T., Türüt, A., 2003. Linear Correlation Between Barrier Heights and Ideality Factors of Sn/n–Si Schottky Diodes With and Without the Interfacial Native Oxide Layer. Physica B, 337: 388–393.

Akkoyunlu, O. 2000. "Çinkooksit Yarıiletken Bileşiğin Elektriksel ve Optik Özellikleri" Y.Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Aoki T., Look D.C., Hatanaka, Y., 2000. ZnO Diode Fabricated by Excimer–Laser Doping. Appl. Phys. Lett., 76: 3257–3258.

Archibald, P., Parent, E. 1976. Solid State Technology, 19: 32–40.

Aydın, M.E., Türüt, A., 2007. Microelectronic Engineering, 84: 2875–2882.

Aydoğan, Ş., Çınar, K., Asıl, H., Coşkun, C., Türüt, A. 2009. Electrical characterization of Au/n–ZnO Schottky contacts on n–Si. Journal of Alloys and Compounds, 476: 913–918.

Bacaksiz, E., Parlak, M., Tomakin, M., Özçelik, A., Karakız, M., Altunbaş, M. 2008. The effects of zinc nitrate, zinc acetate and zinc chloride precursors on investigation of structural and optical properties of ZnO thin films. Journal Alloy and compounds, 466: 447-450.

Bacaksız, E., Çankaya, G., Polat, İ., Yılmaz, S., Duran, C., Altunbaş, M. 2010. Structural and Electrical characterization of ZnO-based homojunctions. Journal of Alloys and Compounds, 496: 560-565.

Badran, R.I., Umar, A., Al–Heniti, S., Al–Hajry, A., Al–Harbi, T. 2010. Synthesis and characterization of zinc oxide nanorods on silicon for the fabrication of p–Si/n–ZnO heterojunction diode. Journal of Alloys and Compounds, 508: 375–379.

Bardeen, J., 1947. Surface States and Rectification at a Metal–Semiconductor Contact. Phys. Rev., 71: 717–727.

Batı, B., Nuhoğlu, Ç., Sağlam, N., Türüt, A. 2000. On The Forward Bias Excess Capacitance at Intimate and MIS Schottky Barrier Diodes With Perfect Ohmic Back Contact. Physıca Scripta, 53: 209–212.

Bethe, H.A. 1942. Theory of The Boundry Layer of Crystal Rectifiers. Mass. Inst. Techol. Radiat. Lap. Rep, 43.

Brattain, W.H., Bardeen J. 1948. Nature of The Forward Current in Germanium Point Contacts. Physical Rev.,74: 231–232.

Bunn., C.W. 1935. The lattice–dimensions of zinc oxide. Proc. Phys. Soc. London, 47: 835.

Card, H.C.; Rhoderick, E.H. 1971. Studies of tunnel mos diodes. Interface effects in silicon schottky diodes. J. Phys. D: Appl. Phys., 4: 1589–1601.

Carlsson, J.M. 2002. A First–Principles Study of Interface Systems: Electronics Properties of Metal Quantum Wells and Varistor Materials. PhD.Thesis, Göteborg University.

Chaabouni, F., Abaab, M., Rezig, B. 2006. Characterization of n–ZnO/p–Si films grown by magnetron sputtering. Superlattices and Microstructures, 39: 171–178.

Chattopadhyay, P., Raychaudhuri, B., 1993. Frequency Dependnce of Forwerd Capaticance–Voltage Characteristics of Schottky Barrier Diodes. Solid–State Electron, 36 (4): 605–610.

Chattopadhyay, P., Kumar,V. 1988. Experimental investigation of barrier height versus metal work function of metal – SiO2– p Si (MIS) Schottky barrier diode in presence of inversion. Solid–State Electronics, 3: 143.

Chen, Z.Q., Sekiguchi, T., Yuan, X.L. 2003. N+ Ion–Implantation– Induced Defects in ZnO Studied with a Slow Positron Beam. J.Phys. Condens. Matter, 16: 93–99.

Cheung, S.K., Cheung, N.W., 1986. Extraction of schotky diode parameters From I–V characteristics. Appl. Phys. Lett., 49 (2): 85–87.

Choi, J., Das, S. N., Moon, K., Kar, J. P., Myoung J. 2010. Fabrication and characterization of p-Si nanowires/ZnO film heterojunction diode. Solid-State Electronics, 54: 1582–1585.

Cowley, A. M., Sze, S. M. 1965. Surface states and barrier height of metal–semiconductor systems. J. Appl. Phys., 96: 3212.

Crowell, C.R., Sze, S.M. 1966. Current Transport in Metal–Semiconductor Barriers. Solid–State Electronics, 9: 1035.

Çaglar, Y., Ilıcan, S., Çaglar, M., Yakuphanoğlu, F., Wu, J., Gao, K., Lu, P., Xu, D. 2009. Influence of heat treatment on the nanocrystalline structure of ZnO film deposited on p–Si. Journal of Alloys and Compounds, 481: 885–889.

Dhananjay., Nagaraju, J., Krupanidhi, S.B. 2007. Investigations on magnetron sputtered ZnO thin films and Au/ZnO Schottky diodes. Physica B, 391: 344-349.

Duan, L., Yu, X., Ni, L., Wang, Z. 2011. ZnO:Ag film growth on Si substrate with ZnO buffer layer by rf sputtering. Applied Surface Science, 257: 3463–3467.

El–Nahass, M. M., Abd–El–Rahman, K. F., Farag, A. A. M., Darwish, A.A.A. 2005. Photovoltaic properties of NiPc/p–Si (organic/inorganic) Heterojunctions Organic Electronics 6: 129–136.

El–Adawi, M. K., Al–Nuaim, I. A., 2002. A method to determine the solar cell series curve considering its shunt resistance–new approach. Vacuum, 64: 33–36.

El–Shaer, A., Bakin, A., Schlenker, E., Mofor, A.C., Wagner, G., Reshanov, S.A., Waag, A. 2007. Fabrication and characterization of n–ZnO on p–SiC heterojunction diodes on 4H–SiC substrates. Superlattices and Microstructures, 42: 387–391.

Fahrenbruch A.L., 1977. II–VI Compounds in Solar Energy Conversion, J. Cryst. Growth, 39: 73–91.

Gaspar, C., Costa, F., Monteiro, T. 2001. Optical Characterization of ZnO. J.Mat.Sci., 12: 269–271.

Gupta, R.K., Ghosh, K., Kahol, P.K. 2009. Fabrication and characterization of NiO/ZnO p–n junctions by pulsed laser deposition. Physica E, 41: 617–620.

Güllü, Ö., Asubay, S., Biber, M., Kılıçoğlu, T., Türüt, A. 2010. Electrical characteristics of the Safranine T/p–Si Organic/Inorganic semiconductor devices. Eur. Phys. J. Appl. Phys., 50: 10401.

Güllü, Ö., Barış, Ö., Biber, M., Türüt, A., 2008. Laterally inhomogeneous barrier analysis of the methyl violet/p-Si organic/inorganic hybrid Schottky structures. Applied Surface Science, 254: 3039–3044.

Han, W. G., Kang, S. G., Kim, T. W., Kim, D. W., Cho, W. J. 2005. Effect of Thermal Annealing on the Optical and Electronic Properties of ZnO Thin Films Grown on p–Si Substrates. Applied Surface Science, 245, 384.

Hazra, S.K., Basu, S. 2005. ZnO p–n junctions produced by a new route. Solid–State Electronics, 49: 1158–1162.

Heller, R. B., McGannon, J., Weber, A.H., 1950. Precision Determination of the Lattice Constants of Zinc Oxide. J. Appl. Phys., 21: 1283.

Horvath, Zs. J. 1988. Evaluation of the interface state energy distribution from. Schottky I–V Characteristics. J. Appl. Phys., 63: 976–978.

Ievtushenko, A.I., Karpyna, V.A., Lazorenko, V.I., Lashkarev, G.V., Khranovskyy, V.D., Baturin, V.A., Karpenko, O.Y., Lunika, M.M., Avramenko, K.A., Strelchuk, V.V., Kutsay, O.M. 2010. High quality ZnO films deposited by radio–frequency magnetron sputtering using layer by layer growth method. Thin Solid Films 518: 4529–4532.

Islam, M. M., Ishizuka, S., Yamada, A., Matsubara, K., Niki, S., Sakurai, T., Akimoto, K. 2011. Thickness study of Al:ZnO film for application as a window layer in Cu(In1−xGax)Se2 thin film solar cell.Applied Surface Science, 257: 4026–4030.

Jeong, T. S., Han, M. S., Young, C. J. 2004. Raman Scattering and Photoluminescence af As Ion–Implanted ZnO Single Crystal. Journal of Applied Physics, 96: 175–179.

Kaminski, A., Marchand, J. J., Laugier, A. 1999. I–V methods to extract junction parameters with specialemphasis on low series resistance. Solid State Electron, 43: 741–745.

Kılıçoğlu, T., Aydın, M.E., Topal G., Ebeoğlu, M.A., Saygılı, H.2007. The effect of novel organic compound chiral macrocyclic tetraamide–I interfacial layer on the calculation of electrical characterisic of an Al/tetraamide–I/p–Si contact. Synthetic Metals, 157, 540–545.

Kim D. K., Kim H. B. 2011. Room temperature deposition of Al–doped ZnO thin films on glass by RF magnetron sputtering under different Ar gas pressure. Journal of Alloys and Compounds, 509: 421–425.

Kim, H. K., Han, S. H., Seong, T. Y., Choi, W. K. 2001. Electrical and Structural Properties of Ti/Au Ohmic Contacts to n–ZnO. J. Electrochem. Soc. 148, G114.

Kim, J., Cho, D., Lee, W., Moon, B., Bang, W., Kim, S., Kim, N., Koo, S. 2010. Structural and optical properties of epitaxial ZnO thin films on 4H–SiC (0001) substrates prepared by pulsed laser deposition. Journal of Alloys and Compounds, 489: 179–182.

Kim, K.J., Park, Y.R., 2001. Large and abrupt optical band gap variation in In–doped ZnO. Appl. Phys. Lett., 78: 475.

Klason, P. , Rahman, M.M., Hu, Q.-H., Nur, O., Turan, R., Willander, M. 2009. Fabrication and characterization of p-Si/n-ZnO heterostructured junctions. Microelectronics Journal, 40: 706–710.

Lee, J.Y., Choi, Y.S., Choi, W.H., Yeom, H.W., Yoon, Y.K., Kim, J.H., Im, S. 2002. Characterization of films and interfaces in n–ZnO/p–Si photodiodes. Thin Solid Films, 420–421: 112–116.

Lee, H. S., Lee, J. Y., Kim, T. W., Kim, D. W., Cho, W. J., 2004. Formation Mechanism of Preferential c–axis Oriented ZnO Thin Films Grown on p–Si Substrates. Journal of Materials Science, 39, 3525.

Look, D.C. 2001. Recent Advances in ZnO Materials and Devices. Mat. Sci. And Eng. B, 80: 383–387.

Look, D.C., Claflin, B. Y., Alivov, I. 2004. The Future of ZnO Ligth Emitters. Phys. Stat. Sol., 201: 2203–2212.

Look, D.C., Coşkun, C., Claflin, B. 2003. Electrical and Optical Properties of Defect and Impurities in ZnO. Condanset Matt., 340–342: 32–38.

Madelung, O., Schulz, M., Weiss, H. 1982. Semimagnetic Semiconductors. Landolt–Bornstein, New Series, Group III, vol. 17, Part B, Springer. Berlin.

Majumdar, S., Banerji, P. 2009. Moisture sensitivity of p–ZnO/n–Si heterostructure. Sensors and Actuators B, 140: 134–138.

Majumdar, S., Chattopadhyay, S., Banerji, P. 2009. Electrical characterization of p-ZnO/p–Si heterojunction. Applied Surface Science, 255: 6141–6144.

Mead C. A., 1965. Surface Barriers on ZnSe and ZnO. Phys. Lett., 18: 218.

Minami, T. 2005. Semicond. Sci. Technol., 20: 35.

Mohatny, G. P., Azaroff, L. V., J. 1961. Electron Density Distributions in ZnO Crystals. Chem. Phys., 35: 1268.

Mott, N. F. 1938. Note on the contact between a metal and an insulator or semiconductor. Proc. Cambridge Philos. Soc., 34, 568.

Mönch, W.1987. Role of virtual gap states and defects in metal–semiconductor contacts. The American Physical Society, 58 (12) 1260–1263.

Nahm, C. W., Park,C. H. 2000. Microstructure, electrical properties, and degradation behavior of praseodymium oxides-based zinc oxide varistors doped with Y2O3. Journal of Materials Science. 35: 3037–3042.

Neamen, D. A. 2003. Semiconductor Physics And Devices Basic Principles, Third. Edition. McGraw Hill, New York.

Neville, R. C., Mead, C. A. 1970. Surface Barriers on Zinc Oxide. Appl. Phys. 41, 3795.

Norde, H. 1979. A modified forward I–V plot for. Schottky diodes with high series resistance. Journal of Applied Physics, 50, 5052–5053.

Ocak, Y. S. 2010. ‟Organik–İnorganik Hibrit Yapıların Elektriksel ve Fotoelektriksel Karakterizasyonu” Doktora Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.

Ocak, Y.S., Kulakci, M., Turan, R., Kılıçoğlu,T., Güllü, Ö. 2011. Analysis of electrical and photoelectrical properties of ZnO/p–InP heterojunction. Journal of Alloys and Compounds, 509: 6631–6634.

Oh, D. C., Kim, J. J., Makino, H., Hanada, T., Cho, M. W., Yao, T., Ko, H. J. 2005. Characteristics of Schottky contacts to ZnO:N layers grown by molecular–beam epitaxy. Appl. Phys. Lett., 86, 042110.

Okur, S., Yakuphanoğlu, F., Özsöz, M., Kadayıfçılar, P.K., 2009. Electrical and interface properties of Au/DNA/n–Si organic–on–inorganic structures. Microelectronic Engineering, 86:2305–2311.

Park, D.C., Sakaguchi, I., Oahashi, N. 2003. SIMS Depth Profiling of N And In a ZnO Single Crystal. Applied Surface Science, 203–204: 359–362.

Polyakov, A. Y., Smirnov, N. B., Kozhukhova, E. A., Vdovin, V. I., Ip, K., Heo, Y. W., Norton, D. P., Pearton, S. J. 2003. Electrical characteristics of Au and Ag Schottky contacts on n–ZnO. Appl. Phys. Lett., 83: 1575.

Powell, C.F., Oxley, J.H., Blocher Jun, J.M.1966. Vapour Deposition Wiley. New York, 1966.

Quemener, V., Vines, L., Monakhov, E. V., Svensson, B. G. 2011. Electronic properties of n–ZnO(Al)/p–Si heterojunction prepared by DC Magnetron sputtering. Thin Solid Films, 519: 5763–5766.

Reynolds, D.C., Look, D.C., Jogai, B. 1998. Neutral–Donor–Bound–Exciton Complex in ZnO Crystals. Phys. Rev. B, 57: 12151–12155.

Reynolds, D. C., Collins, T. C., 1969. Excited terminal states of a bound exciton–donor complex in ZnO. Phys. Rev., 185, 1099.

Rhoderick, E. H., Williams, R. H. 1988. Metal–Semiconductor Contacts, Claredon Pres, Second Edition, Oxford.

Rideout, V. L., 1978. A Review of The Theory, Technology and Application of Metal–Semiconductor Rectifiers. Thin Solid Films, 48: 261–266.

Romero, R., López, M. C., Leinen, D., Martin, 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.

Rossler, U. 1999. Landolt–Bornstein, New Series, Group III. Vol. 17B, 22, 41B. Springer, Heidelberg.

Ryu, Y. R., Zhu, S., Look, D. C. 2000. Synthesis of p–type ZnO Films. Journal of Crystal Growth 216: 330–334.

Sahoo, T., Kim, M., Lee, M., Jang, L., Jeon, J., Kwak, J. S., Ko, I., Lee. I. 2010. Nanocrystalline ZnO thin films by spin coating–pyrolysis method. Journal of Alloys and Compounds 491: 308–313.

Schottky, W., 1938. Halbleitertheorie der Sperrschicht. Naturwissenschaften, 26, 843.

Schottky, W., Störmer, R., Waibel, F., Zeits, F.1931. Hochfrequenztechnik, 37, 162.

Sharma, S. K., Inamdar, A. I., Im H., Kim, B. G., Patil, P. S. 2011. Morphology dependent dye–sensitized solar cell properties of nanocrystalline zinc oxide thin films. Journal of Alloys and Compounds, 509: 2127–2131.

Shen, L., Ma, Z. Q., Shen, C., Li F., He, B., Xu, F. 2010. Studies on fabrication and characterization of a ZnO/p–Si–based solar cell. Superlattices and Microstructures, 48: 426–433.

Sheng, H., Muthukumar, S., Emanetoglu, N. W., Lu, Y. 2002. Schottky diode with Ag on (110) epitaxial ZnO film. Appl. Phys. Lett. 80: 2132.

Singh, A. 1985. Characterization of interface states at Ni/nCdF2 Schottky barrier type diodes and the effect of CdF_2 surface preparation. Solid State Electron., 28(3): 223–232.

Srikant, V., Clarke, D. R., 1998. On the optical band gap of zinc oxide. J. Appl. Phys., 83: 5447.

Sun, J., Feng, Q., Bian, J., Yu, D., Li, M., Li, C., Liang, H., Zhao, J., Qiu, H., Dub, G. 2011. Ultraviolet electroluminescence from ZnO–based light–emitting diode

with p–ZnO:N/n–GaN:Si heterojunction structure. Journal of Luminescence, 131: 825–828.

Szatkowski, J., Sieranski, K. 1992. Simple interface layer model for the nonideal characteristics of the Schottky diode. Solid–State Electronics, 35: 1013–1015.

Sze, S.M., Crowell, C.R., Khang, D., 1964. Photoelectric Determination of Image Force Dielectric Constant for Hot Electrons in Schottky Barriers. J. Appl. Phys., 35: 2534–2536.

Sze, S.M. 1981. Physics of Semiconductor Devices. Second Edition,Wiley, New York.

Torrey, H.C., Whitmer C.A. 1948. Crystal Rectifiers, Mc Graw Hill Inc., New York.

Tseng, H. H., Wu, C. Y. 1987. Solid State. Electron., New York, McGraw–Hill, 30: 383–390.

Tung, T. R. 2001. Recent advances in Schottky barrier concepts. Materials Science and Engineering R–Reports. Materials Science and Engineering, 35: 1–138.

Turner, M. J., Rhoderick, E. H., 1968. Metal–Silicon Schottky Barriers. Solid State Elect., 11: 291–300.

Türüt, A.; Sağlam, M. 1992. Determination of the density of Si-metal interface state and excess capacitance caused by them. Physica B: Condensed Matter, 179: 285–294.

Türüt, A., Yalçin, N., Sağlam, M., 1992. Parameter extraction from non–ideal C–V characteristics of a Schottky diode with and without interfacial layer. Solid–State Electronics, 35 (6) 835–841.

Tüzemen, S., Xiong, G., Wilkinson, J., Mischuck, B., Ucer, K.B., Williams, R.T. 2001. Production and properties of p–n junctions in reactively sputtered ZnO. Physica B, 308–310: 1197–1200.

Wehner, G.K., 1955. Sputtering by ion bombardment. Advances in Electronics and Electron Phys., 7, 239.

Werner, J., Tung, R.T., Levi, A. F.J., Anzlovar, M., Pinto, M. 1988. Origin of Excess Capacitance at Intimate Schottky Contacts. Phys. Review Lett, 60 (1): 53–56.

Wikipedia. Zinc Oxide. Erişim: [http://en.wikipedia.org/wiki/Zinc_oxide]. 26.02.2011.

Wilmsen, C. W. 1985. Physics and Chemistry of III–V Compound Semiconductor Interfaces. Plenum Press, New York.

Wilson, A. H. 1932. A Note on the Theory of Rectification. Proc. Roy. Soc. London, Series A, 136: 487.

Xu, N. Ching, W. Y. 1993. Electronic Optical and Structural Properties of Some Wurtzite Crystals. Phys.Rew. B, 48: 4335–4351.

Xu, P. S., Sun, Y. M., Shi, C. S. 2003. The Electronic Structure and Spectral Properties of ZnO and its Defects. NIMB, 199: 286–290.

Yakuphanoğlu, F., Çağlar, M., Çağlar, Y., Ilıcan, S. 2010. Electrical characterization of nanocluster n–CdO/p–Si heterojunction diode. Journal of Alloys and Compounds, 506: 188–193.

Yakuphanoğlu F. 2010. Electrical characterization and device characterization of ZnO microring shaped films by sol–gel method. Journal of Alloys and Compounds, 507: 184–189.

Yakuphanoglu, F., Caglar, Y., Caglar, M., Ilican. S. 2010. ZnO/p–Si heterojunction photodiode by sol–gel deposition of nanostructure n–ZnO film on p–Si substrate. Materials Science in Semiconductor Processing, 13: 137–140.

Zhang, C., 2010. High–quality oriented ZnO films grown by sol–gel process assisted with ZnO seed layer Journal of Physics and Chemistry of Solids, 71: 364–369.

Zhang, C., Li, X., Bian, J., Yu, W., Gao, X. 2005. Nitrogen and aluminum codoped p–type ZnO films and ZnO p–n homojunctions. Surface & Coatings Technology, 198: 253–256.

Zhang, Y., Xu, J., Lin, B., Fu, Z., Zhong, S., Liu, C., Zhang, Z. 2006. Fabrication and electrical characterization of nanocrystalline ZnO/Si heterojunctions. Applied Surface Science, 252: 3449–3453.

Zhanga, D. K., Liua, Y. C., Liu, Y. L. Yang, H. 2004. The electrical properties and the interfaces of Cu2O/ZnO/ITO p–i–n heterojunction. Physica B, 351: 178–183.

Zhu, G., Lv, T., Pan, L., Sun, Z., Sun, C. 2011. All spray pyrolysis deposited CdS sensitized ZnO films for quantum dot–sensitized solar cells. Journal of Alloys and Compounds, 509: 362–365.

Ziel, A.V., 1968. Solid State Physical Electronics, Prentice–Hall, Inc., New–Jersey, P.97–245.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	:Cihat BOZKAPLAN
Doğum Yeri	:Çermik/DİYARBAKIR
Doğum Tarihi	:03.05.1976
Medeni Hali	:Evli
Yabancı Dili	:İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise	:Diyarbakır Birlik Lisesi	1993
Lisans	:Harran Üni. Fen Edebiyat Fak. Fizik Bölümü	1998
Yüksek Lisans	:Dicle Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü	2011

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl:

Öğretmen	Özel Eğitim Kurumları	1998–2011