

**MgZnO NANO FİBER FİLM/p-SİLİSYUM HETEROEKLEM  
DİYOTLARIN ÜRETİLMESİ VE ELEKTRİKSEL  
KARAKTERİZASYONU**

**Özgül SAVAŞ**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Fizik Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Murat SOYLU**

**2015  
Her hakkı saklıdır**

T.C.  
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MgZnO NANO FİBER FİLM/p-SİLİSYUM  
HETEROEKLEM DİYOTLARIN ÜRETİLMESİ VE  
ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Özgül SAVAŞ**

**Enstitü Anabilim Dalı : FİZİK**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Murat SOYLU**

**Haziran 2015**

T.C.  
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MgZnO NANO FİBER FİLM/p-SİLİSYUM HETEROEKLEM  
DİYOTLARIN ÜRETİLMESİ VE ELEKTRİKSEL  
KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Özgül SAVAŞ**

**Enstitü Anabilim Dalı : FİZİK**

**Bu tez 04.06.2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile kabul edilmiştir.**

**Prof. Dr.  
Fahrettin YAKUPHANOGLU  
Jüri Başkanı**

**Doç. Dr.  
Murat SOYLU  
Üye**

**Doç. Dr.  
Nezir YILDIRIM  
Üye**

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Doç. Dr. İbrahim Y. ERDOĞAN  
Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Tez çalışmaları süresince yardımlarını ve bilgi birikimini esirgemeyen, çalışmalarım tamamlanabilmesi için gerekli desteği veren değerli hocam Doç. Dr. Murat SOYLU'ya teşekkür ederim.

Kendisini akademisyen olarak örnek aldığım, bilimsel anlamda ve insani değerler bakımından kendisinden çok şey öğrendiğim, tez konusunun belirlenmesinden sonuçlanmasına kadar her aşamada bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren, deneysel çalışmaların yapılması ve yorumlanması esnasında yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen, Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU hocama teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez çalışmasına desteklerinden dolayı Bingöl Üniversitesi Rektörlüğüne ve Fırat Üniversitesi Rektörlüğüne teşekkür ederim.

Tez izleme sınavlarım esnasında yaptıkları yönlendirmeler ve katkılarından dolayı değerli hocalarım Yrd. Doç. Dr. Zafer ŞERBETCİ'ye, deneysel çalışmalar esnasında yardımlarını gördüğüm başta değerli hocam Doç. Dr. Mehmet ÇAVAŞ'a, Mürüvet KALAY'a ve Yusuf ORMAN'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Kardeşim Mustafa Adil SAVAŞ anısına hazırladığım bu tezimde, bende büyük emekleri olan, benim için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan, dualarını esirgemeyen babam Mehmet SAVAŞ'a ve annem Remziye SAVAŞ'a özellikle teşekkürü bir borç bilirim. Hayatımın her döneminde varlıklarıyla bana güven veren başta abim Oktay SAVAŞ'a, kardeşlerim Şeyma SAVAŞ ve Ali Salim SAVAŞ'a, hayat arkadaşım Samet Alakuştekin'e teşekkürlerimi sunarım.

**Özgül SAVAŞ**

**Bingöl 2015**

# İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2 KURAMSAL TEMELLER.....	8
2.1. Yarıiletkenlerin Optik Özellikleri.....	8
2.2. Metal Yarıiletken Kontak.....	10
2.2.1. Metal/n-tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontak.....	12
2.2.2. Metal/n-Tipi Yarıiletken Omik Kontak.....	15
2.2.3. Metal/p-Tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar.....	16
2.2.4. Metal/p-tipi Yarıiletken Omik Kontak.....	18
2.3. Sol-Gel Yöntemi.....	22
2.3.1. Sol-Gel Döndürme Yöntemi.....	24
2.4. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM).....	24
2.5. ZnO ve Yapısal Özellikleri.....	25
2.6. ZnO'nin Elektriksel ve Optiksel Özellikleri.....	27
3. MATERYAL ve METOT.....	28
3.1. Deneysel İşlemler.....	28
4. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	33

4.1. Giriş .....	33
4.2. ZnO İnce Filmlerin Morfolojik ve Optik Karakteristikleri.....	33
4.3. Katkısız ve Mg Katkılı ZnO/p-Si Heteroyapılı Diyotların Elektriksel Karakteristikleri.....	38
KAYNAKLAR.....	43
ÖZGEÇMİŞ.....	50

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$R^*$	: Richardson sabiti
$e$	: Elektronik yük
$E_g$	: Yasak enerji aralığı
$E_c$	: İletkenlik bandının alt ucundaki enerji
$E_f$	: Fermi enerji seviyesi
$E_v$	: Valans bandının üst ucundaki enerji
$f(E)$	: Fermi dağılım fonksiyonu
$F$	: Etkileşim kuvveti
$k$	: Boltzman sabiti
$\alpha$	: Soğurma katsayısı
$V$	: Potansiyel
$V_b$	: Built-in potansiyel engeli
$\nu$	: Frekans
$T$	: Mutlak sıcaklık
$B$	: Soğurganlık
$\lambda_g$	: Fotonun dalga boyu
$k$	: Sönüm katsayısı
$n$	: İdealite faktörü
$T_i$	: İletim
$R$	: Yansıtma
$d$	: Film kalınlığı
$I$	: Metal-yarıiletken kontaktaki net akım
$I_0$	: Metal-yarıiletken kontaktaki doyma akımı
$c$	: Boşluktaki ışık hızı
$F(V)$	: Norde fonksiyonu

$R_s$	: Seri direnç
$I_{\min}$	: Minimum akım
$V_{\min}$	: Minimum voltaj
$\gamma$	: Herhangi bir tam sayı
$\Phi_b$	: Schottky engel yüksekliği
$\Phi_m$	: Metalin iş fonksiyonu
$\Phi_s$	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
$h$	: Planck sabiti
$\chi_s$	: Elektron ilgisi
$E_s$	: Valans bandın tepe noktası ile vakum seviyesinin tabanı arasındaki enerji farkı
$k_1$	: Yay sabiti



## Kısaltmalar

MS	: Metal-Yarıiletken
MIS	: Metal-Yalıtkan-Yarıiletken
I-V	: Akım-Voltaj
FS	: Fermi Seviyesi
SE	: Schottky Engeli
MESFET	: Metal-Yarıiletken Alan Etkili Transistör
TE	: Termiyonik Emisyon
TAE	: Termiyonik Alan Emisyonu
AE	: Alan Emisyonu
AFM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
FL	: Fotoluminesans
HRXRD	: Yüksek Çözünürlüklü X Işınımı Kırınımı
TCO	: Saydam İletken Oksit
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
ZnO	: Çinko Oksit
et al.	: ve diğerleri

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Metal-yarıiletken kontağın şematik yapısı.....	10
Şekil 2.2.	Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak enerji band diyagramı .....	13
Şekil 2.3.	Metal/n-tipi yarıiletken omik kontağı enerji-bant diyagramı .....	16
Şekil 2.4.	Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontağı enerji-bant diyagramı .....	17
Şekil 2.5.	Metal/p-tipi yarıiletken omik kontak enerji-bant diyagramı.....	19
Şekil 2.6.	ZnO'in kristal yapısı (Özgür 2005).....	26
Şekil 3.1.	Cam altlıkların kimyasal temizleme işlemlerinin şematik gösterimi .....	29
Şekil 3.2.	Dönel kaplama (Spin coating) cihazı .....	30
Şekil 3.3.	UV-vis spektrofotometre .....	30
Şekil 3.4.	Termal buharlaştırma cihazı.....	31
Şekil 3.5.	Atomik kuvvet mikroskobu (AFM).....	31
Şekil 4.1.	AFM mikrofotografılar (40x40 $\mu$ m <sup>2</sup> ve 5x5 $\mu$ m <sup>2</sup> alanlı).....	34
Şekil 4.2.	Katkısız ve Mg katkılı ZnO ince filmlerin geçirme spektrumu .....	35
Şekil 4.3.	Katkısız ve Mg katkılı ZnO ince filmlerin yansım spektrumu .....	36
Şekil 4.4.	Katkısız ve Mg katkılı ZnO ince filmlerin soğurma spektrumu .....	36
Şekil 4.5.	Katkısız ve Mg Katkılı ZnO ince filmleri için $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ eğrileri.....	37
Şekil 4.6.	Fermi seviyesi dengesinden sonra enerji band diyagramı.....	38
Şekil 4.7.	Katkısız ve Mg katkılı ZnO/p-Si heteroeklem diyotların akım-voltaj karakteristikleri.....	39
Şekil 4.8.	Katkısız ve Mg katkılı ZnO/p-Si heteroeklem diyotların F(V)-V eğrileri.....	41

## TABLULAR LİSTESİ

Şekil 3.1.	ZnO numunelerine Mg katkılama miktarları .....	28
Şekil 4.1.	Katkısız ve Mg katkılı ZnO filmler için bazı yapısal ve elektronik parametreler .....	38

# MgZnO NANO FİBER FİLM/p-SİLİSYUM HETEROEKLEM DİYOTLARIN ÜRETİLMESİ VE ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU

## ÖZET

Katkısız ve magnezyum katkılı ZnO ince filmler dönel kaplama metodu ile p-tip Si ve cam altlık üzerine oluşturuldu. Dönel kaplama tekniği kullanılarak sol-gel işlemi ile hazırlanan ZnO filmlerinin elektriksel ve optik özellikleri araştırıldı. İki boyutlu atomik kuvvet mikroskobu görüntüleri ZnO ince filmlerinin nano parçacık içerikli fiberlerden oluştuğunu gösteriyor. MgZnO/p-Si heteroeklemlerin elektriksel iletkenlik mekanizması akım voltaj ölçümleri ile araştırıldı. MgZnO/p-Si örneklerinin akım-voltaj karakteristikleri doğrultucu davranış gösteriyor. Diyotların doğrultma oranları, uygulanan voltaj ve magnezyum katkı miktarlarına bağlı bulundu. MgZnO/p-Si heteroeklem diyotlar arayüzey tabakası, arayüzey halleri ve seri dirence atfedilen '1' den büyük idealite faktörüne sahip ideal olmayan davranış sergiledi. Katkısız ve Mg katkılı ZnO/p-Si diyotların engel yüksekliği değerleri 0,78-0,84 eV aralığında bulundu. ZnO/p-Si heteroeklem diyotların elektriksel özelliklerinin Mg katkısı ile kontrol edilebildiği sonucuna varıldı. İlâveten, elde edilen bulgular ZnO ince filmlerin optik band aralıklarının Mg katkı seviyeleri ile ayarlanabileceği öneriyor.

**Anahtar Kelimeler:** Sol-gel büyütme, ZnO ince film, diyot, elektriksel özellikler.

# FABRICATION AND ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF NANOFIBER MgZnO/p-SILICON HETEROJUNCTION DIODES

## ABSTRACT

Undoped and Mg doped ZnO thin films were deposited on p-Si and glass substrates by spin coating method. Electrical and optical properties of ZnO films prepared by the sol-gel process using a spin-coating technique were investigated. Two dimensional atomic force microscopy images indicate that the ZnO films are formed from the fibers consisted from nanoparticles. The electrical conductivity mechanism of MgZnO/p-Si heterojunctions was investigated by current-voltage ( $I$ - $V$ ) measurements. The  $I$ - $V$  characteristics of MgZnO/p-Si samples show rectification behavior. The rectification ratio of diodes was found to be dependent on both the applied voltage and the doping ratio of Mg. The MgZnO/p-Si heterojunction diodes exhibited a non-ideal behavior with the ideality factor greater than unity that could be ascribed to the interfacial layer, interface states and series resistance. The barrier height values of undoped and Mg doped ZnO/p-Si diodes were found to be in the range of 0.78–0.84 eV. It is evaluated that the electrical properties of ZnO/p-Si heterojunction diodes are controlled by Mg-dopant content. In addition, the obtained findings suggest that the optical bandgap of the ZnO thin film can be tuned by Mg-dopant levels.

**Keywords:** Sol-gel growth, ZnO thin film, diode, electrical properties.

## 1. GİRİŞ

Mikro elektronik ve opto-elektronik endüstrinin temelini oluşturan ince filmler, son zamanlarda en çok çalışılan malzemelerden biri olarak teknolojiye önemli bir yer tutmaktadır. Genelde bir altlık üzerine kaplanan ince filmler, altlığın tek başına sağlayamadığı birçok özelliklere sahip olduklarından elektronik ve opto-elektronik alanda ileri teknoloji malzemeleri olarak kullanılmaktadırlar. Ayrıca, çok katmanlı üretildiklerinde hacim özelliklerinden farklı bir şekilde, yeni malzemeler gibi davrandıklarından elektronik devre elemanları olarak kullanılabilirler. Metal-yarıiletken (MS) kontaklarda metal ile yarıiletken arasına doğal ya da yapay yolla oluşturulan ara yüzey tabakasının, MS kontakların elektriksel özelliklerini ve fiziksel parametrelerini değiştirdiğinin görülmesiyle metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılarla ilgili çalışmalar başlamıştır. Yarıiletkenle metali ayıran ince ara yüzey yalıtkan tabakanın oluşması halinde (MIS) Schottky engelli güneş pilinin açık devre voltajı ve verimliliğinde artış gözlenmiştir. Bu artış nedeniyle MIS Schottky diyotlarına olan ilgi artmıştır (Kar et al. 1982).

Metal-yarıiletken kontakların elektriksel iletkenlik özelliklerinden yeterince faydalanmak ve elektronik devrelere uyarlamak için karakteristiklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla, ilk araştırma Braun tarafından yapılmıştır (Rhoderick ve Williams 1988). 1950'li yıllarda p-n eklem yapımı için bir çok metod denenmiştir. Metal yarıiletken kontaklar ise oluşturulan bu p-n eklem yapılarında akım iletimi için omik kontak olarak düşünülmüştür (Batı 1998).

Metal oksit yarıiletken filmler optik ve elektriksel özelliklerinden dolayı son yıllarda oldukça dikkat çekmekte ve yaygın olarak çalışılmaktadır. Bunların arasında ZnO şu ana kadar yaygın olarak kullanılan kalay oksit ve indiyum kalay oksit'e alternatif bir malzeme olarak ortaya çıkmıştır. İndiyum kalay oksit, çinko oksit ve kadmiyum oksit gibi saydam iletken oksit (TCO) ince filmler, görünür bölgede yüksek geçirgenliğinden dolayı önemlidir. Bu filmler, gaz sensörlerinde, optoelektronik cihazlarda, saydam elektrotlarda

ve yarıiletken fotovoltik güneş pillerinde uygulama alanları bulmaktadır (Soylu and Savaş 2015). Genel olarak, saf ZnO n-tipi bir yarıiletken ve bant aralığı 3,3 eV olan hegzagonal wurtzite yapıdadır. ZnO düşük taşıyıcı konsantrasyonundan dolayı yüksek dirence sahiptir. Ancak, uygun element katkıları ile yüksek dirençli malzemeden iletken bir malzemeye dönüştürülebilir. Çeşitli nano-yapılara sahip ZnO'nun morfolojisi eşsiz özelliklerinden dolayı geniş ölçüde araştırılmıştır. UV ışığını engelleyebilen ZnO nano-parçacıkları yaygın olarak kozmetik, boya ve lif malzemesi olarak kullanılır, fakat oksidasyon ve fotokimyasal reaksiyonlarda yüksek katalitik aktiviteleri, onların UV engelleyici uygulamalarını kısıtlamaktadır. Yüksek kaliteli ZnO ince filmler; magnetron püskürtme, kimyasal buhar biriktirme, sol-jel tekniği, lazer ablasyonu, spray piroliz, moleküler ışın tabakalama gibi birçok teknik kullanılarak oluşturulabilmektedir (Soylu and Savaş 2015). Sol-Gel metodu diğer metotlarla kıyas edildiğinde maliyetinin ucuzluğu, basit bir kaplama metodu olması, geniş yüzeylere uygulanabilmesi ve katkı konsantrasyonunun kolay ayarlanabilmesi gibi avantajları sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Fujihara ve arkadaşlarının (2001) ve Ji ile arkadaşlarının (2004) yaptıkları çalışmalarda sol-jel metodu ile elde edilen ZnO ince filmlerin özellikleri ve mikro yapıları üzerine Mg katkısının etkileri araştırılmıştır. Mg ve daha farklı elementin de katkılandırılarak hazırlandığı ZnO ince filmler üzerine yapılmış başka çalışmalar bulunmaktadır. ZnO'in düşük maliyetli oluşuna Mosbah ve arkadaşları (2006) değinirken, zehirli olmayışına Yakuphanoglu ve arkadaşları (2007) değinmiştir. İncelenen çalışmalarda ZnO'in çok önemli avantajlara sahip bir yarıiletken olduğu görülmektedir.

Chaabouni ve arkadaşlarının (2004) yaptığı bir çalışmada, ZnO ince filmler cam ve p-tipi Si alttaşlar üzerine oda sıcaklığında RF magnetron saçtırma tekniği ile biriktirilmiştir. Biriktirme parametrelerinin yapısal özellik ve duyarlılık özelliklerine bağlılıkları incelenmiştir. Maksimum duyarlılığın küçük kristal boyutlarında elde edildiği ve gaz duyarlılık özelliğinin filmin mikro yapısıyla yakından ilişkili olduğu bulunmuştur. ZnO ince filmlerin oda sıcaklığında oksijen gaz sensörü uygulamaları için uygun bir materyal olduğu sonucuna varılmıştır. Polikristal katkısız çinko oksit ince filmlerin oda sıcaklığındaki ozon duyarlılık özelliğini inceleyen M. Bender ve arkadaşları (2002), ZnO ince filmleri DC saçtırma ve RF magnetron saçtırma tekniğiyle oluşturmuşlardır. Onlar ZnO ince filmlerinin oda sıcaklığındaki ozon duyarlılık özelliğini belirleyerek filmlerin

elektriksel özelliği üzerinde ozon atmosferinin oksidasyonu ve fotolitik etkisini araştırmışlardır. En iyi sonucun yüksek basınç altında RF saçırma tekniği ile biriktirilen filmlerden alındığı bulunmuştur. Bu filmlerin  $1,2 \times 10^8$  sensör cevabı sergilediği bulunmuştur.

Yapılan başka bir çalışmada, Al katkılı ZnO filmler püskürtme yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Farklı miktarlarda katkılanmış Al oranlarının (%1, %3, %5) ZnO filmlerinin yapısal, optik ve elektriksel özelliklerini incelenmiştir. X ışını kırınım desenleri ile elde edilen filmlerin hekzagonal ve polikristal yapıda olduğu belirlenmiştir. Yapılan sabitleri, tanecik boyutları ve örgü sabitleri hesaplanmıştır. Filmlerin yasak enerji aralıkları dalga boyunun bir fonksiyonu olarak optik soğurma (absorbsiyon) ölçümleri ile araştırılarak değerlerinin 3,2-3,3 eV arasında olduğu bulunmuştur. Filmlerin ortalama optik geçirgenliklerinin ise %80'nin üzerinde olduğu belirlenmiştir. Soğurma spektrumlarından yararlanılarak filmlere ait optik geçirgenlik, yansıma katsayısı, kırılma indisi, sönüm katsayısı ve dielektrik sabitleri gibi optik sabitleri hesaplanmıştır. Filmlerin elektrik özellikleri, Van der Pauw metodu kullanılarak araştırılarak öz direnç değerleri 0,26  $\Omega\text{cm}$ -1,13  $\Omega\text{cm}$  arasında bulunmuştur (Eren 2006).

Katkısız ve %2 Co katkılı ZnO ince filmlerinin CVD tekniği ile tek kristal safir (0001) taban üzerine üretildiği çalışmada üretilen ince filmlerden bazıları vakum altında (1,33Pa) 450 °C sıcaklıkta tavlama işlemine tabi tutulmuştur. Filmlerin sıcaklığa bağlı iletim mekanizmalarının incelenmesi sonucunda, tavlınmamış ZnO ince filmler için aktivasyon enerjisi 16,87 meV olarak hesaplanmıştır. Tavlınmış ve Co katkılı ZnO ince filmler için aktivasyon enerjileri ise sırasıyla 6,4 meV ve 9,2 meV olarak hesaplanmıştır. Tavlınmamış ZnO filmleri için taşıyıcı konsantrasyonu  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  olarak hesaplanırken tavlınmış filmler için  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  olarak hesaplanmıştır. Alınan SEM ve XRD ölçümleri sonucunda Co katkısının filmlerin yüzey morfolojisinde herhangi bir değişime neden olmadığı görülmüş ve Co'a ait yeni bir fazın oluşmadığı belirlenmiştir (Kumar and Khare 2007).

Liu ve arkadaşları (2005) cam üzerine Mg ve Li katkılı ZnO ince filmleri sol-jel döndürme yöntemi ile üreterek iki adımda büyütme üzerine çalıştılar. Sıcaklık ve katkılamanın c-ekseni ve direnç üzerindeki etkilerini incelediler. İki adımda oluşturulan ZnO ince filmlerin birinci oluşturulan tabakasının c-ekseni yöneliminden büyük oranda



etkilendiğini gördüler. Mg katkısının Li:ZnO filmlerinin direncini artırırken tanecik boyutunu düşürdüğünü ve c-ekseni yönelimine katkı sağladığını gözlemlediler. Mg'un Li:ZnO'e katkılı olduğu zaman, katı çözünmesinden kaynaklanan oluşumun Gibbs enerjisinde bir artışa neden olduğunu gözlemlediler. Bu durumun MgO'nun oluşum enerjisinin (569,30 kJ/mol) ZnO'in oluşum enerjisinden (320,50 kJ/mol) daha büyük olmasının neden olduğunu ileri sürdüler. Yüzey enerjisinde oluşan büyük farklılıkların büyük ölçüde kristal yönelimiyle ilgili olduğunu ifade ettiler. Yapılan bu çalışmada Mg katkısının ZnO'in c-ekseni yönelimine etki ettiğini, katkılı ZnO'in (001) düzlemi ile diğer düzlemler arasındaki spesifik yüzey enerjisinin farkının artmasına neden olduğunu söylediler. Mg katkılanması ile katı çözünme enerjisi artacağından çinko ara yer atomlarının ve oksijen boşluklarının oluşumuna olumsuz yönde bir etkisinin olacağını ifade ettiler. 3,3 eV yasak enerji aralığına sahip ZnO'in Mg katkısının ZnO'in yasak enerji aralığını artırdığı sonucuna vardılar. ZnO ince filmlerin en yüksek öz direnç değerini  $11,18 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$  olarak buldular.

Belghazi et al. (2007) tarafından yapılan çalışmada, kimyasal püskürtme tekniği ile cam altlıklar üzerine katkısız ve Co katkılı ZnO ince filmler 450 °C sıcaklıkta elde edilmiştir. Yapısal özellikleri incelenen ZnO filmlerin wurtzite yapıda oldukları ve ZnO haricinde başka bir faz içermediği tespit edilmiştir. Elde edilen bütün filmlerin görünür bölgede yüksek optik geçirgenliğe sahip olduğu belirlenmiş ve yasak enerji aralıkları her bir film için 3,25 eV olarak hesaplanmıştır. Ölçülen mıknatıslanma sonuçlarında ise düşük sıcaklıklarda tüm filmlerin paramanyetik özellik gösterdiği ve ferromanyetizmaya rastlanmadığı anlaşılmıştır.

Bir diğer çalışmada, bakır ve kalay katkılı ince filmlerin sol-jel yöntemi kullanılarak elde edildiği başka bir çalışmada çinko asetatla hazırlanmaya başlanan çözelti 2-propanal ve diethanolamin içerisinde homojen şekilde çözünmesi sağlanmıştır. Elde edilen çözeltiye farklı oranlarda bakır ve kalay ilave edilmiştir. Cam altlıklar üzerine spin (döndürmeli) kaplama cihazı yardımı ile kaplama yapılmış, kaplama işlemi 10 kat olmak üzere her bir kaplamadan sonra 250 C<sup>0</sup> de 5 dk kurutma uygulanmıştır. Cu katkılı (%0,4) ince filmler 450–550 C<sup>0</sup> olmak üzere diğer bütün filmleri ise 550 C<sup>0</sup>'de 1 saat ısıtılma tabii tutmuştur. Sonuç olarak elde edilen filmlerin XRD incelemelerinde numunelerin çoklu kristal yapıda olduğunu ve yalnızca ZnO yapısına ait kristalleşme olduğunu ortaya

koymuştur. Bütün numunelerin (002) düzlemlerinden elde edilen kırınım piklerinde diğer piklere göre göreceli olarak yükselme gözlenmiştir. SEM analizleri sonucunda bütün filmlerde tane boyutunun 50 nm'nin altında olduğunu, yüzey pürüzlülüğü ve tane boyutunun katkı ve ısı ile arttığını saptanmıştır. Elde edilen filmlerin optik geçirgenliği incelendiğinde UV bölgede düşük, görünür bölgede yüksek geçirgenlik sağladığı ve filmlerin enerji bant aralığının 3,18-3,23 eV değiştiği saptanmıştır (Polat 2009).

Sol-jel spin coating tekniği ile büyütülen farklı mol oranlarında (%0,2, %0,4, %0,6, %0,8, %1, %3, %5 ve %7) Ni katkılı ZnO ince filmlerin fotoluminesans (PL) ve optik özelliklerinin araştırıldığı bir çalışmada, başlangıç malzemesi olarak çinko-asetat ve nikel-asetat kullanılmış ve örnekler methoxethanol ve monoethanolamine ile çözülmüştür. Numuneler spin-coating cihazı içinde 2000 rpm'de 30 saniye boyunca döndürülmüştür. 2000 °C'de 10 dakika ön pişirmeye tabi tutulan numuneler büyütme sonunda 4000 °C'de 1 saat boyunca tavlama işlemine tabi tutulmuştur. AFM tekniği kullanılarak yüzey morfolojisi incelenmiştir. Filmin neredeyse homojen olarak büyüdüğü tespit edilmiştir. Yapıda Ni<sup>+2</sup> iyonunun Zn<sup>+2</sup> iyonu yerine geçmesinin çok kuvvetli bir ihtimal olduğu belirtilmiştir (Farag et al. 2011).

Durukan (2013), saçtırma tekniği ile Si, cam ve kuartz alttaş üzerine büyütülen AZO (Al katkılı çinko oksit) ince filmlerin yapısal ve optik özellikleri araştırdı. Si alttaş üzerine büyütülen AZO ince filmlerin yapısı, luminesans özelliklerini, yüzey morfolojisini ayrıntılı bir şekilde inceledi. Biriktirilen AZO filmlerinin direnç değerlerinin oldukça yüksek olduğu görülünce sadece biyosensör uygulamalarında kullanılmak amacıyla cam alttaş üzerine AZO ince filmler büyütülmüştür. Farklı RF tekniği ile büyütülen AZO filmlerinin yapısal ve optiksel analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen biyosensörün temelinde reaksiyon ürünü olarak hidrojen peroksit açığa çıktığı için hidrojen peroksit (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) karşı duyarlılık belirlenmiştir. Cam üzerine biriktirilen yapının yüksek sıcaklık dayanımı iyi olmadığı için ve alt kısmının daha iyi kaplanması amacıyla alttaş olarak kuartz kullanılarak ZnO/Au yapısı yeniden oluşturulmuştur. Ayrıca kaplamadaki kopmaları önlemek amacıyla Au ara-tabakasının kaplama sıcaklığı 200 °C'den 500 °C'ye yükseltilmiştir. Hidrojen peroksit, glukoz ve kolesterole karşı olabilecek duyarlılık belirlenmiştir. Oluşturulan filmin yapısal ve optik özellikleri XRD, PL ve AFM ile analiz

edilmiştir. Hazırlanan bu elektrotun  $H_2O_2$ 'ye duyarlı olduğu bulunmuştur. Glukoz ve Kolesterole karşı ayrı ayrı duyarlılık deneyleri yapılmıştır. Artan glukoz ve kolesterol derişimlerine bağılı olarak akımlarda da paralel bir artış gözlenmiştir. Glukoz ve kolesterol çözeltilerinin ilavesiyle akımların artması glukozun ve kolesterolün enzimatik reaksiyon sonucu ürünlerinin elektrokimyasal olarak belirlenebileceğı bulunmuştur.

P-tipi iletkenliğe sahip Si, Ge ve GaAs üzerine doğal n-tipi olan ZnO filmleri kaplayarak birer pn-eklemlili yapı oluşturulmuş ve bu yapıların ışığa duyarlılıklarının incelenmesini amaçlamıştır. Önce Si, Ge ve GaAs altaşlarının arka yüzeyine %99,99 saflıkta olan Au, oda sıcaklığında 1500 Å kalınlığında kaplanmıştır. Sonra hızlı termal tavlama sisteminde (RTA- Rapid Thermal Annealing ) 375 °C'de bir dakika süresince tavlandıktan sonra arka yüzeyin omik özellik göstermesi sağlanmıştır. Arka yüzeyi omik olan Si, Ge ve GaAs altaşların ön yüzeyine ZnO; 1000, 2000 ve 3000 Å kalınlıklarında 200 °C'de RF magnetron püskürtme yöntemiyle oluşturulmuştur. Oluşan filmlerin yapısal, optik ve elektriksel özellikleri araştırılmıştır. Yapısal özellikleri yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HRXRD) tekniğı kullanılarak incelenmiştir. Optik özellikler üzerinde farklı altaşlara sahip ZnO yapısının kalınlığa göre etkisi incelenmiştir. AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu) ile örnek numunelerin yüzey morfolojisi incelenerek ve oda sıcaklığında fotoluminesans (FL) ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra yapıların elektriksel özelliklerinin incelenmesi amacıyla; ön yüzeye önce oda sıcaklığında 300 Å kalınlığında ve % 99,99 saflıkta Ti, sonra üzerine oda sıcaklığında 1000 Å kalınlığında ve % 99,99 saflıkta Au kaplanmıştır. Kaplanan numuneler RTA sisteminde 330 °C'de bir dakika tavlansak ön yüzeyinde omik kontak oluşması sağlanmıştır. Kontaklar yapıldıktan sonra akım-gerilim (*I-V*) ölçümleri yapılarak ZnO malzemelerindeki kalınlığın elektriksel özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir (Kurtuluş 2014).

Yapılan başka bir çalışmada katkısız ZnO ve farklı oranlarda Fe (%2, %4, %6, %8 ve %10) katkılanarak ince film elde edilmiştir. İnce filmler spin coating metodunu kullanılarak hazırlanmıştır. Fe katkısının ZnO ince filmlerin yapısal, yüzeyel ve optik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. X-ışını difraksiyon deseni sonuçlarından filmlerin hekzagonal yapıda c-ekseni yönelimine sahip olduğu ve artan Fe katkısı ile kristal kalitesinin azaldığı görülmüştür. AFM ölçüm sonuçları ZnO ince filmlerin yüzey morfolojisi ve yüzey pürüzlülüğü hakkında bilgi verilmiştir. Filmlerin yüzeyi homojen ve

tekdüze bir dağılıma sahiptir. Artan demir katkısı ile tanecik büyüklüğü azalma eğilimindedir. Yasak enerji aralığı değerleri, 10-320 K aralığında 10 K adımlarla sıcaklığın bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan yasak enerji aralığı değerleri katkısız ve %6 Fe katkılı ZnO ince filmler için sırasıyla 3,26 eV ve 3,20 eV olarak belirlenmiştir. UV-VIS soğurma ölçümleri ile artan Fe katkısına bağlı olarak yasak enerji aralığının azaldığını belirlemiştir (Kasapoğlu 2014).

Hazırlanan bu tez 4 bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde; Mikro elektronik ve opto-elektronik endüstrinin temelini oluşturan ince film teknolojisinin önemi, gerekliliği, metal-yarıiletken kontakların tanımı, çalışmada üretilen numunelere uygulanan sol-jel tekniklerinin gerekliliği vurgulanarak, yapılan çalışmanın gerekçesi hakkında bilgiler verilmiştir. Giriş bölümünü takiben 2. bölümde; kuramsal temellerde metal-yarıiletken kontaklar hakkında bilgi verildikten sonra bu tezde kullanılan ZnO'nin optiksel ve elektriksel özelliklerine yer verilmiştir. Ayrıca ince film teknolojisinde bir çok metot varken neden sol-jel tekniğini tercih ettiğimizin izahı yapılmıştır. Bölüm 3'te yapılan deneysel çalışmalar ve izlenen deneysel metotlar açıklanmıştır. Bölüm 4, bu çalışmanın en can alıcı kısmını oluşturmakta olup, bu bölümde; sol-jel tekniği ile üretilen katkısız ZnO ve Mg katkılılandırılan ZnO'e ait optiksel ve elektriksel sonuçlara yer verilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar ve AFM görüntüleri literatür ile karşılaştırılarak açıklanmıştır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Yarıiletkenlerin Optiksel Özellikleri

Yarıiletkenlerin optiksel özelliklerinden dolayı bir yarıiletkenin üzerine foton gönderildiğinde; atomların elektronları ile fotonların etkileşimi sonucu soğurma, geçirgenlik, yansıma ve kırılma gibi bazı optik olaylar meydana gelir (Askeland 1998). Malzeme üzerine düşürülen elektromanyetik dalgaların malzemenin içerisindeki elektriksel yüklerle etkileşmesi sonucunda ortaya çıkan enerji kaybına soğurma denir (Omar 1993). Bu kaybolan enerji materyalin atomları tarafından kullanılır. Elektromanyetik dalga ile etkileşen bir materyal için soğurma;

$$I = I_0 e^{-\alpha t} \quad (2.1)$$

ile verilir. Burada,

$I$ ;  $t$  kalınlığındaki materyalden geçen elektromagnetik dalganın şiddeti,  
 $I_0$ ; malzeme üzerine gönderilen elektromagnetik dalganın şiddeti,

$\alpha$  ; soğurma katsayısıdır.

$$B = \log_{10} B \quad (2.2)$$

$$\alpha = 2.303 A/t \quad (2.3)$$

$B$  soğurma olup, elektromagnetik dalganın dalga boyu, malzemenin yoğunluğu ve malzemenin yasak enerji aralığı, soğurma katsayısı  $\alpha$  'nın bağlı olduğu değişkenlerdir (Nadeem and Ahmed 2000). Bir numuneden yayımlanan karakteristik ısının dalga boyu bu materyale has bir özellikken, soğurma sınırının dalga boyu da soğurucu numunenin bir karakteristiğidir. Yarıiletkenlerin bant yapılarının araştırılmasında birçok yöntem vardır Optik soğurma yöntemi, sıkça kullanılan yöntemlerden biridir. Bir yarıiletkenin bant tipi ve yasak enerji aralığı ( $E_g$ ) bu yöntem kullanılarak elde edilebilir (Cullity 1996).

Değerlik ve iletim bantları arasındaki geçişler soğurma kenarına yol açar. Direkt geçişler için yasak enerji aralığının altında soğurma olayı beklenmez (Natsume and Sakata 2000). Yarıiletken malzeme üzerine gelen bir fotonun enerjisi yarıiletkenin yasak enerji aralığına eşit olur veya ondan daha büyük olursa, yarıiletkenin değerlik bandındaki bir elektron bu fotonu soğurur. Değerlik bandından iletim bandına geçen elektron arkasında bir delik (boşluk) bırakarak elektron-delik çifti oluşturulmuş olur. Enerjisi  $h\nu$  olan bir fotonun temel soğrulması dikkate alınca aşağıdaki ifadeler geçerlidir.

$$h\nu \geq E_g \quad (2.4)$$

$$E_g = \frac{hc}{\lambda_g} \quad (2.5)$$

Burada  $\lambda_g$  yarıiletkenin yasak enerji aralığının enerji değerindeki fotonun dalga boyunu ve  $c$  ise boşlukta ışık hızını ifade etmektedir. Bu dalga boyu değerinden daha küçük değerdeki dalga boylu fotonlar yarıiletken tarafından soğrulurken, daha büyük değerdeki dalga boylu fotonlar soğrulmadan geçerler (Bedeaux and Vlieger 2001). Temel soğurma spektrumunun ölçülmesiyle yarıiletkenlerin yasak enerji aralığı hesaplanır.  $E_g$  değerleri bir  $(\alpha h\nu)^2$  nin  $h\nu$  ye karşı grafiğinden elde edilir. Çizilen grafiğin lineer kısmının doğrultusunun  $h\nu$  eksenini  $(\alpha h\nu)^2=0$ 'da kestiği nokta bulunur. Bu noktanın enerji değeri yarıiletkenin yasak enerji aralığını vermektedir (Nadeem and Ahmed 2000; Subramanyam 1998).

Optik iletim ve yansımaya spektrumu yanında sönüm katsayısı ( $k$ ), soğurma katsayısı ( $\alpha$ ) ve kırılma indisi ( $n$ ) analiz edilir. Soğurma katsayısının analizi, optiksel bant aralığını ve geçişlerin yapısını anlayabilmek için ayrıca gerçekleştirilir. Deneysel çalışmalar ile yansımaya ( $R$ ) ve iletim ( $T$ ) spektrum eğrileri ince filmlerde görülür. İfade edilen bu spektrumdan soğurma katsayısının değeri hesaplanabilir.

$$T = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{1-R^2 e^{-2\alpha d}} \quad (2.6)$$

Burada  $T$ ; iletim,  $R$ ; yansımaya,  $d$ ; ince filmin kalınlığı ve  $\alpha$ ; soğurma katsayısıdır. Amorf malzemelerde banttan dolayı soğurma bant geçişlerindeki optik bant aralığını belirleyen

$E_g$  (Geçiş enerjisi) ile tanımlanan ilişki aşağıdaki gibidir.

$$(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^m \quad (2.7)$$

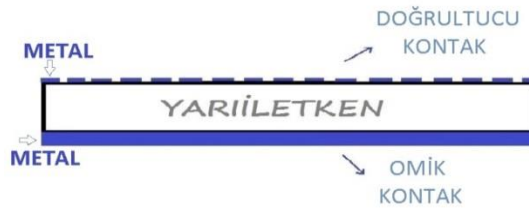
Burada  $A$  bağımsız sabit bir enerji,  $h\nu$  foton enerjisi,  $E_g$  ise optik bant aralığıdır. Buradaki üstel 'm' değeri geçişlerin niteliğine bağlıdır. İzinli doğrudan, izinli dolaylı, yasaklı doğrudan ve yasaklı dolaylı geçişler için sırasıyla  $m=1/2$ , 2, 3/2 ve 3 değerlerini alır. Kırılma indisinin değeri optik performansı belirlemede önemli bir parametredir ve aşağıdaki bağıntı ile verilir.

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (2.8)$$

Bu bağıntı ile yansımaya ( $R$ ) ve sönüm katsayısı ( $k$ ) değerleri ile kırılma indisi hesaplanabilir (Cansever 2011).

## 2.2. Metal Yarıiletken Kontak

Metal yarıiletken kontaklar çağdaş elektronikte önemli bir yere sahiptir. Bunlar elektronik sanayide mikrodalga karıştırıcı dedektörler, varaktörler (kondansatörlerin kapasitelerinin uygulanan gerilimle değişmesi), hızlı anahtar (switching) uygulamaları ve Schottky engel tabakalı alan etkili transistörleri olarak faydalanılmaktadır. Schottky engeller metal-yarıiletken kontakların enerji-bant yapıları yardımıyla incelenebilir. Ayrıca taşıyıcıların hareketlilik ve erişme uzaklıklarının ölçülmesi gibi birçok fiziksel özellik de belirlenebilir. Son yıllarda metal yarıiletken kontaklardaki engel oluşumunun ve akım akışının daha iyi anlaşılması üzerine araştırmalar artarak devam etmiştir. Bu alandaki çalışmalar yarıiletken elektroniğinde büyük önem kazanmıştır (Temirci 2000).



Şekil 2.1. Metal-yarıiletken kontakın şematik yapısı

Omik kontak; metal ve yarıiletkenin en az dirençle temas ettirilmesiyle oluşur. Elde edilen kontakın ideal olması için, kontak malzemelerinin yüzeylerinin olabildiğince temiz ve pürüzsüz olması gerekir. Metal yarıiletken kontak sağlandığında, metal ile yarıiletken arasında yük alışverişi termal dengeye ulaşıncaya kadar devam eder. Termal denge ise metal ile yarıiletkenin Fermi enerji düzeylerinin eşit olması ile sağlanır. Fermi enerji düzeylerinin eşitlenmesiyle metal-yarıiletken ara yüzeyinde yükler ayrılır. Yüklerin yeni dağılımıyla potansiyel engeli oluşur. Arayüzey bölgesi, hareketli yükleri barındırmayan, kontakın yarıiletken kısmında oluşan ve yüksek dirençli bir bölgedir (Güzel 2006).

Metal-yarıiletken ara yüzeyinde oluşan potansiyel engelin varlığını ilk kez Schottky açıklamıştır. Bu nedenle metal-yarıiletken kontaklar Schottky diyotlar veya Schottky kontaklar olarak bilinmektedir. Schottky'e göre; yarıiletkende oluşan elektrik alan Gauss kanununa uygun olarak tükenim bölgesinden olan uzaklıkla artarken potansiyel ise azalır. Mott ise potansiyel engel ile ilgili başka bir model oluşturmuştur. Mott yarıiletkenin metal ile kontak edildiğinde vericilerden yoksun ince bir tabakanın varlığını kabul etmiştir. Bu tabakada elektrik alanın değişmediğini fakat potansiyelin lineer olarak değiştiğini açıklamıştır. Mott'a göre metalin iş fonksiyonu ile yarıiletkenin elektron ilgisi arasındaki fark potansiyel engelin değişmesine neden olmaktadır (Cowley and Sze 1965).

Katıhal elektronikinde kullanılan en eski ve en sade devre elemanları Schottky diyotlardır. Metal ve yarıiletken malzemelerin kontak haline getirilmesi ile oluşturulan yapıda bir eklem bölgesi meydana gelir. Yarıiletken yüzeyine yakın bölgede oluşan enerji engeli, boşluk ve elektronların kolayca geçemeyeceği bir bölgedir. Bu bölgede oluşan engelin uygulanan gerilimle artması veya azalması ile akım taşıyıcılarının bir yönden diğerine geçişi kontrol edilebilir (Azoroff and Brophy 1963).

Metal-yarıiletken kontakların yapılarını belirleyen birçok etmen olmasına karşın, metal-yarıiletkenin ara yüzeyinde oluşan potansiyel engelin yapısı en önemlisidir. Ara yüzeyde oluşan bu potansiyel engeli çeşitli modelleri içerir (Brillson 1982). Schottky ve Mott elektronların, izlenen doğrultma yönünde, potansiyel engeli üzerinden sürüklenme ve difüzyon yoluyla geçtiğini belirtmiştir. Mott'a göre metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farktan dolayı bu potansiyel engeli oluşmaktadır. Mott, ara yüzeyde safsızlık (kirlilik) atomlarının olmadığını ve bundan dolayı elektrik alanının değişmediğini, elektrostatik potansiyelin metale kadar uzaklığa bağlı olarak lineer olarak değiştiğini



kabul etmiştir. Schottky ise engel bölgesinin safsızlık atomlarını sabit yoğunlukta içerdiğini, elektrik alanın lineer olarak arttığını ve metale kadar elektrostatik potansiyelin Poisson denklemi ile uyumlu olduğunu ve kuadratik olarak değiştiğini ifade etmiştir (Rhodecik and Williams1988).

Metal-yarıiletken kontaklar birçok çalışmaya konu olmuştur. Schottky diyotlarda metal ve yarıiletken arasındaki ara yüzeyde oluşan yalıtkan tabaka üzerine ilk çalışma Cowley ve Sze tarafından yapılmıştır. Cowley ve Sze farklı metaller ile Schottky engel yüksekliğini incelemişlerdir (Werner and Güttler1991).

Metal yarıiletken kontaklarda engelin omik ya da doğrultucu olması metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına ve metalin türüne bağlıdır. Metalin iş fonksiyonu ( $\Phi_m$ ), elektronu Fermi seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan enerjidir. Fermi seviyesi katkı miktarına bağlı değişken bir niceliktir. Fermi enerji seviyesi ( $E_f$ ) izafi bir seviye olup dolmuş yörüngelerin dolmamış yörüngelerden ayrılmasını sağlayan bir seviyedir.  $f(E)$  Fermi dağılım fonksiyonuna ait bir sabittir. Sabitin  $f(E)$  ile ilişkisi;

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left[-\frac{(E_f - E)}{kT}\right]} \quad (2.9)$$

şeklinde dir.

$\chi_s$  elektron ilgisi; bir elektronun iletkenlik bandının en üst seviyesinden ( $E_c$ ) vakum seviyesine çıkarabilmek için gerekli olan enerji miktarı kadardır. Metalin tam dışındaki sıfır kinetik enerjili elektronun enerji seviyesine vakum seviyesi denir (Bozkurt 2009).

### 2.2.1. Metal/n-Tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontak

Metal-yarıiletken doğrultucu kontaklarda ya da Schottky diyotlarda temel özellik kontak direncinin dışardan uygulanan gerilime bağlı olmasıdır. Bu gerilime olan bağlılık o kadar güçlüdür ki metal yarıiletken kontak tek yönlü iletken haline getirir. Böylece kontakta akım bir yönde geçerken, ters yönden ise zayıf geçer (Bozkurt 2009). Metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda, metalin iş fonksiyonu ( $\Phi_m$ ) yarıiletkenin iş fonksiyonundan ( $\Phi_s$ ) büyük ise ( $\Phi_m > \Phi_s$ ) oluşan kantağa doğrultucu kontak veya Schottky kontak denir.



Potansiyel engelinin yarıiletken kısmında oluşan yüksekliği:

$$eV_d = \Phi_m - \Phi_s \quad (2.10)$$

metal tarafında ise;

$$e\Phi_b = \Phi_m - \chi_s \quad (2.1)$$

eşitlikleri ile ifade edilir. Burada  $e$  elektronun yükü,  $V_d$  difüzyon potansiyeli,  $\Phi_m$  metalin iş fonksiyonu,  $\Phi_s$  yarıiletkenin iş fonksiyonudur.  $\Phi_b$  diyodun engel yüksekliği ve  $\chi_s$  yarıiletkenin elektron ilgisidir. Yarıiletkenin elektron ilgisi vakum seviyesiyle iletkenlik bandı arasındaki enerji farkına denir (Ziel 1968). Difüzyon potansiyeli yarıiletkenin iç potansiyelidir. Bu potansiyel metalin yüzeyine göre ölçülür. Metal tarafında dik olarak yükselen potansiyel engeline karşılık yarıiletken tarafında  $d$  genişliğine sahiptir (Şekil 2.2b). Uzay yükü bölgesi; yarıiletken tarafındaki  $d$  kalınlığındaki ve elektronlardan arınmış bölgedir. Bu bölgeye arınma bölgesi veya Schottky bölgesi de denir. Arınma bölgesi elektronlardan arınınca geriye sabit pozitif yüklü donör atomları kalır. Bu donör atomlarına da “uzay yükü” denir. Bu bölgenin metal tarafında negatif yüzey yükleri, yarıiletken tarafında ise pozitif uzay yükleri olduğundan dolayı bir kondansatör gibi davranır ve bu bölgenin bir kapasitesi vardır. Bu kapasiteye Schottky kapasitesi veya arınma bölgesi kapasitesi denir. Bu Schottky kapasitesi,  $d$  kalınlığı (arınma tabakasının kalınlığı) ile ters orantılı ancak, iyonize olan donörlerin konsantrasyonuna ve difüzyon potansiyeli ( $V_d$ ) değeriyle doğru orantılı olacaktır (Rhoderick ve Williams 1988).

Elektronlar termal uyarılma ile potansiyel engelini aşabilecek enerjiye ulaştığında metalden yarıiletken kısmına, yarıiletkenden metal kısmına eşit ve zıt  $I_0$  sızıntı akımı oluşur. Yarıiletken tarafına uygulanan ( $-V$ ) gerilimi ile (Şekil 2.2c) metalden yarıiletken tarafına elektronlar geçer. Bu elektronlar için engel yüksekliği ve akım değişiklik göstermez. Bununla birlikte yarıiletkenden metal tarafına geçen elektronlarla iletkenlik bandı  $eV$  kadar yükselecek ve engel yüksekliği  $eV$  kadar azalacaktır. Metal-yarıiletken kontakına uygulanan ters yöndeki gerilim potansiyel engelini elektronlar için yükseltir ve arınma bölgesinin kalınlığını artırır. Buna bağlı olarak metalden yarıiletkene akan akım  $\exp\left(\frac{eV}{kT}\right)$  miktarında değişir. Oluşan net akım:

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.12)$$

olur. Bu durumda akım pozitifdir.  $I_0$  doyma akımı:

$$I_0 = AR^* T^2 e^{-\frac{\phi_b}{kT}} \quad (2.13)$$

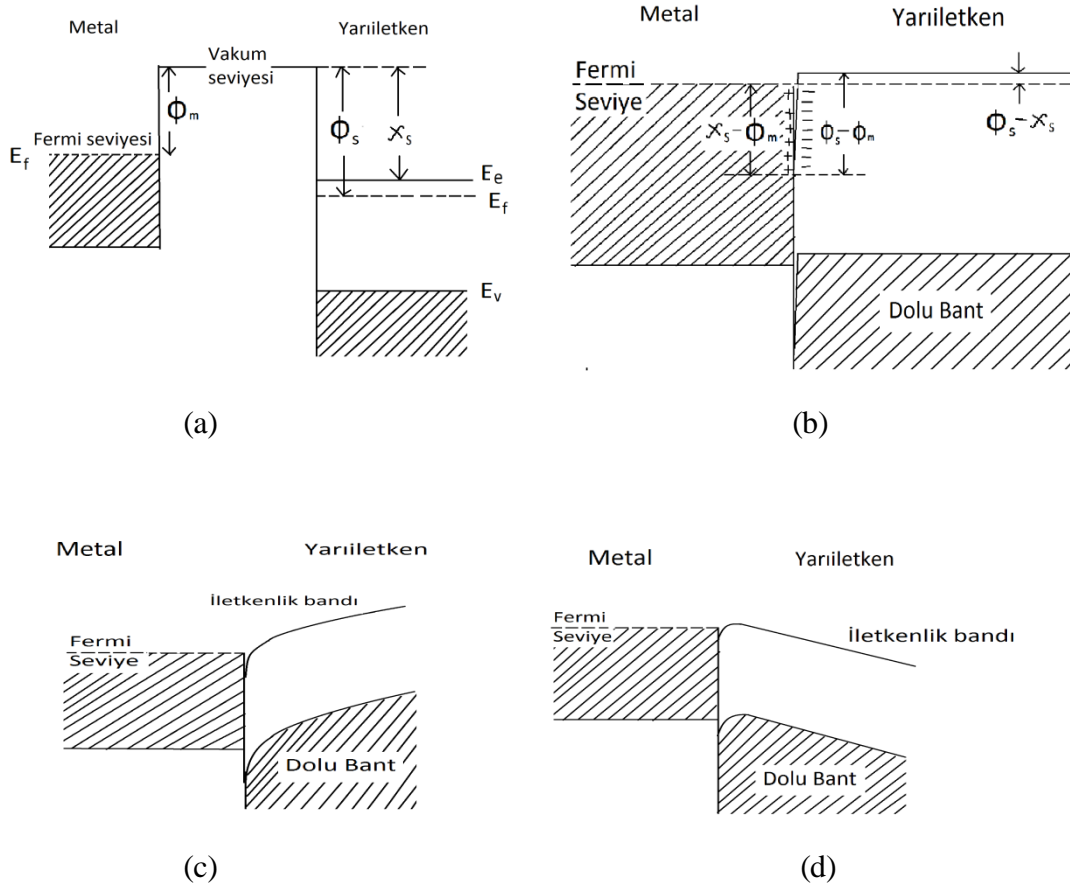
olarak verilir.  $A$  kontak alanıdır.  $R^*$  Richardson sabitidir.  $T$  mutlak sıcaklıktır. Mutlak sıcaklığın birimi kelvindir.  $k$  boltzman sabitidir.  $\phi_b$  engel yüksekliği ve  $e$  elektron yüküdür. Birimi eV'dur.

Eğer  $+V$  gerilimi yarıiletken tarafına uygulanırsa ters beslem durumu oluşur. Şekil 2.2d'de yarıiletken tarafındaki engel yüksekliği eV kadar artarken iletkenlik bandı eV kadar alçalır ve net akım oluşur. Bu akım  $-I_0$  değerine yaklaşır. Buradan yarıiletken kısmındaki potansiyel engel yüksekliğinin uygulanan voltaja bağlı olduğu sonucuna varılır. Fakat metal kısmındaki engel yüksekliği voltajdan bağımsızdır (Bozkurt 2009).

### 2.2.2. Metal/n-Tipi Yarıiletken Omik Kontak

Metal yarıiletken kontaklarda akım taşıyıcıların iki yönde de kolayca geçebildiği kontaklara omik kontak denir. Metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçük ise ( $\Phi_m < \Phi_s$ ) oluşan kontak omik kontakır. Kontakın önceki durumda yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden ( $\Phi_m - \Phi_s$ ) kadar aşağıdadır. Metal ve yarıiletkenin kontak edilmeden önceki enerji-band diyagramı Şekil 2.3a'da verilmiştir.

Metal ve yarıiletken kontak haline getirildikten sonra elektronlar metalin içinden yarıiletkenin içine doğru akarlar. Bunun sonucunda termal denge kurulduğunda metal tarafında pozitif yüzey yükleri oluşur. Yarıiletken tarafındaki negatif yüzey yükleri bir dipol tabakası oluşturur. Metalden yarıiletkeneye yarıiletkenenden ise metale yük akışı kolayca olur. Enerji band diyagramı Şekil 2.3b'deki gibidir. Omik kontakta bir  $V$  voltajı uygulandığı durumda ise potansiyel yarıiletken gövde boyunca dağılacaktır. Böyle omik kontakta eğer metale negatif bir ( $-V$ ) voltaj uygulanırsa metalden yarıiletkenin iletkenlik bandına elektro geçişi olur. Bu nedenle bu kontaklara enjeksiyon kontakları da denir. Omik kontak elde edilirken yüzey hallerinden dolayı bazı güçlüklerle karşılaşılır.



Şekil 2.3. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontak enerji-bant diyagramları (Bozkurt 2009)

- a) kontak edilemeden önce  
 b) kontak edildikten sonra (termal dengede)  
 c)  $V < 0$  olması halinde  
 d)  $V > 0$  olması halinde

Kontak yaparken yarıiletkenin yüzeyine buharlaştırılan metal ile yarıiletkenin alaşım haline getirilmesi için belli bir sıcaklıkta tavlama işleminin yapılması gerekir. Böylece yarıiletkenin yüzey kısmında elektron bakımından zengin ( $n^+$ ) bir tabaka oluşur (Batu 1998).

### 2.2.3. Metal/p-Tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar

Yarıiletkenin iş fonksiyonu metalin iş fonksiyonundan büyük ise ( $\Phi_m < \Phi_s$ ) doğrultucu kontak oluşur. Kontak oluşturulmadan önce yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden  $\Phi_m - \Phi_s$  kadar aşağıdadır. Kontak edildikten sonra Fermi seviyeleri aynı seviyeye gelene kadar metal tarafından yarıiletken tarafına doğru elektron akışı meydana gelir. Buna bağlı olarak yarıiletkenin yüzey tabakası negatif olarak yüklenmiş olur.



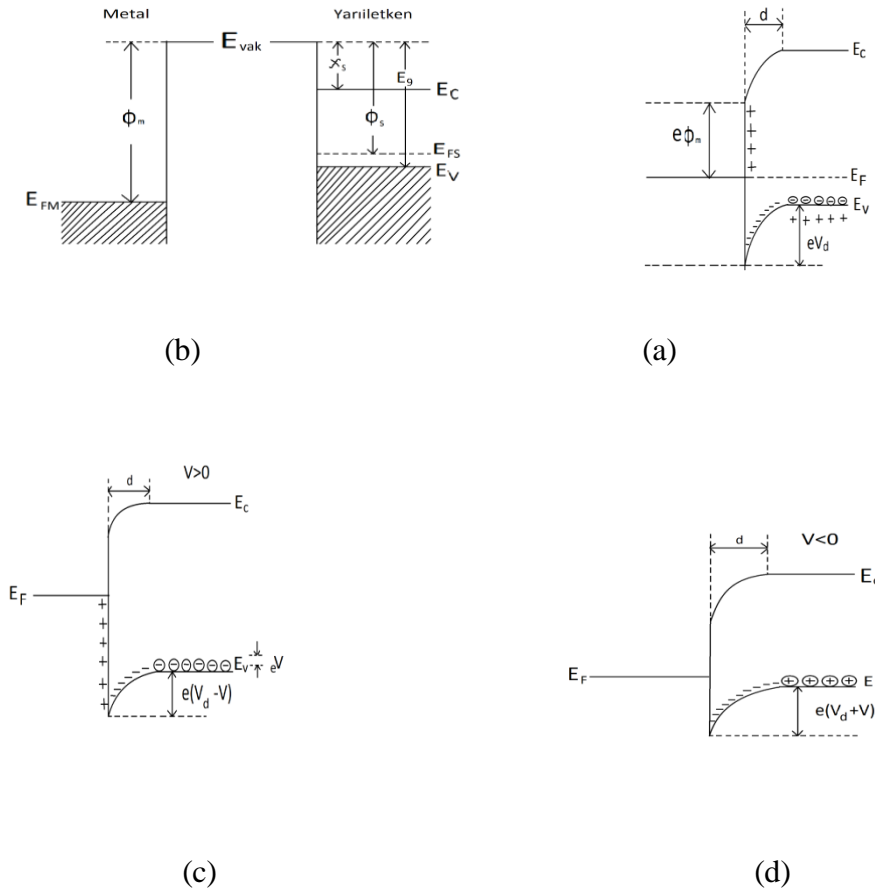
yariletken tarafında oluşan engel yüksekliğinden farklı olarak;

$$e\Phi_b = E_s - \Phi_m \quad (2.16)$$

şeklinde verilir. Burada  $E_s$ ; valans bandın tepe noktası ile vakum seviyesinin tabanı arasındaki farktır. Eğer termal uyarılma oluşursa bundan ötürü, yariletken tarafındaki hollerin bir kısmı potansiyel engelini aşacak enerjiyi kazanıp metalin içine geçecektir. Aynı durum metal için de geçerlidir. Termal olarak oluşacak bazı holler de engeli aşabilecek enerji kazanırsa, yariletkenin içine geçebilir. Eğer yariletkene bir  $V$  gerilimi uygulanırsa (Şekil 2.4b), sol kısımdan sağ kısma akan hol akımı değişmeyecektir. Fakat sağ kısımdan sol kısma akacak hol akımı ise bu akım ile  $\exp\left(\frac{eV}{kT}\right)$  çarpanı kadar değişecektir. Bundan ötürü yariletkendeki enerji seviyelerinin hepsi  $eV$  kadar düşecektir. Bundan dolayı sağ taraftan sol tarafa geçen holler için engel yüksekliği  $eV$  kadar azalacaktır. Sonuçta sağdan sola akım doğrultusu (yariletkenden metale geçen hollerin oluşturacağı akım) pozitif olarak kabul edilirse, karakteristik akım denklem (2.12) ile verilir. Bu durumda oluşan kontak doğrultucu kontak (Bozkurt 2009).

#### 2.2.4. Metal/p-tipi Yariletken Omik Kontak

Meta/p-tip yariletken kontakta  $\Phi_m > \Phi_s$  durumunu incelersek; yariletkenin Fermi seviyesinin metalin Fermi seviyesinden  $\Phi_m - \Phi_s$  kadar yukarıda olduğu görülür. Kontak yapıldıktan sonra yük mübadelesi gerçekleşecektir. Yariletken tarafındaki elektron geride bir pozitif yüzey yükü bırakarak, metal tarafında negatif yüzey yükünü meydana getirerek metal tarafına akacaktır. Sonuçta yariletkendeki Fermi seviyesi Şekil 2.4b'deki gibi  $\Phi_m - \Phi_s$  kadar aşağı inecektir. Bu durumda boşluk (hole) konsantrasyonu artacaktır. Buna bağlı olarak yariletken yüzeyinin daha çok p-tipi olduğu görülür. Elektronlar metal tarafından yariletken tarafındaki kolayca geçebilir. Bu şekildeki yük hareketi hollerin yariletkenden metale akışına karşılık gelecektir. Metalin olduğu tarafa geçen holler anında nötralize olurlar. Ters beslem durumunda ise metalin olduğu tarafa termal olarak oluşan holler de kolay bir şekilde yariletken tarafına geçebileceklerdir. Bu şekilde her iki taraftan da akımı kolayca geçirebilen kontak, yani omik kontak elde edilecektir (Temirci 2000).



Şekil 2.5. Metal/ p-tipi yarıiletken omik kontak enerji-bant diyagramları (Bozkurt 2009)

a) kontakstan önce

c)  $V > 0$  durumunda,

b) kontakstan sonraki durum

d)  $V < 0$  durumunda.

Denklem 2.12'deki voltaj ( $V$ ) Schottky diyotlara uygulanan gerilimdir. Bu uygulanan gerilimin bir kısmı deplasyon bölgesine bir kısmı da arayüzey tabakasına düşebileceğinden diyot ideallikten uzaklaşır. Denklem 2.12'ye idealite faktörünü eklememiz gerekmektedir.

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.17)$$

akım gerilim ifadesindeki  $I_0$ ;

$$I_0 = AR * T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{nkT}\right) \quad (2.18)$$



şeklinde verilir. İdealite faktörü, 'n' ile ifade edilmiştir. İdealite faktörü yalnız bırakılırsa;

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (2.19)$$

sonuç ifadesi elde edilir.

Metal-yarıiletken (MS) ve metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapıların temel fiziksel özellikleri ve iletim mekanizmaların geniş şekilde verildiği çalışmalara ilave olarak yüksek seri dirence sahip Schottky diyotlarda; idealite faktörü, seri direnç ve engel yüksekliği elde edilirken yeni yöntemler geliştirilmiştir. Norde 'a göre ideal durum (n=1) için seri direnç ve engel yüksekliği belirlenen bir F(V) fonksiyonu yardımı ile elde edilebilir. Bu amaçla yeni bir yöntem geliştirilmiştir (Covaand Singh 1990; Norde 1979). Seri direnç ve engel yüksekliğine sıcaklığın etki etmediği durumlara uygulanan bu yöntem için sadece bir sıcaklıktaki akım-voltaj (I-V) eğrisine gerek vardır. Bohlin ise Schottky diyodunun I-V ölçümü ile  $1 < n < \gamma$  ( $\gamma$  herhangi bir tam sayı olmak üzere) için  $R_s$  ve  $\Phi_b$ 'nin belirlenebileceği Norde fonksiyonun daha farklı bir şeklini öne sürdü (Bohlin 1986).

Diyot parametreleri termiyonik emisyon teorisine göre bulunabilir. Bazı durumlarda kullanılan taban malzemesi diyotta büyük bir R direnci oluşturabilir. Bu durumda eğimi alınan lineer  $\frac{kT}{e} \ll V \ll IR$  bölgesi güvenilir sonuçlar veremeyecek kadar kısalarak, değerlendirilen V gerilimi çok küçükse, doyum akımı ( $I_0$ ) değeri daha da güvenilir hale geleceğinden; Norde (1979), bu durumda engel yüksekliğinin daha güvenilir elde edilebileceği bir başka fonksiyon olarak F(V) önermiştir. Termiyonik emisyon teorisine göre akım denklemi;

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{e(V - IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.20)$$

Norde gerilimine göre düzenlenerek aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{I}{AR * T^2}\right) \quad (2.21)$$

Denklemden Norde,  $e/kT$  değerini  $\beta$  değişkeni olarak tanımlamıştır.

Denklemden  $V_d \gg kT/e$  kabul edilirse denklemler 2.20 ve 2.21'den

$$F(V) = \Phi_b + IR_s - \frac{1}{2}V \dots \quad (2.22)$$

elde edilir. İdeal durumda seri direnç olmayacağından  $R_s=0$ ,  $F(V)$  denklemi eğimi  $-1/2$  olan bir doğru olur ve bu doğrunun gerilim eksenine uzatılması ile engel yüksekliği  $\Phi_b$  elde edilir. Ancak, sadece direncin olduğu durumda Norde (1979) denklemi aşağıdaki hale dönüşür.

$$F(V) = F_R(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{V}{AR * T^2}\right) \quad (2.23)$$

Yüksek gerilim uygulandığı düşünüldüğünde kesim eğrisinin eğiminin  $+1/2$  olduğu görülür. Düşük akımlar için direncin hesaba katılmadığı  $F(V)$  geçerli kabul edilirken, yüksek akımlar için seri direncin etkin olduğu  $F_R(V)$  fonksiyonu kabul edilir. Bu iki uç durum arasında kalan ve denklemin minimum değere ulaştığı nokta Norde (1979) tarafından engel yüksekliğinin bulunması için geçerli nokta olarak kabul edilmiştir.  $F(V)$  denkleminin gerilime göre türevi alınır ve  $V_d$ 'ye göre düzenlenirse;

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV_d} \left[ 1 + R_s \left( \frac{dI}{dV_d} \right) \right]^{-1} \quad (2.24)$$

bulunur.

$$\frac{dI}{dV_d} = \frac{d}{dV_d} [I_0 \exp(\beta V_d)] = \beta I \quad (2.25)$$

$F(V)$  fonksiyonunun  $V$ 'ye göre türevi alınıp elde edilen denklem sıfıra eşitlenirse denklemin minimum noktası bulunmuş olur.  $F(V)$ 'nin minimum noktasından engel yüksekliği hesaplanırken kullanılacak olan  $I_{\min}$  ve  $V_{\min}$  aşağıdaki denklemlerden hesaplanabilir.

$$I_{\min} = \frac{1}{\beta R} = \frac{kT}{qR} \quad (2.26)$$

$I_{\min}$  değeri yerine yazılarak  $V_{\min}$  denklemi aşağıdaki gibi bulunur.

$$V_{\min} = I_{\min} R_s + V_d(I_{\min}) = \frac{1}{\beta} + \ln\left(\frac{I_{\min}}{AR * T^2}\right) \quad (2.27)$$

$$F(V_{\min}) = \frac{V_{\min}}{2} - \frac{1}{\beta} \left(\frac{I_{\min}}{AR * T^2}\right) \quad (2.28)$$

$I_{\min}$ ,  $F(V_{\min})$  denklemleri kullanılarak;

$$R_s = \frac{kT}{eI_{\min}} \quad (2.29)$$

$$\Phi_{bp} = F(V_{\min}) + \frac{V_{\min}}{2} - \frac{kT}{e} \quad (2.30)$$

$R_s$  ve  $\Phi_b$  denklemleri elde edilir (Kara 2011).

### 2.3. Sol-Gel Yöntemi

Sol-Gel kaplama sistemleri ilk olarak 1950'li yıllarda Schott Glass tarafından kapsamlı olarak çalışılmaya başlanmıştır. Ancak, sol-jel yöntemine birçok araştırmacının ilgisinin artması 1970'lerin ortalarında başlamış ve çalışmaların yayınlanma sayısı bu zamandan itibaren ivme kazanmıştır (Thomas1988). Günümüzde tıp alanı da dahil olmak üzere yapılan çalışmalarda sol-jel yöntemi gibi optiksel uygulamalara hitap eden tekniklere ilgi her geçen gün artmaktadır. Sol-jel tekniğinin çalışma prensibine değinecek olursak; homojen bir çözelti elde edebilmek amacıyla saf maddeler tercih edilir. Elimizdeki malzemelerden yeteri kadar eklenerek solüsyon elde edilir. Solüsyon üzerinde reaksiyonlar oluşturularak karışımın jel durumuna geçmesi sağlanır. Jel durumuna gelen karışım istenilen özelliklere sahip tabanlar üzerinde herhangi bir teknikle ince film şeklinde büyütülür. İnce filmlerin ise uygun işlemlerden geçirilmesi ile amaçlanan

malzemeye dönüşmesi sağlanır (Keskenler 2012).İnce filmler optiksel özelliklerine göre; yansıtıcı-yansıtıcı olmayan tabaka, girişim (ışık) filtreleri, dekorasyon (renk vb.) compact disk ve güneş pili uygulamalarında kullanılır. Elektriksel özelliklerine göre; yalıtkan ve iletken malzemelerde, yariletken aygıtlarda ve dielektrik malzemelerde kullanılır. Kimyasal özelliklerine göre ise alaşımlarda veya difüzyon olayını engellemede, oksidasyon veya korozyona karşı korumada, gaz ve sıvı sensörlerde, boya, kauçuk, plastik, kozmetik, sabun, yazıcı mürekkebi ve ilaç üretiminde kullanılır.

Sol-jel tekniğinin avantajları;

- Atomik büyütme sayesinde filme özgü malzeme özelliklerinin elde edilmesi; elde edilen bu özelliklerinin kontrol edilebilmesi,
- Farklı elementlerin kullanılmasıyla fiziksel, optik veya elektriksel özellikleri değiştirilmiş malzeme elde edilebilmesi,
- Moleküllerin homojen bir şekilde pürüzlü veya pürüzsüz olan yüzeyde yayılabilmesi,
- Üst üste kaplama işlemlerine imkân vermesi, böylece çok katlı ve çok değişik özelliklere sahip film elde edilebilmesi,
- Filmler ortama çok fazla etkileştirilmediğinden saf kaplama elde edilebilirliği,
- Isıl işlem yapılırken sıcaklıklar genellikle 1000 °C'nin altında olduğundan önemli derecede enerji tasarrufu sağlanması,
- Çevreye zarar vermemesi,
- Cihaz ve malzemelerin basitliği, kolay kullanılabilirliği, endüstriyel ve ekonomik bir teknik olması.

Sol-jel tekniğinin dezavantajları;

- Bazı çözeltilerin hazırlanma aşamalarının uzun zaman alması nedeniyle işlemin kısa sürede tekrarlanamaması,
- Kullanılan malzemelerin maliyetlerinin yüksek olması,
- Malzeme kaybının fazla olması,
- Film üzerinde karbon çökeltisinin kalması,
- Bu teknikte kullanılan organik hammaddelerin sağlığa zararlı olması ve bu zararın önlenmesi için gereken koruyucuların maliyetinin de yüksek olmasıdır (Polat 2009).

### 2.3.1. Sol- Gel Döndürme Yöntemi

Sol-jel döndürme yönteminde birkaç damla solüsyon kaplanacak malzeme üzerine damlatılır. Film oluşturmak için seçilen altlık döndürme cihazındaki tabanda 3000–4000 rpm'e kadar olabilecek hızlarda döndürülür. Taban dönerken solüsyon tabakaya yayılarak solüsyon buharlaşmaya başlar. Solüsyon büyük bir kısmı buharlaştıktan sonra ince film elde edilmiş olur. Tabanda solüsyon kalan kısmının da buharlaşması için film düşük sıcaklıklarda ( $\sim 100 - 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ısıtılır. Bu işlem istenilen film kalınlığına ulaşıncaya kadar tekrar edilebilir. Elde edilen film, kalan organikleri buharlaştırmak için yüksek sıcaklıklarda ( $\sim 300 - 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) fırınlanarak tavlânır (Korkmaz 2011).

### 2.4. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

Binnig, Quate ve Gerber tarafından 1986 yılında üretilen atomik kuvvet mikroskobu bilinen mikroskoplardan farklı bir yapıya sahiptir. Bilinen mikroskoplarda cisimler gerçekten görülürken atomik kuvvet mikroskobuyla ise cismin ya da yüzeyin sadece bir resmi görülebilir.

Atomik Kuvvet Mikroskobu cismin yüzey morfolojisini angstrom ( $\text{\AA}$ ) mertebesinde 100 mikrona ( $\mu\text{m}$ ) kadar görüntüleyebilen bir mikroskoptur. Atomik kuvvet mikroskobunun en önemli avantajı, özel bir hazırlama işlemi gerektirmeden örneklerin doğrudan ve her ortamda görüntülenebilmesidir. İnce ve kalın film kaplamaların, seramiklerin, alaşımların, camların, sentetik ve biyolojik örneklerin, metallerin, polimerler ve yarıiletkenlerin yüzey özelliklerini incelemeyi sağlayan AFM bu anlamda önemli bir yere sahiptir. AFM'de genellikle silisyum oksitten yapılan bir denge çubuğu silisyum, silisyum oksit veya silisyum nitrürden yapılmış keskin bir tip (iğne) ile bağlıdır. Denge çubuğu yüzeye yaklaştırılırsa tip ile yüzey arasındaki kuvvetler denge çubuğunun z ekseninde boyunca (yüzeye dik olarak) yukarı ve aşağı doğru eğilmesine neden olur. Bu yer değişimlerin optik araçlarla ölçülmesi ile yüzey morfolojisi tespit edilir. AFM tipinin hareketinin temelinde Hook yasası vardır. Hook yasası ise denge çubuğunun z-mesafesi kadar yer değiştirmesi için uygulanan kuvvet ( $F$ ) ve kentiğerin yay sabiti ( $k_1$ ) ile ifade edilir. Böylece tip ve örnek arasındaki etkileşim kuvvetleri ( $F = -k_1 z$ ) hesaplanabilir.

Bir atomik kuvvet mikroskobun performansı denge çubuğunun niteliklerine bağlı olarak değişir (Keskenler 2012).

## 2.5. ZnO ve Yapısal Özellikleri

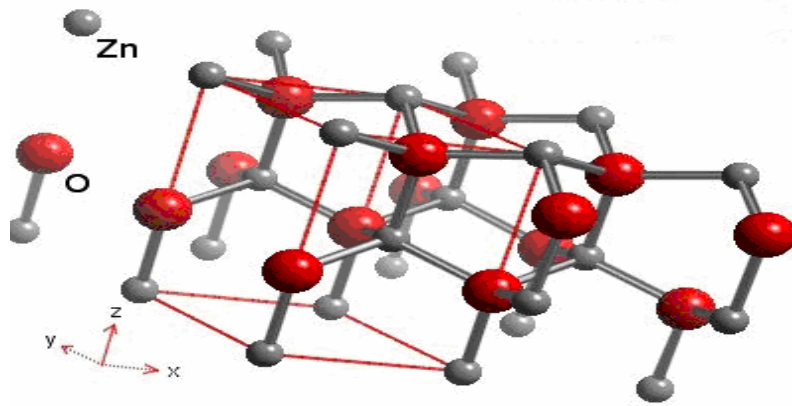
Nano yapılı devre elemanı çalışmalarında; nano yapılı malzemelerin elektronik, optik, optoelektronik vb. mevcut uygulamaları bilimsel olarak geniş çapta yer alır (Shan and Yu 2004; Farag et al. 2011). ZnO bu nano yapılı malzemeler arasında nano teknoloji açısından en önemli elementlerden biridir (Köse et al. 2009). Nanoteknolojiyi temel alan aygıtların geliştirilmesindeki yeri ile büyük bir potansiyele sahip olan ZnO yarıiletkeni, üzerinde en fazla çalışılan malzemedir. ZnO, geniş bant aralığı sayesinde UV bölgede çalışan lazer diyot ve ışık yayan diyot (Light Emitting Diode, LED) yapımında kullanılabilme potansiyeline sahiptir (Comba 2009).

ZnO'nin eşsiz elektronik, optik ve mekanik özellikleri; nano devreler için olan önemini artırmıştır. ZnO, ince film transistörleri (TTF), piezoelektronik devreler, yüksek güçlü elektronik devreler, LED diyotlar, alan etkili transistörler, varistörler, nano fiberler, sensörler, güneş pilleri, nano tüpler, nano çubuklar vb. birçok elektronik devre elemanı yapımında kullanılmaktadır (Gulino and Tabbı 2005; Köse et al. 2009). Son yıllarda yapılan çalışmalar incelendiğinde ZnO birçok element ile katkılanarak n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerinin elde edildiği görülmüştür. ZnO'ye katkılanan elementler ile ZnO'nin elektriksel, optik ve manyetik özelliklerinin değiştirilmesi sağlanmıştır (Shan and Yu 2004; Farag et al. 2011).

II-IV bileşiklerinin bir kısmı kübik ya da “zinc blende” bir kısmı da “hekzagonal wurtzite” yapıya sahiptir (Demirci 2006). Doğada “mineral zinkit” olarak bulunan ZnO, hekzagonal yapıda kristalleşmekte ve örgü sabitleri  $a=3,24982 \text{ \AA}$ ,  $c=5,20661 \text{ \AA}$ 'dur. Her Zn atomu birinci kabukta dört O atomu ve ikinci kabukta on iki Zn atomu ile çevrilmiştir (Çavaş 2012). ZnO geniş bant aralığına sahip olup (oda sıcaklığında 3,2 eV) direkt bant geçişli bir yarıiletkendir. Geniş bant aralığına sahip olması elektromanyetik dalga spektrumunun mavi ve morötesi bölgesinde LED yapımı için uygun malzeme olmasını sağlamıştır. Geniş bant aralıklı diğer malzemelerle kıyaslandığında ZnO'nin eksiton bağlanma enerjisinin yaklaşık üç kat daha büyük olduğu görülür (60 meV). Bu eksiton

bağlanma enerjisinin büyük olması, oda sıcaklığında hatta bunun üzerindeki sıcaklıklardaki optik çalışmalarda eksitonik davranışını verimli kılmaktadır (Tüzemen et al. 2006). Çinko oksit yüksek bağlanma enerjisi ile ayrıca direkt geçiş yasak enerji aralığı ile fotokondüktör, varistör, gaz sensörü ve ince film için aktif tabaka olarak tercih edilmektedir (Lin et al. 2012). ZnO, çinko ile oksijenin birleşmesi ile oluşan yarıiletken özelliktedir. Bu ZnO kristalleri her bir çinko atomunun etrafını 4 adet oksijen atomunun sarması ile oluşmuştur. Tetrahedral bir görünüme sahiptir Şekil 2.6'da gösterildiği gibi ZnO'te bu tetrahedral yapıyı oluşturan bağlar tipik  $sp^3$  kovalent bağlardır. ZnO'in kristal yapısı wurtzide, zinc-blend ya da kaya tuzu fazında olabilir. Normal şartlarda termodinamik olarak dayanıklı olan faz wurtzite fazdır. Kübik yapıların büyümesi ile zinc blend faz dayanıklı hale gelir. Kaya tuzu fazı ise ancak yüksek basınç altında gözlenebilmektedir (Tuncel 2007).

ZnO'in önemli özelliklerinden biri de piezoelektrik özelliğidir. ZnO piezoelektrik özelliğinden dolayı; kuvvet algılamada, akustik dalga rezonatörü, akustik-optik modülatör vb. birçok çalışmanın konusu olmuştur. Piezoelektrikliğin orijini, oksijen ve çinko atomlarının tetrahedral yapıda bağlandığı kristal yapısındanır. Merkezi olmayan simetrik yapıda, negatif ve pozitif yük merkezi, örgü düzeninin bozulmasına neden olan dış basınç etkisiyle değiştirilebilir. Bu şekilde yer değiştirme bölgesel dipol momentleri ile sonuçlanır. Böylece makroskobik dipol momentleri tüm kristal üzerinde belirir. Gerçekte tetrahedral yapıda bağlanmış yarı iletkenler arasında olan ZnO geniş bir elektromekanik çiftlenme sağlar. Bu şekilde en yüksek piezoelektrik tensördür (Bilgen 2008).



Şekil 2.6. ZnO'in kristal yapısı (Özgür 2005)

## 2.6. ZnO'in Elektriksel ve Optiksel Özellikleri

ZnO bileşiği görünür bölgede yaklaşık %80-%90 optik geçirgenliğe sahiptir. Ayrıca  $10^{-3}$ - $10^{+2}$   $\Omega$ .cm aralığında bir elektriksel dirence sahiptir. Serbest taşıyıcı yoğunluğu  $5 \times 10^{17}$ - $3 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ , mobilite  $180 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  ve kırılma indisi 1,95-2,1 arasında değişmektedir (Çavaş 2012). ZnO saydam yarıiletken olarak iyi bir malzemedir. ZnO nano-yapıların kendine özgü optik özellikleri vardır. Bu özellikleri fotonik cihaz uygulamaları için yoğun olarak çalışılmıştır. ZnO nano çubukların fotoluminans spektrumunda uyarımlı salınım gözlenmektedir (Park et al. 2003). ZnO nano-kablo dizileri oda sıcaklığındaki UV lazerleri elde etmek için ümit vadeden bir materyaldir. Son zamanlardaki araştırmalar ZnO nano-yapılarının entegre optoelektronik devrelerinin yapıtaşı olabilecek bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir (Bilgen 2008).

ZnO'in özellikleri ısı ile değiştirilebilirken uygun katkı ile de değiştirilebilmektedir. Katkı maddesi olarak Al, In, Ga, Li, Cu, Sn ve F'ün kullanıldığı pek çok uygulama alanı bulunmaktadır.  $\text{Zn}^{+2}$  iyonuna yüksek değerlikli  $\text{Al}^{+3}$ ,  $\text{In}^{+3}$ ,  $\text{Ga}^{+3}$  gibi iyonların katkı edilmesi ile çinko oksit'in iletkenliği artırılabilir. ZnO'e bor katkısı yapıldığında; düşük sinterleme sıcaklıklarında öz direnç azalırken iletkenliğin arttığı görülmüştür. Sn katkısı ZnO ince filmlerin geçirgenliklerinde artışa, öz dirençlerinde ise azalmaya sebep olmuştur. Bu durum son zamanlarda üzerinde durulan güneş pili yapımı çalışmalarında avantaj olarak görülmektedir. ZnO bazı gazlara maruz bırakıldığında elektriksel iletkenliğinde değişiklikler gözlemlenir. Bu değişiklikler farklı gazlar için farklı malzeme katkılarıyla geliştirilebilir. Bu nedenle ZnO gaz sensörü yapımında önemli bir yere sahip olmuştur (Polat 2009).



### 3. MATERYAL VE METOT

#### 3.1. Deneysel İşlemler

ZnO ince filmler hazırlamak için kullanılacak olan çinko asetat dihidrat ( $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ ), etilen glikol monometil eter, monoetanol amin ve  $MgCl_2$  Sigma-Aldrich Şirketi'nden ticari olarak satın alındı. İnce film büyütme işlemi sol-gel yöntemi ile gerçekleştirildi. İşlem basamakları aşağıdaki gibidir.

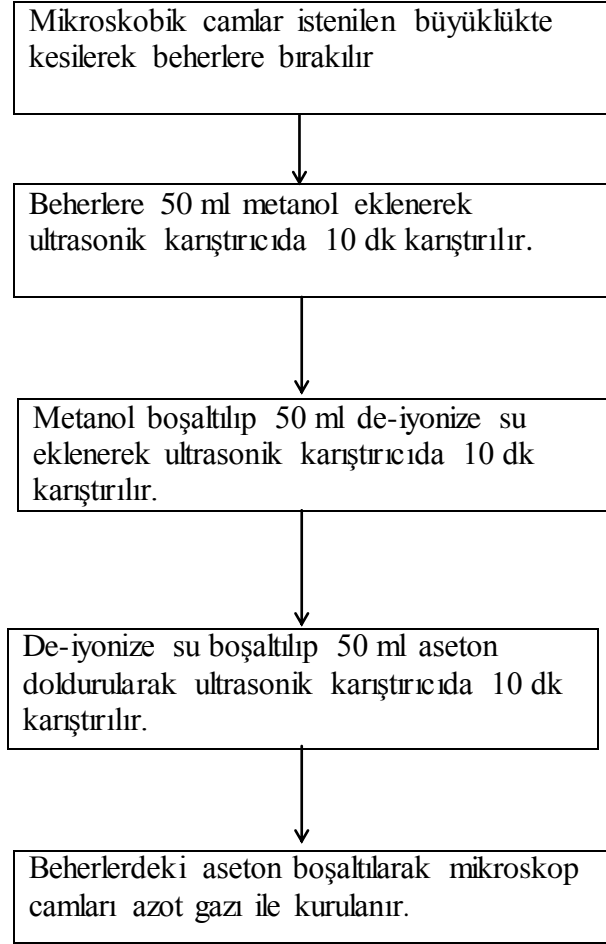
- İlk olarak  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2(H_2O)$  (çinko asetat dihidrat) kompleks bileşiği 2-methoxethanol kimyasalında çözüldü. Monoethanolamin çözeltide dengeleyici (stabilizer) olarak kullanıldı.
- Kullanılan stabilizerin molar oranı 1.0 olarak kabul edildi.
- Elde edilen karışım  $60\ ^\circ C$ ' de 2 saat boyunca magnetik karıştırıcıda karıştırıldı. Bu işlem ile solüsyondaki molekül dağılımı homojen hale getirilerek berrak ve homojen bir çözelti elde edildi.
- Elde edilen solüsyon 18 saat dinlendirildi.

Mg Katkılı ZnO filmler elde edilirken yukarıdaki işlem basamakları takip edildi. Ancak, karışım  $60\ ^\circ C$ 'de 2 saat boyunca magnetik karıştırıcıda karıştırıldıktan sonra  $MgCl_2$  eklendi. İşleme 1 saat daha devam edildikten sonra karışım 18 saat dinlendirildi. Katkısız, %1, %3, %5 ve %7 Mg katkı ZnO ince filmler elde etmek için kullanılan kimyasal miktarları Tablo 3.1'de veriliyor.

Tablo 3.1. ZnO numunelerine Mg katkılama miktarları

Numune adı	ZnO (gr)	$MgCl_2$ (gr)
Saf ZnO	1,097	0,0000
%1 Mg katkı ZnO	1,097	0,0476
%3 Mg katkı ZnO	1,097	0,1428
%5 Mg katkı ZnO	1,097	0,2380
%7 Mg katkı ZnO	1,097	0,3332

Üzerine ZnO filmler oluşturmak için kullanılacak cam altlıkların kimyasal temizleme basamakları aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Cam alt tabakaların kimyasal temizleme işlemlerinin şematik gösterimi

Cam altlıkların kimyasal temizleme işlemi tamamlanarak katkısız, %1, %3, %5 ve %7 Mg katkılı ZnO olmak üzere 5 numune için hazır duruma getirildi. İşlem basamakları aşağıdaki gibidir.

- Cam altlık spin coater üzerine yerleştirildi.
- Hazırlanan jelden 2-3 damla (yaklaşık olarak) cam üzerine damlatıldı.
- Spin coater 30 sn, 1000 rpm'e ayarlandı. Cam altlık üzerine çözeltinin homojen bir şekilde ve ince bir tabaka halinde yayılması sağlandı.

- Her bir kaplamadan sonra filmler 150 °C sıcaklığındaki tablanın üzerinde 5 dakika kadar sıcak tabla (hot plate) üzerinde ısıl işleme tabi tutularak kurutuldu.
- Bu işlemler her bir numune için 10 kez tekrarlandı. Son olarak filmler, fırın içinde 1 saat boyunca 400 °C'de tavlansak oda sıcaklığında soğutuldu.

Fırında yapılan tavlama işlemi ile ince filmlerin olabildiğince kusurlardan arındırılması hedeflendi.



Şekil 3.2. Dönel kaplama (spin coating) cihazı

Elde edilen ince filmlerin morfolojisi atomik kuvvet mikroskopisi (AFM) ile incelendi. Optik karakterizasyonu UV-vis spektroskopisi (Shimadzu UV-VISNIR3600 spektrometre) ile gerçekleştirildi. AFM görüntülerinin ve optik ölçümlerin alındığı cihazlar sırasıyla, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'de görülmüyor.



Şekil 3.3. UV-vis spektrofotometre

Uygulama için bir yarıiletken yüzeyinin ZnO ile kaplandığı heteroeklemler oluşturma yoluna gidildi. Bunun için (100) doğrultusunda büyütülmüş 0,01  $\Omega$ -cm özdirence sahip bir yüzü mat diğer yüzü parlatılmış p-tip silisyum kullanıldı. İşlem basamakları aşağıdaki gibidir.

- p-tip Si standart kimyasal temizleme prosedürü ile temizlendi.
- Omik kontak oluşturmak için 90 nm kalınlığında bir Al tabakası, p-Si'un arka mat yüzü üzerine  $3,4 \cdot 10^{-5}$  mbar vakum altında termal buharlaştırma cihazı (Şekil 3.5) ile kaplandı.
- Numuneler  $570^{\circ}\text{C}$ 'de azot gazı ortamında tavlandı.
- p-Si/Al için omik davranış, lineer I-V karakteristiği ile teyit edildi.
- Hazırlanan katkısız, %1, %3, %5 ve %7 Mg katkılı ZnO çözeltiler spin coater ile 30 sn 1000 rpm'de p-tipi Si'un ön (parlak) yüzeyi üzerine kaplandı.
- Son olarak, 2 mm çapa sahip olan dairesel Al noktalar, molibden bir maske boyunca termal buharlaştırma ile ZnO ince film kaplı Si numuneler üzerine kaplandı. Böylece, katkısız ve Mg katkılı ZnO/p-Si heteroeklem diyotlar elde edildi.
- Akım-voltaj ve seri direnç-voltaj ölçümleri Keithley SCS-4200 yarıiletken karakterizasyon sistemi kullanılarak yapıldı.



Şekil 3.4. Termal buharlaştırma cihazı



Şekil 3.5. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM)

Bu tezdeki ölçümler; Fırat Üniversitesi Fen Fakültesi, Nanoscience and Nanotechnology Laboratuvarı'nda Prof. Dr. Fahrettin Yakuphanoğlu desteği ile Şekil 3. 2-5'de verilen cihazlar kullanılarak alınmıştır.

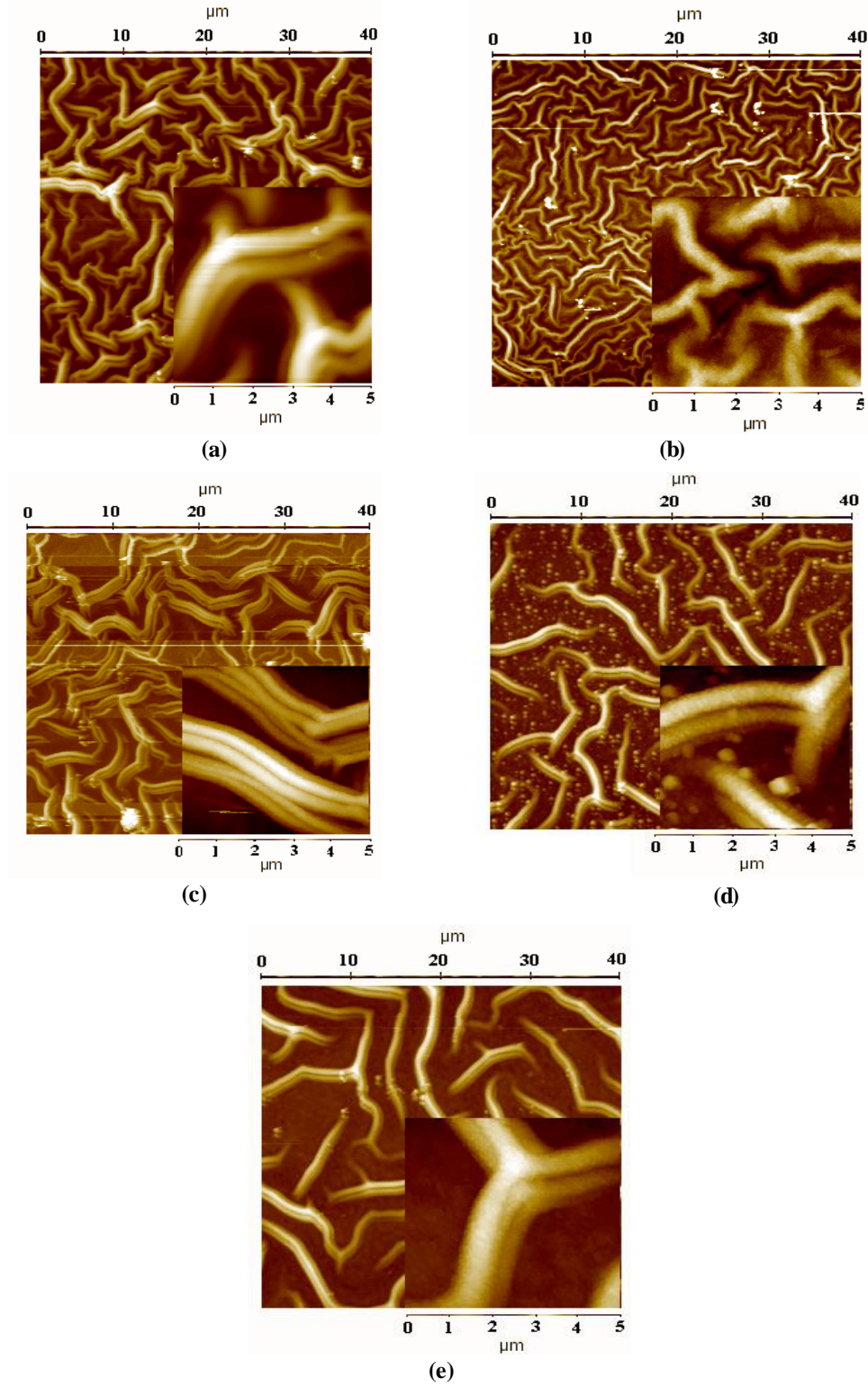
## 4. TARTIŞMA VE SONUÇ

### 4.1. Giriş

Bu bölümde, materyal ve metot bölümünde ayrıntıları verilen işlem basamakları takip edilerek elde edilen katkısız ve farklı oranlarda Mg katkılı ZnO ince filmler ve bu filmlerin ara yüzey tabakası olarak kullanıldığı Al/n-ZnO/p-Si heteroeklem diyotların akım-voltaj ölçümlerinin değerlendirilmesi-yorumlanması ve sonuçları yer almaktadır.

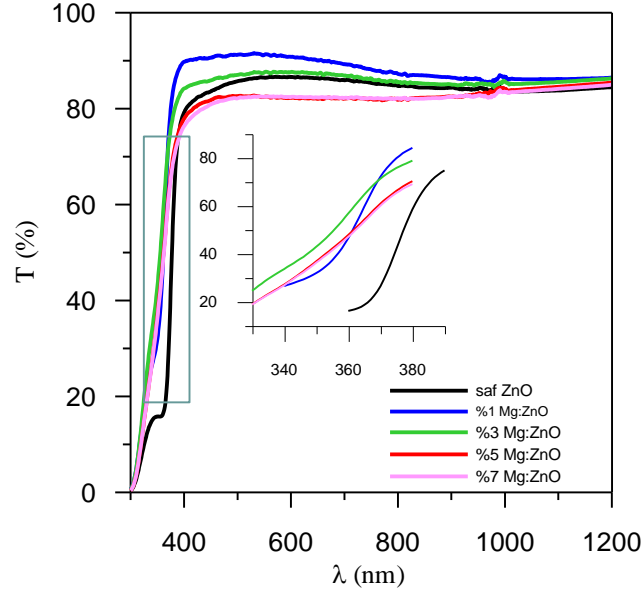
### 4.2. ZnO İnce Filmlerin Morfolojik ve Optik Karakteristikleri

Elektronik uygulamalarda ZnO ince filmlerin yüzey morfolojisi büyük önem arzeder. Bu amaçla filmin yüzey morfolojisini araştırmak üzere atomik kuvvet mikroskopundan faydalanıldı. ZnO ince filminin iki boyutlu (2D) AFM görüntüleri Şekil 4.1a-e'de veriliyor. Şekiller sırasıyla katkısız ZnO, %1 Mg katkılı ZnO, %3 Mg katkılı ZnO, %5 Mg katkılı ZnO ve %7 Mg katkılı ZnO ince filmlerin AFM görüntülerini gösteriyor. Bütün görüntüler rastgele yerlerden  $40 \times 40 \mu\text{m}^2$  ve  $5 \times 5 \mu\text{m}^2$  yüzey alanından alındı. AFM görüntüleri ZnO filminin nano-fiberlerden oluşturulduğunu gösteriyor. İnce filmler için yüzey pürüzlülüğü (surface roughness) önem arz etmektedir. Katkısız ve Mg katkılı ZnO filmlerin yüzey pürüzlülüğü bir PARK system AFM XEI software program kullanılarak belirlendi. Yüzey pürüzlülüğü optik ve elektriksel karakteristikler üzerine büyük etkiye sahiptir. Ayrıca, kontak oluşumu iki yüzey arasında gerçekleştiği için minimum pürüzlülük arzu edilir. ZnO ince film için yüzey pürüzlülüğü  $142,32 \pm 3$  nm olarak bulundu.



Şekil 4.1. AFM mikrofotografılar  $40 \times 40 \mu\text{m}^2$  alanlar (a) katkısız ZnO, (b) %1 Mg katkılı ZnO, (c) %3 Mg katkılı ZnO, (d) %5 Mg katkılı ZnO and (e) %7 Mg katkılı ZnO filmler (Sağ alt köşelere eklenen görüntüler  $5 \times 5 \mu\text{m}^2$  alanları gösteriyor)

Geçirme, yansıma ve soğurma (transmittance, reflectance, absorbance) spektrumu, ince filmlerin optik özellikleri hakkında bilgi elde etmek için en uygun deneysel yollardır. Şekil 4.2-4 bu spektrumlara ait eğrileri gösteriyor.

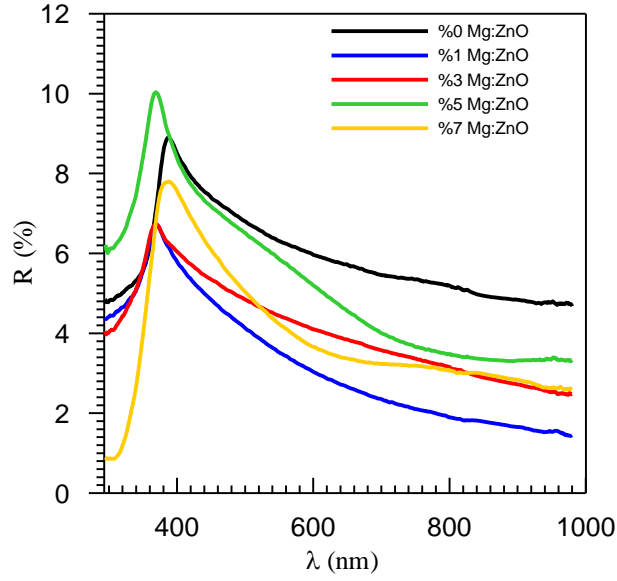


Şekil 4.2. Katkısız ve Mg katkı ZnO ince filmlerin geçirme spektrumu

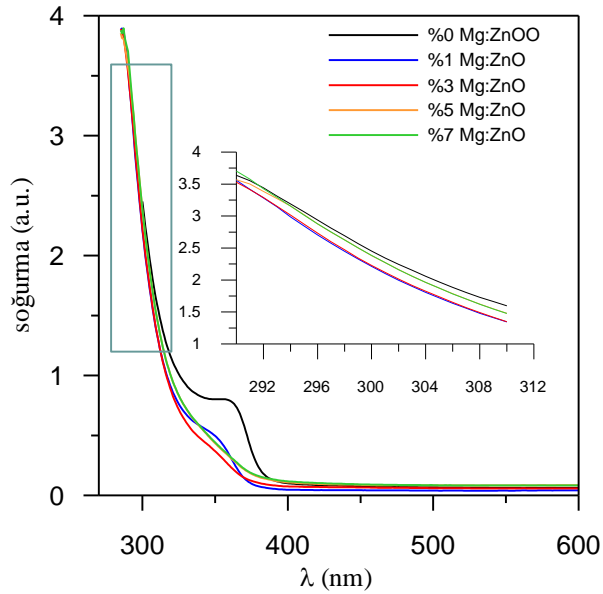
Bütün filmlerin görünür ve kızılötesi (infrared) bölge boyunca temel soğurma kenarından dolayı oldukça geçirgen (transparan) oldukları görülmüştür. ZnO ince filmlerin ortalama geçirgenliği artan Mg katkı miktarıyla azaldığı Şekil 4.2'den görülmüştür. Optik geçirgenlikteki azalma serbest taşıyıcılardan kaynaklanan soğurmadaki artışa bağlı olabilir (Wu et al. 1997). İnce filmlerin yansıma (reflectance) spektrumunu araştırıldı. Şekil 4.3 dalga boyuna karşı yansıma eğrilerini gösteriyor. Tüm filmler için eğriler 395 nm dalga boyunda maksimum değerlerine ulaşırken bu değerden sonra azalan dalga boyu ile hızlıca bir azalma eğilimi gösteriyor. Bu durum, yasak enerji aralığındaki optik geçişlere atfedildi. Ayrıca filmlerin görünür bölgede yansıma değerleri katkılama (doping) miktarı ile yakından ilişkilidir.

Ani soğurma, optik yasak enerji aralığına karşılık gelir. Şekil 4.4, 350-400 nm dalga boyu aralığında bu ani soğurmayı gösteriyor. Şekilde Mg katkı miktarının, 290-310 nm dalga boyu aralığında soğurmayı etkilediği görülmüştür. %7'lik Mg katkı oranına sahip film en yüksek soğurma değerli eğriyi sergiliyor. Soğurma prosesinde soğurma katsayısı önemli bir parametre olarak karşımıza çıkar.





Şekil 4.3. Katkısız ve Mg katkılı ZnO ince filmlerin yansımaya spektrumu



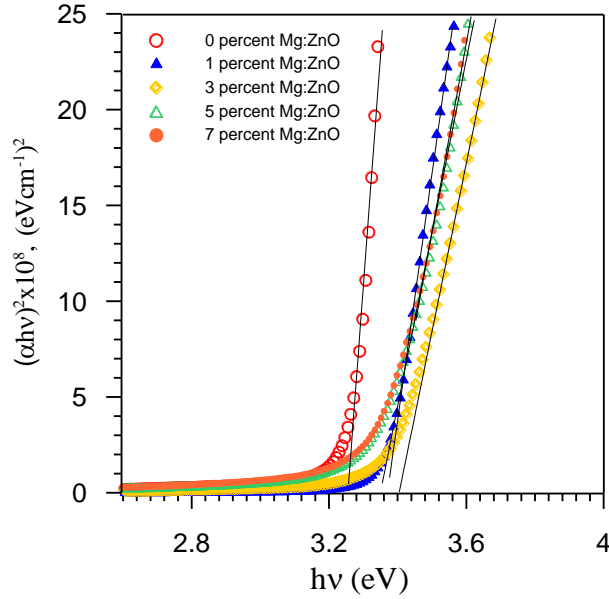
Şekil 4.4. Katkısız ve Mg katkılı ZnO ince filmlerin soğurma spektrumu

Soğurma katsayısı aşağıda verilen denklem yardımı ile belirlenebilir (Mott and Gurney 1940).

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^m \quad (4.1)$$

Bu ifadede A, enerjiden bağımsız bir sabittir.  $h\nu$  foton enerjisi,  $E_g$  ise yasak enerji aralığını göstermektedir. Güç faktörü olan 'm' değeri ise optik geçişlerin doğasına

bağlıdır. ZnO ince filmi direk optik geçişe sahiptir. Ayrıca  $10^4 \text{ cm}^{-1}$  değerinde büyük optik soğurma katsayısına ( $\alpha \geq 10^4$ ) sahip filmlerin direk bant geçişleri sergilediği ifade edilir (Abass et al. 2011; Rojesh and Menon 2005). Yasak enerji aralığı (band gap,  $E_g$ ) değerleri filmler için  $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$  eğrisinin ekstrapolasyonu ile elde edilir. Şekil 4.5, katkısız ve Mg katkılı ZnO filmler için  $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$  eğrilerini gösteriyor.



Şekil 4.5. Katkısız ve Mg katkılı ZnO ince filmleri için  $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$  eğrileri

Tüm filmler için belirlenen yasak enerji aralıkları Tablo 4.1’de listeleniyor. Hazırlanan katkısız ZnO ince filmler için yasak enerji aralığının değeri, literatürde çeşitli metotlarla elde edilen katkısız ZnO filmlerinkinden daha düşük bulundu (Oztaş and Bedir 2008; Yu et al. 2009). Bu durum optik band gap’ın, katkı içeriği ve kullanılan sentez metoduna göre değiştiğini gösteriyor. ZnO filmlerin yapısal modifikasyonu ZnO örgüde Mg iyonlarının Zn atomlarının yerine geçmelerine bağlı olabilir. Mg’un, ZnO’in yasak enerji aralığında valans bandına yakın bir direk geçiş için enerjideki azalma ile ilave enerji seviyeleri sağladığı literatürde rapor edildi (Oztaş and Bedir 2008). Film için hesaplanan  $E_g$  değerleri Mg katkı içeriği için düzenli bir rejim göstermiyor. Ayrıca artan Mg katkı miktarı ile yansıma pik pozisyonunda düzensiz bir artış gözleniyor.

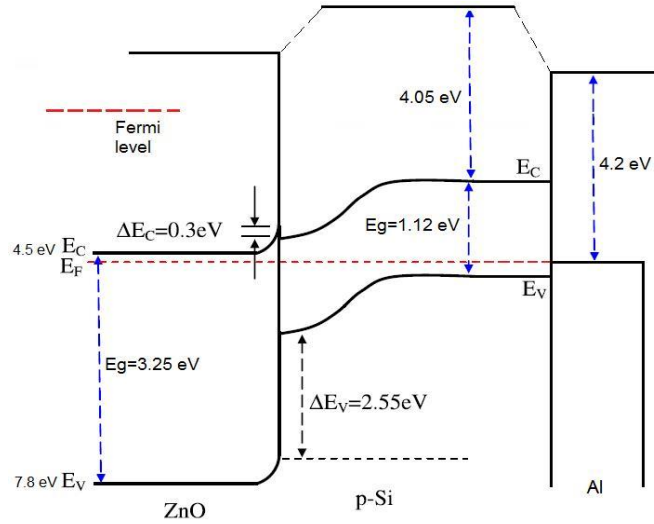
Tablo 4.1 Katkısız ve Mg katkılı ZnO filmler için bazı yapısal ve elektronik parametreler

Numune	$E_g$ (eV)	$R_q$ (nm)	D (nm) AFM	$\Phi_b$ (eV)	$n$	$\Phi_b$ (eV) Norde	$R_s$ (kohm)	$I_0$ (A)	RR ( $\pm 5V$ )
%0 Mg:ZnO	3,25	117,09	10-20	0,803	2,28	0,790	2,03	$2,8 \times 10^9$	$7,27 \times 10^4$
%1 Mg:ZnO	3,36	44,29	25-45	0,781	1,82	0,794	8,87	$6,7 \times 10^9$	$2,46 \times 10^5$
%3 Mg:ZnO	3,40	130,56	15-25	0,815	2,33	0,804	7,30	$1,8 \times 10^9$	$5,22 \times 10^4$
%5 Mg:ZnO	3,34	122,33	30-50	0,843	2,15	0,855	3,20	$6,1 \times 10^{-10}$	$5,85 \times 10^5$
%7 Mg:ZnO	3,35	136,17	20-30	0,839	1,70	0,821	1,37	$7,1 \times 10^{-10}$	$1,18 \times 10^4$

ZnO ince film için en yüksek  $E_g$  değeri %3'lük Mg katkı miktarı için elde edilirken, en yüksek yansıma %7'lik Mg katkılı numune için elde edildi.

### 4.3. Katkısız ve Mg Katkılı ZnO/p-Si Heteroeklem Diyotların Elektriksel Karakteristikleri

Şekil 4.6 ZnO/p-Si heteroeklem diyodun enerji band diyagramını gösteriyor.

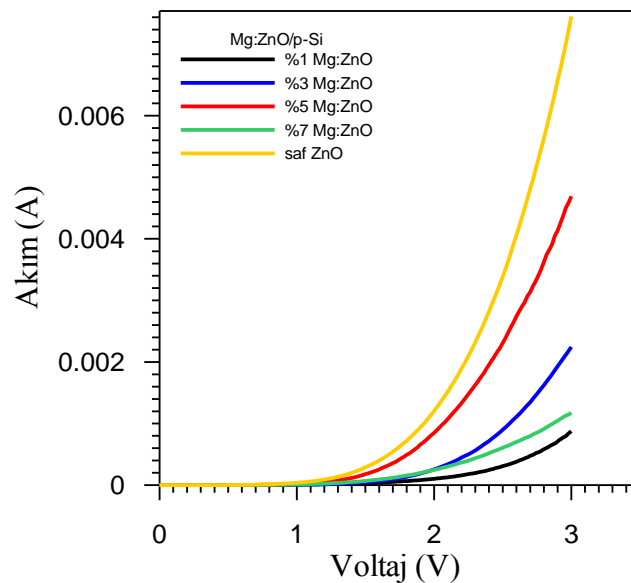


Şekil 4.6. Fermi Seviyesi dengesinde sonra enerji bant diyagramı

Burada, ZnO ve Si için yasak enerji aralıkları sırasıyla 3,25 eV ve 1,12 eV'tur. İyi bir omik kontak elde etmek için yüzeyde düşük bir engel ve p+ yarıiletken gereklidir. Bu nedenle yüzeyde yoğun bir şekilde katkılanmış yarıiletken, difzyon ya da iyon

ekmeyi gerektiren bir tünel kontak elde etmek için kullanılmalıdır (Neamen 1992). Metal yarıiletken yapılar için düşük dirençli omik kontaklar, kontak arayüzeyde meydana gelen Al ve Si arasındaki difüzyonun sonucudur (Kircher 1976). Si ve ZnO'nin elektron ilgisi sırasıyla 4,05 eV ve 4,35 eV'tur. Bu durumda Schottky engeli ZnO/p-Si arayüzeyde oluşabilir. Tavlamanın yapılmadığı durumda engel etkisi, ZnO ve p-Si arayüzeyde omik davranışa yol açan ve elektron yolları olarak davranan pek çok kusur ihmal edilebilir (Lee et al. 2011, Park et al. 2003). Elektronlar için iletkenlik band offset  $\Delta E_c = \chi(\text{ZnO}) - \chi(\text{Si}) = 0,3$  eV ve holler için valans band offset  $\Delta E_v = E_g(\text{ZnO}) - E_g(\text{Si}) + \Delta E_c = 2,55$  eV olarak elde edilir (Ye et al. 2006).  $\Delta E_v$  nin değerinin  $\Delta E_c$  den daha büyük olduğu görülüyor. Bu durum ZnO'ten p-Si'a elektron injeksiyonunun Si'dan ZnO'e boşluk (hole) injeksiyonundan daha büyük olduğu anlamına gelir. Bu yüzden sadece elektronlar engel boyunca difüze olabilir. Boşluklar ise 2,8 eV'luk bir engel tarafından önenebilir (Ye et al. 2006). Si içine elektron injeksiyonu ZnO yönünde depleksiyon tabakasını genişletirken boşluk injeksiyonu saturasyon akımına yol açarak sabit kalır. Bir pozitif beslem altında elektronlar, düşük potansiyel engelinden dolayı Si içine kolayca enjekte olabilirler. Dolayısıyla akım düz beslem ile artar.

Akım-voltaj karakteristikleri, diyot parametrelerini elde etmek için analiz edildi. Şekil 4.7 katkısız ve Mg katkılı ZnO/p-Si heteroeklem diyotların akım-voltaj karakteristiklerini gösteriyor.



Şekil 4.7. Katkısız ve Mg katkılı ZnO/p-Si heteroeklem diyotların akım-voltaj karakteristikleri

ZnO'in yasak enerji aralığının %1'lik Mg katkı miktarı ile artması ve bunun sonucu olarak akım-voltaj grafiğinde elde edilen akım miktarının azalması oldukça uyumlu sonuçlardır. Eşik voltajı (threshold voltage), katkısız ZnO/p-Si heteroeklem diyot için yaklaşık 0,9 V olarak belirlendi. Bu değer Mg katkı miktarı ile arttığı görüldü. Chen et al. (2006) azot (nitrogen) katkılı-ZnO/p-Si aygıt için bu voltaj değerinin katkısız ZnO/p-Si aygıtına kıyasla dramatik bir şekilde arttığını rapor etti. Heteroeklem diyotlar, ZnO ince filmin ideal olmayan kristal yapısı, yüzey hallerinin varlığı ve oksit tabakasından dolayı ideal olmayan davranış sergiler. Bu yüzey halleri çoklu akım yollarından sorumlu olan ilave enerji halleri sağlar (McClean et al. 1986, Wright et al. 2007). Aygıtlar için doğrultma oranlarının Mg katkı miktarına bağlı olduğu görülüyor. Sonuçlar Tablo 4.1'de veriliyor. Doğrultma oranındaki değişim diyot akımının farklı bir mekanizma ile kontrol edildiğini gösterir (Sharma et al. 2008; Joshi et al. 2011).  $V-IR_s > 3kT/q$ , şartı ile bir diyodun akım-voltaj karakteristiği aşağıdaki gibi verilir (Rhoderick and Williams 1988):

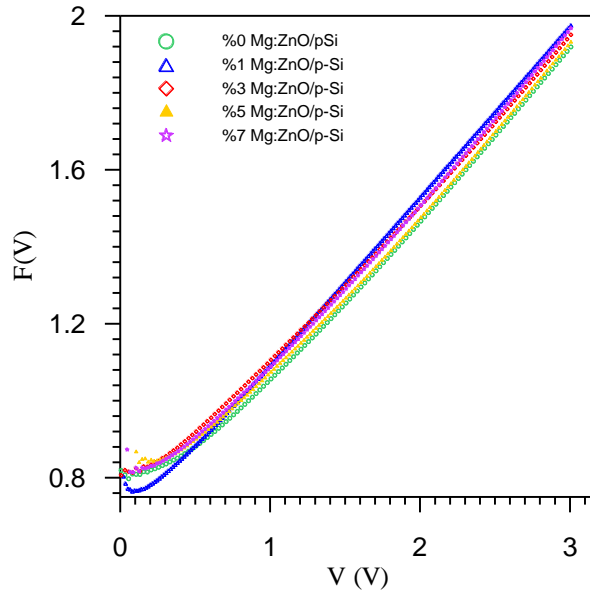
$$I = I_o \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) \quad (4.2)$$

Burada  $I_0$  saturasyon akımıdır ve aşağıda veriliyor.

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b^{I-V}}{kT}\right) \quad (4.3)$$

$I/[1-\exp(-qV/kT)]-V$  grafiği iki lineer bölge gösterir. Bu bölgenin eğimi ve y-eksenin kesiminde idealite faktörü ve engel yüksekliği bulundu. Sonuçlar Tablo 4.1'de listeleniyor. Elde edilen idealite faktörü değerlerinin '1' den büyük olduğu görülüyor. Bu durum seri direnç etkisi ve ZnO ile Si arasındaki doğal oksit tabakasına atfedilir (Soylu and Yakuphanoglu 2010). Tablo 4.1'de görüldüğü gibi idealite faktörü %3'lük Mg katkısına kadar bir artış gösteriyor ve artan katkı miktarı ile azalıyor. 0,79 eV'luk engel yüksekliği değeri literatürdeki foto-kaynaklı elektro depozisyon ile elde edilen ZnO/p-Si aygıtı için bulunan 0,50 eV'luk (Lee et al. 2010) engel yüksekliğinden büyükken, sol-gel yöntemi ile elde edilen aygıt için bulunan 0,78 eV (Yakuphanoglu et al. 2010) değeri ile iyi bir uyum içindedir. Yüzey hallerinin yoğunluğu yeterince yüksek olduğunda, engel yüksekliği idealite faktörünün büyük değerlerine yol açarak yüzey halleri ile kontrol edilebilir (Rhoderick and Williams 1988, Monch 1990).

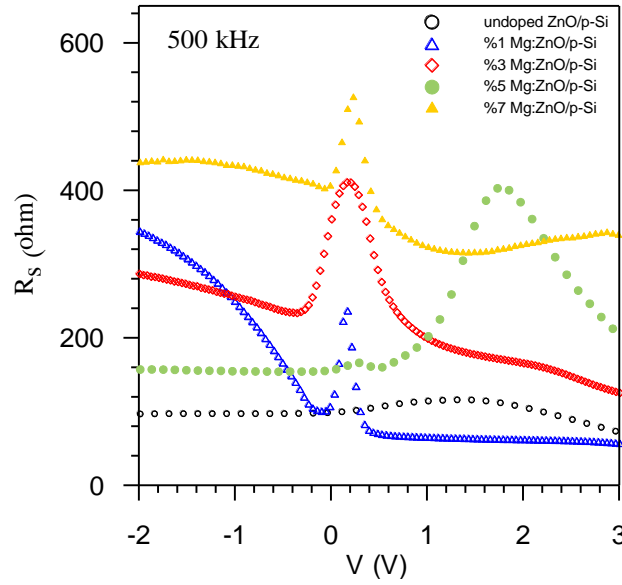
Seri direnç etkisini analiz etmek için ayrıntıları kuramsal temeller bölümünde açıklanan Norde (Norde 1979) metodu kullanabiliriz. Değerlendirilecek akım ölçülen tüm I-V karakteristikleri boyunca olacaktır. Ölçümlerin yeterince geniş bir aralığı kapsamaması durumunda düz beslem I-V eğrilerinin üç kısma ayrılabilceği deneysel bir gerçektir. Şekil 4.8 heteroeklem diyotlar için voltaja karşı Norde fonksiyonunun değişimini gösteriyor.



Şekil 4.8. Katkısız ve Mg katkı ZnO/p-Si heteroeklem diyotların  $F(V)$ - $V$  eğrileri

Eğrilerin birer minimum noktaya sahip oldukları görülüyor. Bu değerler ve kuramsal temellerde ifade edilen denklem aracılığı ile engel yüksekliği bulundu. Belirlenen değerler Tablo 4.1'de veriliyor. Norde fonksiyonları ve termiyonik emisyon teorisi ile belirlenen değerlerin uyum içinde oldukları anlaşılıyor. Düz beslem akımı çoğunlukla yüksek voltaj bölgesinde seri direnç tarafından etkilenir. Seri direnç Norde metodundan türetilen ve kuramsal temellerde verilen denklem aracılığıyla ile bulundu. Elde edilen değerler Tablo 4.1'de listeleniyor. Bu değerlerin, Chen et al. (2006) tarafından çalışılan N katkı ZnO/p-Si heteroekleminin seri direnç değerlerinden küçük olduğu görülüyor. Seri direnci küçük olması aygıt kalitesi açısından oldukça önemlidir. Düşük seri dirençle ideal diyot karakteristiklerine ulaşabiliriz. Ayrıca, düşük seri direnç olası enerji kayıplarının önüne geçecektir. İki farklı çalışmada elde edilen seri direnç değerlerinin uyumlu olmayışı ZnO ince filmlerin sentez metoduna atfedilir. Seri direnç etkisi diyodun seri kombinasyonu ile modellenir. Doğrultucu kontak boyunca voltaj düşmesi diyot ve direnç

boyunca olan toplam voltaj düşmesine göre ifade edilir (Sağlam et al. 1996). Katkısız ve Mg katkılı ZnO/p-Si heteroeklem diyotlar için seri direncin voltaja bağlılığı Şekil 4.9'da görülmüyor. Seri direnç, (-2 V)-(+3 V) voltaj aralığında frekansa bağlı olarak değişiyor. Bu aralıkta seri direnç bir pik veriyor. Bu maksimum değer özellikle gerilimin uygulanmadığı durumlarda daha sık ortaya çıktığı görülmüyor. Ayrıca seri direncin Mg katkı miktarı ile değiştiği de anlaşılıyor.



Şekil. 4.9. Katkısız ve Mg katkılı ZnO/p-Si heteroeklem diyotların  $R_s$ -V eğrileri

Sonuç olarak, nano-yapılı katkısız ve Mg katkılı ZnO ince filmler sol-gel dönel kaplama metodu kullanılarak elde edildi. Katkısız ve Mg katkılı ZnO ince filmlerin yapısal ve fiziksel özelliklerinin Mg katkı miktarına güçlü bir şekilde bağlı olduğu görüldü. İki boyutlu atomik kuvvet mikroskobu görüntüleri ZnO ince film yüzeylerinin nano-fiberlerden oluştuğunu gösteriyor. Bütün ince filmler optik olarak %80'in üzerinde bir oranla geçirgenlik gösteriyor. ZnO yarıiletken ince filmlerin yasak enerji aralıkları Mg katkı miktarı ile değişiyor. Katkısız ve Mg katkılı ZnO/p-Si heteroeklem yapıların akım-voltaj karakteristikleri doğrultucu davranış sergiliyor. Mg elementinin katkı miktarının ZnO/p-Si heteroeklem diyotlarının seri direnci üzerine güçlü bir etkiye sahip olduğu anlaşılıyor. Bu yüzden ZnO/p-Si heteroeklem diyotlarının elektronik performanslarının Mg katkı miktarı ile kontrol edilebileceği değerlendirilir. Elde edilen sonuçlar, nano fiber MgZnO/p-Si heteroeklem diyodunun elektronik aygıt uygulamaları için iyi bir aday olduğunu gösteriyor.

## KAYNAKLAR

Abass A.K., Krier A., Collins R.A., “The influence of iodine on the electrical- properties of lead phthalacyonine (PBPC) interdiijital plamar gas sensors”, Phys. Status Solidi, 142: 435, 1994.

Askeland, D.R., “Malzeme bilimi ve mühendislik malzemeleri”, Cilt 2, ev. M. Erdoğan, Nobel Yayın Dağıtım Ltd. Őti., Ankara, 712 s, 1998.

Azoroff, L.V., Brophy, J.J., “Electronic Processes in Materials”, Mc Graw-Hill, 1963.

Batı, B., “İdeal Ve İdeal Olmayan Omik Doğrultucu Kontaktlı Au/n-Si Schottky Diyotlarda Doğru Beslem Kapasite-Voltaj-Frekans Karakteristikleri”, doktora tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.13-14-15, 1998.

Bedeaux D., Vlieger, J., “Optical properties of Surfaces”, World Scientific Publishing, USA, 444 s., 2001.

Belghazi Y., Schmerber G., Colis S., Rehspringer J.L., Berrada A., Dinia A., “Room-temperature ferromagnetism in Co-doped ZnO thin films prepared by sol-gel method”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 310: 2092–2094, 2007.

Bender, M., Gagaoudakis, E., Douloufakis, E., Natsakou, E., Katsarakis, N., Cimalla, V., Kiriakidis, G., Fortunato, E., Nunes, P., Marques , A., Martins, R., “Production and characterization of zinc oxide thin films for room temperature ozone sensing”, Thin Solid Films 418: 45–50, 2002.

Bilgen, Y., “Sol-Gel Yntemiyle retilen Nanokristal Zn:Ga İnce Filmlerinin Optik ve Mikroyapısal zelliklerinin İncelenmesi”, yüksek lisans tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mhendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, s.27, 2008.

Bohlin, K. E., “Generalized Norde plot including determination of the ideality Factor”, J. Appl. Phys, 60: 1223–1224, 1986.

Bozkurt, H., “Metal-Yarıiletken Kontaktlarda Kapasitenin Arayüzey Hallerine Bağlı İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 8-9-10, 2009.

Brillson, L.J., “The Surface and Properties of Metal- Semiconductor interfaces”, Surf.Sci. Reports., 2: 123-326, 1982



- Çağlar M., İlican S., Çağlar Y., Yakuphanoglu F., “Boron doped nanostructure ZnO films onto ITO substrate”, *J. Alloys Compd.* 509: 3177, 2011.
- Cansever, S., “Metal/Poli (Pentabromobenzyl Methacrylate-Co-Glycidyl Methacrylate) Heterojunction Diyotların Elektriksel Ve Optiksel Karakteristiklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans, Bozok Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 35-36, 2011.
- Chaabouni, F., Abaab, M., Rezig, B., “Metrological characteristics of ZnO oxygen sensor at room temperature”, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 100: 200–204, 2004.
- Chen X.D., Ling C.C., Fung S., Beling C.D., “Current transport studies of ZnO/p-Si heterostructures grown by plasma immersion ion implantation and deposition”, *Appl. Phys. Lett.*, 88: 132104, 2006.
- Comba, B., “Sol-Gel Yöntemi İle ZnO Kuantum Noktalarının Sentezlenmesi ve Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi. Fizik Bölümü, 2009.
- Cova, P., Singh, A., “Temperature dependence of I-V and C-V characteristics of Ni/n CdF<sub>2</sub> Schottky barrier type diodes”, *Solid-State Electronics*, 33: 11–19, 1990.
- Cowley, A.M., Sze, S.M., “Surface State and Barrier Height of Metal Semiconductor Systems”, *J. Appl. Phys.*, 36: 3212-3216, 1965.
- Cullity B.D., “X ışıklarının Difraksiyonu”, (Çev. A. Sümer), İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul, Türkiye, 664 s., 1996.
- Çavaş, M., “Nano Yapılı Metal Oksit Yarıiletkenler Kullanılarak Foto Diyotların Üretilmesi”, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Metalürji Eğitimi Anabilim Dalı, s. 31-32, 2011.
- Demirci, B., “İndiyum katkılı ZnO ince filmlerinin bazı fiziksel özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- Durukan, İ.K., “Al:Zno İnce Filmlerinin Büyütülmesi Ve Biyo-Sensör Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 48-87, 2013.
- Eren, O., “Alüminyum katkılı zno ince filmlerinin bazı fiziksel özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 59, 2006.
- Farag, A.M., Cavaş, M., Yakuphanoglu, F., Amanullah, F.M., “Photoluminescence and optical properties of nanostructure Ni doped ZnO thinfilms prepared by sol-gel spin coating technique”, *Journal of Alloys and Compounds*, 509: 7900–7908, 2011.
- Fujihara, S., Sasaki, C. and Kimura, T., “Effects of Li and Mg doping on microstructure and properties of sol-gel ZnO thin films”, *Journal of the European Ceramic Society*, 21, 2109–2112, 2001.

- Garrett C.G.B., "Physical Theory of Semiconductor Surfaces", Brattain W.H., "Phys. Rev.", 99: 376, 1955. Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 5, 2006.
- Gulino, A., Tbbi, G., "CdO thin films: a study of their electronic structure by electron spin resonance spectroscopy", Applied Surface Science, 245, 322-327, 2005.
- Güzel, T., "Metal Yarıiletken Kontaklarda Schottky Engelinin Sığa Özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 5, 2006.
- Jeong I.S., Kim J.H., Im S., "Ultraviolet-enhanced photodiode employing n-ZnO/p-Si struture", Appl. Phys. Lett., 83: 2946, 2003.
- Ji, Z., Song, Y., Xiang, Y., Liu, K., Wang, C. and Ye, Z., "Characterization of  $Mg_xZn_{1-x}O$  thin films prepared by sol-gel dip coating", Journal of Crystal Growth, 265: 537-540, 2004.
- Joshi R.A., Ghosh A., Taur V.S., Shaikh S.U., Siddiqui F.Y., Birajadar R.B. et al., "Nanostructured p-CuIn<sub>3</sub>Se<sub>5</sub>/n-CdS heterojunction engineered using simple wet chemical approach at room temperature for photovoltaic application", Mater. Chem. Phys., 127: 191, 2011.
- Kara M., "Metal/Poli (Pentabromobenzyl Methacrylate-Co-Glycidyl Methacrylate) Heterojunction Diyotların Elektriksel Ve Optiksel Karakteristiklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Bozok Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 7, 2011.
- Kar, S., Panchal, K.M. Brattacharya, S. And Varma, S., "On The Mechanism of Carrier Transport In Metal-Thin-Oxide-Semiconductor Diodes On Polycrystalline Silicon", IEEE Trans. On Electron. Devices, 29: 1839-1845, 1982.
- Kasapoğlu, A.E., "Sol-Jel Spin Kaplama Metodu İle Büyütülen Zno ve Zno:Fe İnce Filmlerin Yapısal ve Yüzeysel Özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı Katıhal Dalı, s. 52-62-63-64-65-66, 2014.
- Keskenler, E.F., "Sol-Jel Yöntemiyle Büyütülen Zno İnce Filmlerinin Optik, Yapısal ve Morfolojik Özelliklerinin İncelenmesi", Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, s.61, 2012.
- Kıymaz, A., "n-GaP Yarıiletkeni İle Hazırlanan Metal Yarıiletken Kontakların Diyot Ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, s.3, 2010.
- Kircher C.J., "Contact metallurgy for shallow junction Si devices", J. Appl. Phys. 47: 5394, 1976.
- Korkmaz, E., "Zno Ve Cdo İkili Yarıiletken Bileşiklerin Sıkar Ve Sol- Jel Teknikleriyle Büyütülmesi ve Yapısal Analizleri", Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen

Bilimleri Enstitüsü, s.28, 2011.

Köse, S., Atay, F., Bilgin, V., Akyüz, “In doped CdO films: Electrical, optical, structural and surface properties”, international journal of hydrogen energy, 34, 5260 – 5266, 2009.

Kumar R. and Khare N., “ Temperature Dependence of Conduction Mechanism of ZnO and Co-doped ZnO Thin Films”, The Solid Films, 516: 1302-1307, 2007.

Kurtuluş, G., “p-Si, GaAs ve Ge Altaşlar Üzerine Al:ZnO Filmlerin Büyütülmesi; Yapısal, Optik ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 67-68-69, 2014.

Lee, J.H. and Park, B.O., “Transparent conducting ZnO:Al, In and Sn thin films deposited by the sol-gel method”, Thin Solid Films, 426: 94–99, 2003.

Lee J.D., Park C.Y., Kim H.S., Lee J.J., Choo Y.G., “A study of conduction of ZnO film/p-Si heterojunction fabricated by photoinduced electrodeposition under illumination”, J. Phys. D Appl. Phys 43: 365403, 2010.

Lee D.H., Park D.H., Kim S., Lee S.Y., “Half wave rectification of inorganic/organic heterojunction diode at the frequency of 1 kHz ”, Thin Solid Films”, 519: 5658, 2011.

Lin. C.C., Young. S.L., Kung. C.Y., Jhang. M.C., Lin. C.H., Kao. M.C., Chen. H.Z., Ou. C.R., Cheng. C.C., Lin. H.H., “Effect of Fe doping on the microstructure and electrical properties of transparent ZnD nanocrystalline films”, Taiwan, 40277, 2012

Liu C., Shi W., Chen Z., Zhang H., Song L., Wang H., Yao S., “Structural, optical and magnetic properties of Co-doped ZnO Films”, Journal of Crystal Growth., 296: 135-140, 2006.

Liu J., Weng W., Ding W., Cheng K., Du P., Shen G., Han G., “Sol-gel derived (Li, Mg): ZnO films with high c-axis orientation and electrical resistivity”, Surface and Coatings Technology, 198: 274-277, 2005.

Mclean A.B., Dharmadasa I.M., Williams R.H., “Schottky-barrier height determination in the presence of interfacial disorder”, Semicond. Sci. Technol., 1: 137, 1986.

Monch W., “On the physics of metal-semiconductor interfaces”, Rep. Prog. Phys. 53: 221, 1990.

Monch W., “Semiconductor Surfaces and Interfaces”, Springer, Berlin, 67, 2001.

Mott N.F., Gurney R.W., “Electronic Processes in Ionic Crystals” Oxford University Press, London, 1940.

Mott N.F., Davis E.A., "Electronic process in non-crystalline materials", Clarendon Press, 438 s., 1971.

Mosbah, A., Abed, S., Bouhssira, N., Aida, M.S., Tomasella, E., "Preparation of highly textured surface ZnO thin films", Materials Science and Engineering B, 129: 144, 2006.

Nadeem M.Y., Ahmed W., "Optical Properties of ZnS Thin Films", Turk J. Phy. 24: 651- 659, 2000.

Natsume Y., Sakata H., "Zinc oxide films prepared by sol-gel spin coating", Thin Solid Films, 372: 30–36, 2000.

Neamen D.A., "Semiconductor Physics and Devices", Irwin, Boston, 1992.

Norde, H. A., "Modified forward I-V plot for schottky diodes with high series Resistance" J. Appl. Phys, 50: 5052–5054, 1979.

Omar M.A., "Principles and Applications, Addison-Wesley Publishing Company", Elementary Solid State Physics: USA, 669 s. ,1993.

Oztas M., Bedir M., "Thickness dependence of structural, electrical and optical properties of sprayed ZnO: Cu films", Thin Solid Films, 516: 1703, 2008.

Özgür Ü., Alivov I., Liu C., Teke A., " Comprehensive review of ZnO materials and devices", journal of applied physics, s. 2-103, 2005.

Pan, Z.W., Dai, Z.R. Wang, Z.L., "Nanobelts Of Semiconducting Oxides", Science 291: 1947, 2001.

Park C.H., Jeong I.S., Kim J.H., Im S., "Spectral responsivity and quantum efficiency of n-ZnO/p-Si photodiode fully isolated by ion-beam treatment", Appl. Phys. Lett., 82: 3973, 2003.

Polat, E.G., "Sol Jel Yöntemi İle Bakır ve Kalay Katkılı ZnO İnce Filmlerin Üretilmesi, Optik Ve Mikroyapısal Karakterizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 44-58, 2009.

Rajesh K.R., Menon C.S., "Electrical and optical properties of vacuum deposited MnPc thin films" Eur. Phys. J., 47: 171, 2005.

Rhodecik, E.H., Williams, R.H., "Metal-Semiconductor Contacts 2nd ed.", Clarendon Press. Oxford, 1-3, 1988.

Saglam M., Ayyildiz E., Gümüş A., Turut A., Efeoglu H., Tuzemen S., "Series resistance calculation for the Metal-Insulator-Semiconductor Schottky barrier diodes",

Appl Phys A 62: 269, 1996.

Shan, F.K., Yu, Y.S., “Band gap energy of pure and Al-doped ZnO thin films”, Journal of the European Ceramic Society, 24, 1869–1872, 2004.

Sharma G.D., Balaraju P., Sharma S.K., Roy M.S., “Charge conduction process and photoelectrical properties of Schottky barrier device based on sulphonated nickel phthalocyanine”, Synth. Met., 158; 620, 2008.

Soylu M., Yakuphanoglu F., “Analysis of barrier height inhomogeneity in Au/n-GaAs Schottky barrier diodes by Tung model”, J Alloys Compd. 506: 418 2010.

Soylu, M., Savaş, Ö., “Electrical And Optical Properties Of ZnO/Si Heterojunctions as a Function of The Mg Dopant Content”, materials science in semiconductor processing, 2015.

Subramanyam T.K., Naidu B.S, Uthanna S., “Effect of substrate temperature on the physical properties of DC reactive magnetron sputtered ZnO films”, Optical Materials 13: 239–247, 1998.

Smith W.F., “Principles of materials science and engineering”, McGraw-Hill, Inc., USA, 864 s., 1990.

Temirci, C., “Anodik Oksidasyon Metoduyla Yüksek Engelli Ve Yüzey Pasivasyonlu Sn/p-Si Schottky Diyotlarının Fabrikasyonu”, Doktora tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 1, 2000.

Thomas, I.M., “Sol-Gel Technology For Thin Films”, Fibers, Preforms, Electronics, and Specialty Shapes. Noyes Publications, s. 2-3, 1988.

Tüzemen, S., Gur E., “Principal issues in producing new ultraviolet lightemitters based on transparent semiconductor zinc oxide”, Optical Materials 30: 292–310, 2007.

Vayssieres, L., Keis, K., Hagfeldt, A., Lindquist, S.E. “Three-dimensional array of highly oriented crystalline ZnO Microtubes”, Chemistry of Materials, 13: 4395, 2001.

Werner, J.H. and Güttler, H.H., “Transport Properties of Inhomogeneous Contacts”, Physica Scripta., 39:258, 1991.

Wright J., Khanna R., Voss L., Stafford L., Gila B., Norton D. et al., “Effect of cryogenic temperature deposition on Au contacts to bulk, single-crystal n-type ZnO”, Appl. Surf. Sci., 253: 3766, 2007.

Wu X., Coutts TJ., Mulligan W.P., “Properties of transparent conducting oxides formed from CdO and ZnO alloyed with SnO<sub>2</sub> and In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>”, J Vac Sci Technol, 15: 1057, 1997.

Yakuphanoglu, F., Caglar, Y., Ilican, S., Caglar, M., "The effects of fluorine on the structural, surface morphology and optical properties of ZnO thin films", *Physica B*, 394: 86, 2007.

Yakuphanoglu F., Caglar Y., Caglar M., Ilican S., "ZnO/p-Si heterojunctionphotodiodebysoł-geldepositionof nanostrukturen-ZnOfilmomp-Sisubstrate", *Materials Science in Semiconductor Processing.*, 13: 137-140, 2010.

Ye J.D., Gu S.L., Zhu S.M., Liu W., Liu S.M., Zhang R. et al., "Electroluminescent and transport mechanisms of n-ZnO/p-Si heterojunctions", *Appl. Phys. Lett.*, 88: 182112, 2006.

Yu C.F., Sung C.W., Chen S.H., Sun S.J., "Relationship between the photoluminescence and conductivity of undoped ZnO thin films grown with various oxygen pressures", *Appl. Surf. Sci.*, 256: 792, 2009.

Ziel, A.V., "Solid State Physical Electronics, Prentice-Hall", Inc., New-Jersey, s. 97-245, 1968.

## ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında Bingöl'de doğdu. İlkokul, ortaokul ve lise eğitimini Bingöl merkezde tamamladı. 2007 yılında Fırat Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümüne yerleşti. 2011 yılında Fırat Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünden başarıyla mezun oldu. 2011 yılında Bingöl Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kataliz Fizik alanında yüksek lisans eğitimine başladı. 2012 yılında, yüksek lisans eğitimi devam ederken, Fırat Üniversitesinde pedagojik formasyon eğitimini tamamladı. Bingöl de ailesiyle birlikte yaşamaktadır.